

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.001

工厂化养殖红鳍东方鲀摄食耗氧率研究

张宇雷,单建军,张瑜霏

(1 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,上海 200092;

2 农业农村部水产养殖设施工程重点实验室,上海 200092)

摘要:系统全面地了解红鳍东方鲀耗氧特性,掌握其关键影响因子和变化规律是工厂化养殖系统设计构建和高效运行的重要基础之一。研究使用自制耗氧率测试装置,采用麻醉灌喂方法测试了体质量(311±11.22)g的红鳍东方鲀在不同条件下的耗氧率情况。共设计1个对照组(完全禁食)、2个水温试验组(分别为20℃和28℃)和4个摄食率试验组(分别为体质量的0%、0.3%、0.6%和1.2%),通过加热棒控制测试装置内的水温,通过传感器实时监测并记录溶氧变化情况,并计算出红鳍东方鲀标准体质量耗氧率。结果显示:禁食状态下,红鳍东方鲀在水温20℃时的标准体质量耗氧率为(70.89±22.21)mg O₂/(kg·h),在28℃时为(211.49±37.67)mg O₂/(kg·h),水温影响差异显著($P<0.01$),但是没有表现出明显的昼夜节律;摄食状态下,红鳍东方鲀摄食率对于耗氧率峰值没有显著影响,是0%试验组的1.7~2倍。高温情况下摄食率越高,耗氧率到达峰值所需时间越短,低温情况下并不明显;从耗氧率回复时间来看,20℃时回复时间为2.5~7.5 h,28℃时为3~15 h,存在随着水温和摄食率的提高,回复时间明显增加的趋势。研究认为红鳍东方鲀主要通过延长耗氧率回复时间来满足其更高的摄食耗能。本研究系统阐述了水温和摄食条件对红鳍东方鲀耗氧的影响,为工厂化养殖系统管理运行及高密度养殖系统溶氧精准调控提供参考。

关键词:工厂化养殖;红鳍东方鲀;河鲀;耗氧;摄食

中图分类号:S965.3

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0001-006

河鲀鱼(*Tetraodontidae*)营养价值高,鲜嫩无刺,是一种较名贵的优质水产品,在韩国、日本以及中国北方地区素有喜食河鲀的风俗^[1]。据统计^[2],2020年中国海、淡水河鲀鱼产量达2.68万t。其中,红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)由于较好的生长性能以及较强的抗病能力,是海水河鲀的主养品种之一,在中国北方地区已经形成了一定的养殖规模,以工厂化和网箱养殖为主^[3-5]。工厂化养殖由于环境基本封闭,水中溶氧(Dissolved oxygen, DO)的维持主要依靠水交换和人工增氧,因此掌握鱼类耗氧规律是提高养殖产能、保证鱼类安全健康生长的必要前提^[6]。

国内外目前对鱼类耗氧的研究侧重在水温、盐度、pH以及昼夜节律等环境因子对鱼类基础耗氧的影响^[7-9],这些研究一般是在鱼类饥饿条件下开展的。然而,对于养殖系统构建和运行管理,更重要的是掌握鱼类在摄食条件下的耗氧规律。

相关研究^[10]表明,在高密度养殖条件下,由于特殊动力作用(Specific Dynamic Action, SDA)的影响,鱼类在摄食后会造成鱼池溶氧的大幅度下降。这一现象如果处理不及时,非常容易导致鱼类缺氧、产生应激甚至死亡。Masser等^[11]认为,鱼类在消化食物过程中,会通过提高呼吸频率来提高血液含氧量,导致水体中的溶氧快速下降。Luo等^[12]和庞旭等^[13]分别针对大口鲶(*Silurus meridionalis*)以及杂食性锦鲤(*Carassius auratus*)研究了水温和摄食率对鱼类摄食耗氧率峰值和SDA持续时间的影响。红鳍东方鲀是中国海水主养经济性鱼类品种之一,然而通过资料检索发现,国内外对于红鳍东方鲀摄食耗氧率的相关研究较少,尚不足以支撑河鲀鱼工厂化养殖系统构建和管理运行的需求。

本研究重点研究红鳍东方鲀在不同水温和摄食率条件下的耗氧率,以期能为工厂化养殖系统构

收稿日期:2022-04-29

基金项目:国家重点研发计划课题(2020YFD0900601);现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-47-G20);中国水产科学研究院科技创新团队项目(2020TD78)

作者简介:张宇雷(1980—),男,副研究员,研究方向:渔业装备与工程技术。E-mail:zhangyulei@fmiri.ac.cn

建以及智能增氧技术创新提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验系统

耗氧率测试装置如图 1 所示,共 4 个 14 L 矩形水箱,顶部用硅胶盖密封。

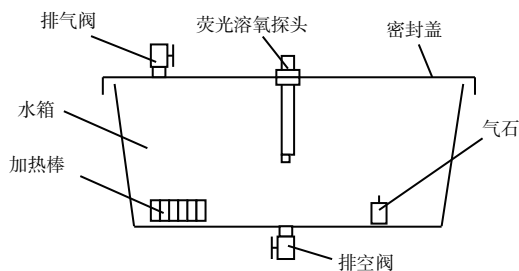


图 1 耗氧率测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the oxygen consumption rate testing system

每个水箱顶部设有单向排气阀和荧光溶氧传感器(南京奇崛电子科技有限公司,有效量程 0~20 mg/L,测量精度为读数的 1.5%),分别用于排出水箱内多余气体以及实时测量溶氧浓度;水箱内安装加热棒、曝气头和排水阀门,分别用于水体加温、增氧和箱体排水。试验通过实时监测水中的溶氧浓度变化计算红鳍东方鲀耗氧率等指标。正式试验时,3 个测试装置水箱用于测试试验鱼耗氧率,另 1 个作为空白组不放入试验鱼,用于计算自然状态下测试装置内的溶氧变化情况。

1.2 试验对象

试验所用 2 龄红鳍东方鲀(300~330 g)在中国水产科学研究院如东中试基地循环水系统中驯养 8 周。驯养系统由直径 1.2 m 养殖池、竖流沉淀器、循环泵、移动床生物滤器、紫外杀菌器以及补光灯、风机等组成。驯养期间,水温控制在(20±0.5)℃,盐度 23‰,饲料使用 5#海童优食系列,每天上午 09:00 和下午 18:00 投喂 2 次。养殖用水为消毒过滤后的海水,利用气石在鱼池内进行曝气增氧,溶氧大于 7 mg/L。

1.3 试验设计

考虑到红鳍东方鲀在耗氧率测试装置内主动摄食不充分的问题,使用麻醉灌喂法^[14]对其进行喂食操作。试验共设计 1 个对照组(完全禁食)、2 个水温试验组(分别为 20℃和 28℃)和 4 个摄

食率试验组(分别为体质量的 0%、0.3%、0.6%和 1.2%)。其中,摄食率 0%试验组只完成麻醉和插入喂食管的动作而不灌喂饲料,主要用于测试插管动作对于鱼类耗氧的影响。

1.4 试验操作

试验鱼在驯养系统内先禁食 24 h,然后选取其中体质量相近的红鳍东方鲀[(311±11.22)g, n=3]分别放入 3 个测试装置内,控制至试验温度驯化 24 h。试验开始前称取适量饲料,研磨至完全呈粉状,以 1:2 比例加水稀释后注入 30 mL 塑料注射器(针头改为口服液吸管)备用。试验开始,首先将 1.5 mL 麻醉剂(MS-222)加入 1 L 海水中搅拌均匀后倒入测试装置内,等待 5 min 使所有试验鱼完全麻醉。然后,取出试验鱼并将注射器吸管经鱼口腔插入前肠前端,灌入饲料。然后,排出测试装置内的海水并快速更换等温新鲜海水。最后将试验鱼放回测试装置。等试验鱼苏醒后(不超过 5 min)停止曝气,传感器开始记录测试装置水体中的溶氧浓度,每隔 1 min 记录 1 次,持续 5 min,结束后重新开启气石曝气。

1.5 数据计算与分析

耗氧率按式(1)计算:

$$O = [(C_{E0} - C_{E1}) \times V - (C_{C0} - C_{C1}) \times V] / t \quad (1)$$
式中: O 为试验鱼摄食耗氧率,mg/h; C_{E0} 为试验组试验开始时的溶氧质量浓度,mg/L; C_{E1} 为试验组试验结束时的溶氧质量浓度,mg/L; C_{C0} 为空白组试验开始时的溶氧质量浓度,mg/L; C_{C1} 为空白组试验结束时的溶氧质量浓度,mg/L; V 为测试装置水体体积,14 L; t 为试验时长,0.083 h(5 min)。

为消除由于鱼体质量差异导致测耗氧率测试误差,按式(2)将耗氧率换算为标准体质量耗氧率^[15]:

$$O' = (1/m)^{0.75} \times O \quad (2)$$

式中: O' 为标准体质量耗氧率,mg/h;0.75 为换算系数; m 为鱼体质量,kg。

2 结果与分析

2.1 对照组耗氧率

分别在水温 20℃和 28℃条件下测试了红鳍东方鲀禁食状态下的标准体质量耗氧率,每个水温条件重复 3 次。试验结果如图 2 所示。

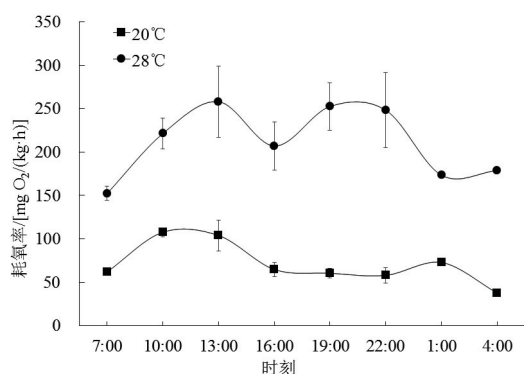


图2 对照组红鳍东方鲀不同水温条件下的耗氧率
Fig. 2 Standardised oxygen consumption rate of *Takifugu rubripes* in control group under different water temperature

水温 20℃ 条件下,红鳍东方鲀全天标准体质量耗氧率平均为 $(70.89 \pm 22.21) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,其中,日间(7:00~16:00)为 $(84.56 \pm 21.29) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,夜间(19:00~04:00)为 $(57.21 \pm 12.61) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,昼夜之间没有显著差异($P>0.05$)。水温 28℃ 条件下红鳍东方鲀全天标准体质量耗氧率平均为 $(211.49 \pm 37.67) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,其中,日间为 $(209.73 \pm 38.00) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,夜间为 $(213.26 \pm 37.25) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,昼夜之间没有显著差异($P>0.05$)。

2.2 摄食率 0% 试验组耗氧率

测试了 2 个水温条件下插管动作(仅完成动作,不灌喂饲料)对于红鳍东方鲀耗氧率的影响,每个水温条件重复 3 次,测试时间统一为上午 10:00。试验结果如图 3 所示。

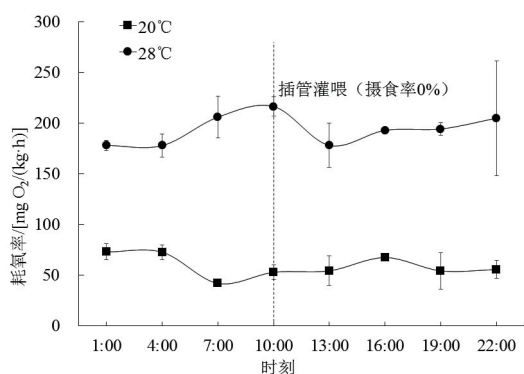


图3 摄食率 0% 试验组红鳍东方鲀在不同水温条件下的标准体质量耗氧率

Fig. 3 Standardised oxygen consumption rate of *Takifugu rubripes* in experimental group (0%) under different water temperature

20℃ 条件下插管动作前后红鳍东方鲀标准体质量耗氧率未出现明显波动,全天空平均为 $(58.79 \pm 10.25) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,与 20℃ 对照组无显著差异($P>0.05$)。28℃ 条件下同样比较平稳,全天空平均为 $(193.61 \pm 13.86) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,略低于 28℃ 对照组,但是无显著性差异($P>0.05$)。

2.3 不同水温和摄食率对红鳍东方鲀耗氧率的影响

分别在水温 20℃ 和 28℃ 条件下测试了红鳍东方鲀通过插管灌喂饲料后的标准体质量耗氧率变化情况,灌喂时间统一为上午 10:00。3 个试验组的摄食率分别为鱼体重的 0.3%、0.6% 和 1.2%,摄食率 0% 组显示为根据前文所述试验数据计算获得的全天空平均值。图 4 显示了 20℃ 水温条件下的测试结果,从中可以看出 3 个试验组的标准体质量耗氧率均在灌喂饲料后 12 h 左右达到峰值,1.2% 试验组的峰值相对较低 $(104.70 \pm 3.16) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,0.3% 和 0.6% 试验组峰值比较接近,分别为 $(116.73 \pm 11.55) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 和 $(116.02 \pm 5.68) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,3 个试验组之间没有显著性差异($P>0.05$);另外,在标准体质量耗氧率到达峰值后 2.5~7.5 h,0.3%、0.6% 和 1.2% 试验组先后回复至 0% 组水平。

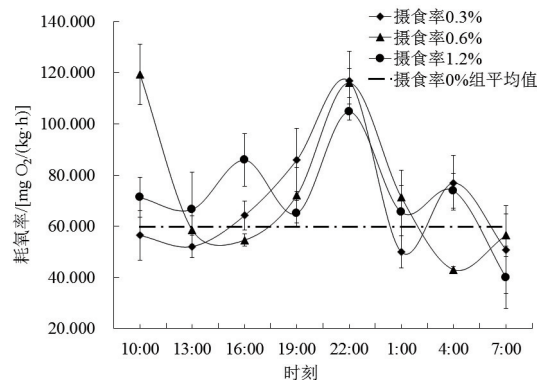


图4 20℃ 水温时红鳍东方鲀在不同摄食率条件下的标准体质量耗氧率

Fig. 4 Standardised oxygen consumption rate of *Takifugu rubripes* under different feeding rate in 20℃ water temperature

图 5 显示的是 28℃ 水温条件下的测试结果,其中,1.2% 试验组在灌喂饲料后 6h 最先出现峰值 $(365.69 \pm 35.69) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,再经过 15 h 耗氧率回复至 0% 组水平;其次为 0.3% 试验组,峰值出现在灌喂饲料后 9 h,又经过 3 个多小时回复

至 0% 组水平;最后是 0.6% 试验组,峰值为 $(314.91 \pm 51.17) \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,出现在灌喂饲料后 12 h,3 h 后恢复。3 个试验组标准体质量耗氧率峰值之间没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

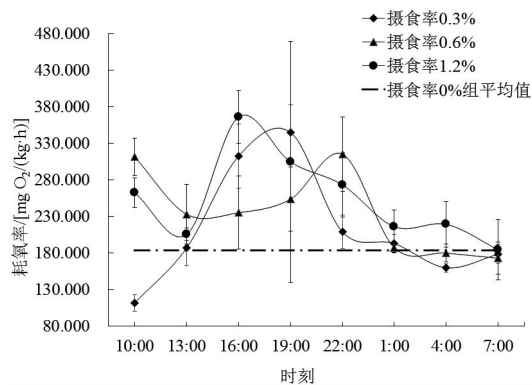


图5 28 °C 水温时红鳍东方鲀在不同摄食率条件下的标准体质量耗氧率

Fig. 5 Standardised oxygen consumption rate of *Takifugu rubripes* under different feeding rate in 28 °C water temperature

3 讨论

3.1 水温对红鳍东方鲀耗氧的影响

鱼禁食状态下的耗氧率称为静止耗氧率。计算结果显示,红鳍东方鲀在水温 28 °C 时的静止耗氧率是 20 °C 时的 2.98 倍,表明其在高温下的基础代谢消耗明显增加,这是鱼类应对高温情况时一种比较普遍和典型的生理响应^[16-17],类似结果在其他鱼类研究中也被发现。黄键盛等^[8]对斜带石斑鱼幼鱼的研究结果为 $O = 6.082 6T - 8.970 4$ 。根据本研究数据拟合红鳍东方鲀禁食状态标准体质量耗氧率和水温关系式为 $O = 17.6T - 280.6$ 。导致差别产生的原因,一方面可能是因为试验仅设了 20 °C 和 28 °C 2 个梯度,数据量偏少,拟合结果存在误差;另一方面可能是不同品种对水温的适应性存在一定的差异。鱼类摄食后的耗氧率峰值是表征鱼类消化代谢能力的重要特征之一^[18-20]。本研究发现红鳍东方鲀在 28 °C 时摄食耗氧率峰值是 20 °C 时的 2.7~3.5 倍,与静止耗氧率的变化基本一致,即可以通过静止耗氧率来反应摄食耗氧率峰值对水温变化的响应幅度。此外,无论是 28 °C 还是 20 °C 条件下,红鳍东方鲀摄食后的耗氧率峰值与静止耗氧率之间的比例变化

不大,始终是在 1.7~2 倍范围内。该现象和中华鲈 (*Silurus asotus Linnaeus*) 在 0.5%~2% 投喂率下的摄食耗氧规律相似^[21],可为溶氧的精准控制提供较好的理论依据。

3.2 摄食率对红鳍东方鲀耗氧的影响

动物摄食后的代谢通常与食物所含的热量有关^[22],其代谢行为和能量消耗的变化幅值是工程应用和养殖管理关注的重点。不同鱼类主要通过提高耗氧率峰值、延长 SDA 持续时间或者是通过两者协同作用来满足摄食后的能量消耗^[23-24]。本研究发现,各摄食率试验组之间,红鳍东方鲀耗氧率峰值不存在显著差异,基本是 0% 试验组的 1.7~2 倍,该情况与大多数鱼类的研究结论一致^[25];从到达耗氧率峰值的时间来看,在高温情况下存在着摄食率越高,耗氧率到达峰值所需时间越短的现象,但是该现象在低温情况下并不明显;从耗氧率回复时间来看,20 °C 时回复时间为 2.5~7.5 h,28 °C 时为 3~15 h,存在随着水温和摄食率的提高,回复时间明显增加的趋势,这一现象和黄鳍金枪鱼相似^[26]。综上表明,红鳍东方鲀主要通过延长耗氧率回复时间来满足其更高的摄食耗能。

3.3 工程应用和研究展望

在工厂化养殖系统中增氧系统和工艺设计的主要依据之一就是养殖对象呼吸耗氧。Timmons 等^[27]总结提出在大西洋鲑等冷水性鱼类工厂化养殖系统设计中,鱼类耗氧率可根据投饲量的 0.25 倍进行估算。以养殖 100 kg 大西洋鲑鱼为例,日投饲率按 1.2% 计,所得日耗氧量为 0.3 kg/d。根据本研究所得红鳍东方鲀在水温 20 °C,投饲率 1.2% 时的耗氧率峰值计算,100 kg 红鳍东方鲀的日耗氧量为 0.25 kg/d。该结果与 Timmons 等^[27]的计算结果比较接近。但是,如以水温 28 °C 时的耗氧率峰值计算,则为 0.89 kg/d,数据相差较大。分析认为,大西洋鲑属于冷水性鱼类,适宜温度为 10~18 °C,因此,该估算方法更适用于低温品种的耗氧率计算。而在暖水性鱼类的耗氧率计算时,则必须充分考虑养殖对象本身的摄食耗氧情况。另外,从红鳍东方鲀的耗氧率变化幅度来看,摄食前后数据差别 1 倍多,在工厂化养殖尤其是高密度封闭式循环水养殖系统中采用简单定量式的增氧工艺,很容易导致资源过度消耗,又或者是

系统短时间缺氧。目前有少量关于鱼类生长模型和虾类耗氧模型的溶氧控制^[28-30],但在仿真研究阶段,因此,迫切需要开展溶氧精准调控技术与装备的研发,能够针对养殖对象耗氧特性和水温、水质等情况实时地对溶氧进行智能化的精准调控,进一步提高养殖产能,降低生产成本和风险。

4 结论

研究发现红鳍东方鲀耗氧率受水温和摄食率影响显著,28℃时的静止耗氧率是20℃的2.98倍;摄食率对于耗氧率峰值没有显著影响,基本是静止耗氧率的1.7~2倍,但是存在随水温和摄食率的提高,耗氧率回复时间增加的趋势。综上所述,红鳍东方鲀主要通过延长耗氧率回复时间来满足其摄食耗能的需求。本研究能够为工厂化养殖系统科学管理和运行提供参考,为高密度养殖系统溶氧精准调控提供理论依据,有助于进一步提高养殖产能,提高饲料利用率,降低生产成本。

□

参考文献

- [1] 马爱军,李伟业,王新安,等.红鳍东方鲀养殖技术研究现状及展望[J].海洋科学,2014,38(2):116-121.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.2021中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2021.
- [3] 高露姣,黄艳青,夏连军,等.不同养殖模式下红鳍东方鲀的品质比较[J].水产学报,2011,35(11):1668-1676.
- [4] 张迪,张云霞,杨正勇.中国河豚鱼养殖产业发展现状研究[J].中国渔业经济,2019,37(4):87-96.
- [5] HOU H, ZHANG Y, MA Z, et al. Life cycle assessment of tiger puffer (*Takifugu rubripes*) farming: A case study in Dalian, China [J]. Science of The Total Environment, 2022, 823:153522.
- [6] BADIOLA M, BASURKO O C, PIEDRAHITA R, et al. Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review[J]. Aquacultural Engineering, 2018, 81:57-70.
- [7] REQUENA A, FERNANDEZ-BORRAS J, PLANAS J. The effects of a temperature rise on oxygen consumption and energy budget in gilthead sea bream [J]. Aquaculture International, 1997, 5(5):415-426.
- [8] 黄建盛,陈刚,张健东,等.温度、pH及体重对低盐水体下斜带石斑鱼幼鱼耗氧率与排氨率的影响[J].动物学杂志,2016,51(6):1038-1048.
- [9] 刘龙龙,罗鸣,陈傅晓,等.盐度对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼渗透调节与耗氧率的影响[J].中国水产科学,2020,27(6):692-700.
- [10] SECOR S M. Specific dynamic action: a review of the postprandial metabolic response [J]. Journal of Comparative Physiology B, 2009, 179(1):1-56.
- [11] MASSER M P, RAKOCY J, LOSORDO T M. Recirculating aquaculture tank production systems [J]. SRAC Publication, 1999, 452:1-12.
- [12] LUO Y P, XIE X J. Effects of temperature on the specific dynamic action of the southern catfish, *Silurus meridionalis* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology, 2008, 149(2):150-156.
- [13] 庞旭,曹振东,付世建.摄食水平对锦鲤幼鱼特殊动力作用的影响[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2009,26(1):22-25.
- [14] THORARENSEN H, FARRELL A P. Postprandial intestinal blood flow, metabolic rates, and exercise in Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. Physiological and biochemical zoology: PBZ, 2006, 79(4):688-694.
- [15] FU S J, ZENG L Q, LI X M, et al. The behavioural, digestive and metabolic characteristics of fishes with different foraging strategies [J]. Journal of Experimental Biology, 2009, 212(14):2296-2302.
- [16] PIROZZI I, BOOTH M A. The routine metabolic rate of mullet (*Argyrosomus japonicus*; Sciaenidae) and yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*; Carangidae) acclimated to six different temperatures [J]. Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology, 2009, 152(4):586-592.
- [17] LI X, ZHANG Y, FU S. Effects of short-term fasting on spontaneous activity and excess post-exercise oxygen consumption in four juvenile fish species with different foraging strategies [J]. Biology Open, 2020, 9(9):051755.
- [18] PIROZZI I, BOOTH M A. The effect of temperature and body weight on the routine metabolic rate and postprandial metabolic response in mullet, *Argyrosomus japonicus* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology, 2009, 154(1):110-118.
- [19] ALTIMIRAS J, CLAIREAUX G, SANDBLOM E, et al. Gastrointestinal blood flow and postprandial metabolism in swimming sea bass *dicentrarchus labrax* [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2008, 81(5):663-672.
- [20] BEHRENS J W, AXELSSON M, NEUENFELDT S, et al. Effects of hypoxic exposure during feeding on SDA and postprandial cardiovascular physiology in the Atlantic cod, *Gadus morhua* [J]. PLoS One, 2012, 7(9):e46227.
- [21] FU S J, CAO Z D, PENG J L. Effect of meal size on postprandial metabolic response in Chinese catfish (*Silurus asotus Linnaeus*) [J]. Journal of Comparative Physiology. B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology, 2006, 176(5):489-495.
- [22] WEBER J M, CHOI K, GONZALEZ A, et al. Metabolic fuel kinetics in fish: swimming, hypoxia and muscle membranes [J]. Journal of Experimental Biology, 2016, 219(2):250-258.
- [23] FITZGIBBON Q P, SEYMOUR R S. Postprandial metabolic increment of southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii* ingesting

- high or low-lipid sardines *Sardinops sagax* [J]. Journal of Fish Biology, 2009, 75(7):1586-1600.
- [24] 李秀明, 陈昌瑞, 吴川, 等. 摄食水平对岩原鲤幼鱼摄食代谢和力竭运动后代代谢特征的影响 [J]. 水产学报, 2012, 36(11):1731-1738.
- [25] DUPONT-PRINET A, CLAIREAUX G, MCKENZIE D J. Effects of feeding and hypoxia on cardiac performance and gastrointestinal blood flow during critical speed swimming in the sea bass *Dicentrarchus labrax* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology, 2009, 154(2):233-240.
- [26] KLINGER D H, DALE J J, GLEISS A C, et al. The effect of temperature on postprandial metabolism of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2016, 195(A):32-38.
- [27] TIMMONS M B, LOSORDO T M. Aquaculture water reuse systems: engineering design and management [M]. Amsterdam: Elsevier Science B. V, 1994.
- [28] ZHOU X, LI D, ZHANG L, et al. Application of an adaptive PID controller enhanced by a differential evolution algorithm for precise control of dissolved oxygen in recirculating aquaculture systems [J]. Biosystems Engineering, 2021, 208:186-198.
- [29] ZHOU X, WANG J, HUANG L, et al. Modelling and controlling dissolved oxygen in recirculating aquaculture systems based on mechanism analysis and an adaptive PID controller [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192:106583.
- [30] CHAHID A, N' DOYE I, MAJORIS J E, et al. Fish growth trajectory tracking using Q-learning in precision aquaculture [J]. Aquaculture, 2022, 550:737838.

Studies on the influence of feeding on oxygen consumption rate of *Takifugu Rubripes*

ZHANG Yulei, SHAN Jianjun, ZHANG Yufei

(1 Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;
2 Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China)

Abstract: Accurately understanding of oxygen consumption characteristics and the key influencing factors of the fish is one of the important requirements for the design, construction, and efficient operation of an industrialized culture system. In the paper, the oxygen consumption rate of *Takifugu rubripes* with a body mass of (311 ± 11.22) g has been tested under different conditions by using a homemade testing device. In consideration of uncontrollable feeding conditions, all of the testing fish are fed by injection after anesthesia. There are one control group (completely unfed), two water temperature experimental groups ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $28\text{ }^{\circ}\text{C}$), and four feeding rate experimental groups (0%, 0.3%, 0.6%, and 1.2% of body weight, respectively) were designed in the study. The results showed that under the unfed condition, the standard body mass oxygen consumption rates of *Takifugu rubripes* under two water temperatures were (70.89 ± 22.21) mg $\text{O}_2 / (\text{kg} \cdot \text{h})$ and (211.49 ± 37.67) mg $\text{O}_2 / (\text{kg} \cdot \text{h})$, respectively. The effect of water temperature was significantly different ($P < 0.01$), but there was no obvious influence by circadian rhythm ($P > 0.05$). Under the feeding condition, the peak oxygen consumption rate was about 1.7–2 times that of the 0% experimental group at the same temperature. The higher the feeding rate, the shorter it is required for the oxygen consumption rate to reach the peak, which is not obvious at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. As the recovery time of oxygen consumption rate, it is about 2.5–7.5 hours at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 3–15 hours at $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. There is obvious that the recovery time increases significantly with higher water temperature and feeding rate. Therefore, the study shows that *Takifugu rubripes* will extend their oxygen consumption rate recovery time to meet their higher feeding energy consumption, not the peak oxygen consumption rate. The study systematically evaluates the effects of water temperature and feeding conditions on oxygen consumption of *Takifugu rubripes*, which can provide a reference for the management and operation of industrialized aquaculture systems and provide the theoretical basis for accurate control of dissolved oxygen in high-density aquaculture systems.

Key words: industrial aquaculture; *takifugu rubripes*; puffer; oxygen consumption; feeding

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.002

增殖放流鱼苗野化训练装置设计与试验

胡庆松,王 熠,祖西龙,陈雷雷,李 俊

(上海海洋大学工程学院,上海 201306)

摘要:为提高海洋牧场增殖放流苗种的适应性和放流存活率,设计了一种增殖放流鱼苗野化训练装置,并以条石鲷为研究对象开展了装置的应用试验。根据躲避敌害与捕食活饵的训练需求,结合鱼苗与敌害的体型差异,选用2.5 cm和3.3 cm两种孔径的格栅作为避敌格栅;为了减少仓门开闭过程中对鱼苗和活饵的影响,仓门的运动幅度不宜过快过大,设定活饵仓门的最大开门角度为45°、时间为5 min,选用0.6 r/min的电机作为仓门驱动电机。结果显示:采用成年黑鲷等大型鱼类作为敌害进行避敌训练时,条石鲷鱼苗能够利用野化训练装置躲避敌害;利用脊尾白虾等活饵进行捕食训练时,条石鲷鱼苗经历了从认知食物到积极分食两个阶段,捕食能力提升过程明显。结合现场观察并通过基本生长指标和鱼苗死亡情况的对比,可以分析出野化池鱼苗相对于对照池鱼苗,摄食积极,攻击性强。研究表明,在选定的野化训练模式下,可在一定程度上实现条石鲷鱼苗行为特征的改善,同时验证了增殖放流鱼苗野化训练装置的可行性。

关键词:增殖放流鱼苗;野化训练装置;捕食活饵;躲避敌害

中图分类号:S237

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0007-010

海洋牧场是指在某一海域内建设适应水产资源生态的人工栖息场,采用增殖放流和移殖放流的方法,将生物种苗经过中间育成或人工驯化后放流入海,利用海洋自然生产力并进行微量投饵育成,同时采用先进的鱼群控制技术和环境监控技术对其进行科学管理,使其资源量增大,有计划且高效率地进行捕捞^[1]。人工苗种放流存活率是影响海洋牧场增殖效益的重要因素^[2]。在当前海洋牧场增殖苗种培育及放流实施过程中,对于增殖目标种的野化训练环节仍重视不足,针对批量生产增殖目标种的野化训练技术严重缺乏,苗种放流后生存适应性差,放流存活率低,严重影响了增殖效果,成为制约海洋牧场增殖放流成效提升的主要因素之一^[3-5]。

为解决以上问题,自20世纪80年代起,欧美地区许多发达国家已开始针对一些主要增殖种类展开研究,重点分析人工养殖苗种和野生苗种间存在的关键行为学模式和生理学特征差异,探讨提高人工繁育苗种野外存活率的野化训练途径^[6-12]。进入21世纪以来,以鱼类社会学习能力研究为基础的摄食-反捕食能力训练、环境丰容技术、游泳能力训练等行为驯化研究逐渐受到关

注^[13-16]。然而,从世界范围看,尽管目前在放流苗种行为驯化理论研究方面取得了一定进展,但野化训练技术在增殖实践中的应用仍处于探索阶段,欧美地区已有研究大多围绕鲑科鱼类开展,且以单一训练技术试验验证为主^[17-18]。针对捕食、避敌等方面尚未见已开展的系统化、规模化技术实践应用。

放流后自然海域下捕食活饵和躲避敌害能力是鱼苗能否生存的第一挑战,由于食物和环境方面的明显差异,从人工饵料直接过渡到野外环境下的活饵是一个跳跃性变化。采用人工饵料和活饵复合式进行,加入敌害进行提醒,对放流鱼苗进行野化训练,能够有效提升放流鱼苗的生存能力。

本研究提出一种增殖放流鱼苗野化训练装置,开展承载浮体、多重避敌装置、活饵投放装置、能源供应系统、集成控制中心等关键部件的设计与选型,针对条石鲷开展捕食活饵和躲避敌害两种野化训练试验并分析结果,从而验证该野化训练装置的可行性。

1 整体结构设计

传统的增殖放流鱼苗野化训练通常以人工方

收稿日期:2022-02-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0901303);上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心(2021科技02-12)

作者简介:胡庆松(1979—),男,教授,博士生导师,研究方向:渔业工程装备。E-mail:qshu@shou.edu.cn

式增加环境丰容度或释放活饵的单一训练为主,就提升增殖放流鱼苗的放流初期存活能力而言,存在如下问题:

(1)人工辅助野化,容易形成增殖放流鱼苗对人类活动的依赖性。人工养殖阶段,鱼苗与人员互动频繁,很容易使得鱼苗形成“人至则食至”和在水面摄食的习惯。

(2)单一性训练不能满足野化种群初期存活能力影响因素的综合性要求。海洋牧场环境复杂多变,放流鱼苗进入海洋后需要面临包括捕食有

限食物和躲避多种敌害等诸多问题,仅仅针对某一方面的野化训练不能使得鱼苗在自然环境下的生存率得到有效提高。

(3)现有野化装置常以单一功能的组件临时搭建,集成度不够,安装不便,尤其是无法满足网箱野化训练需求,且固定式野化装置容易使得增殖放流鱼苗在野化训练过程中形成类似驯化的条件反射。

针对以上问题,提出以下设计思路并绘制出如图 1 所示的野化训练装置功能图。

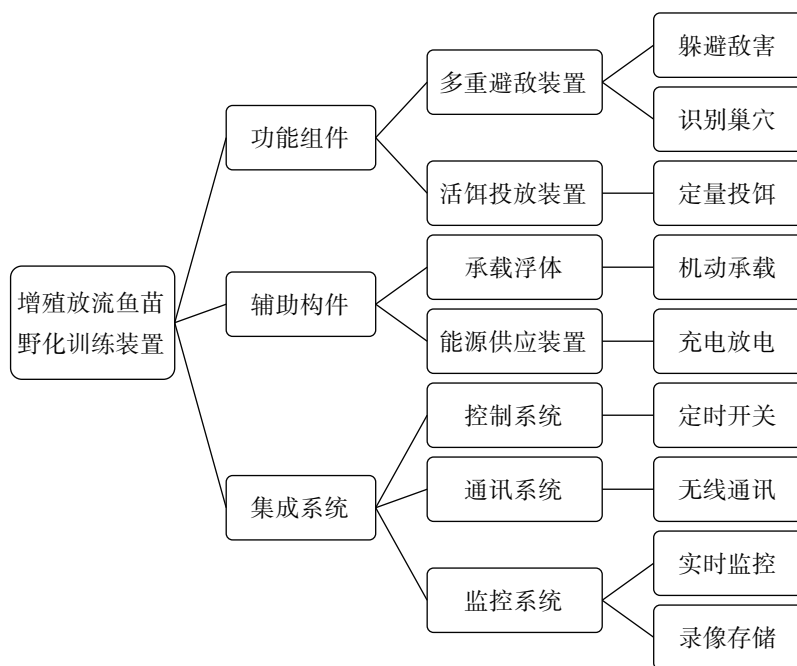


Fig. 1 Function diagram of feralization training device

(1)集成自动或远程手动控制、鱼苗行为观测和远程数据通信等功能,可实现远程无人、自动化的野化训练工作。

(2)综合捕食活饵、躲避敌害两种野化训练方式,满足多重野化训练的需求。

(3)具有机动性,可以变换位置。并集成所有的功能装置于一体,作为整体化设备适用水池的野化训练需求。

依据上述设计思路并结合功能图设计出的野化训练装置主要由多重避敌装置、活饵投放装置、承载浮体、能源供应装置、集成控制中心等组成。野化训练装置整体结构如图 2 所示。

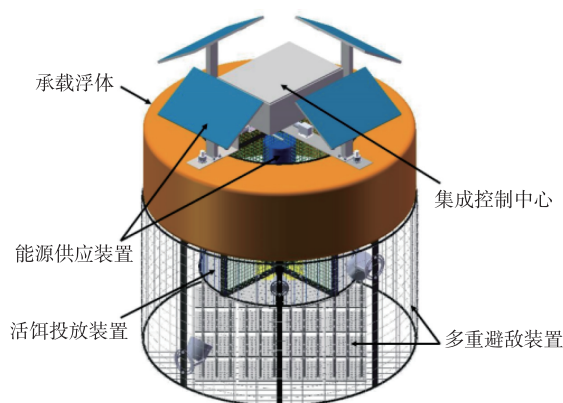


图 2 野化训练装置整体结构图

Fig. 2 Overall structure diagram of feralization training device

2 功能组件设计

2.1 多重避敌装置设计

2.1.1 格栅避敌装置设计

格栅避敌装置的设计借鉴了深水网箱养殖鱼类的分级原理^[19-20],这种原理是利用鱼类因摄食、避敌等行为使得鱼类自动游入格栅所营造的内部空间。对于野化训练装置来说,内部空间和外部环境天然形成了两级格局,利用鱼类体型特征与格栅间距或孔径的关系,可以将体型特征具有明显差异的敌害异种鱼类和同种鱼类分离开来,以训练目标鱼种躲避异类敌害的能力。

避敌格栅规格参数主要由受训目标种与敌害异类的生物学特征决定。分析受训鱼苗与敌害大鱼的体形差异,可以确定避敌格栅的孔径大小。以条石鲷为例,条石鲷体长为体高的1.7~1.9倍^[21]。根据国内相关鱼类增殖放流技术规范^[22],放流条石鲷苗种平均全长 ≥ 5 cm。而鱼苗全长包括体长,由此可以推出条石鲷苗种放流的体高应大于3 cm。黑鲷属于凶猛的肉食性、追逐捕食性鱼类,且在集群捕食中表现积极,反应灵敏^[23],适合作为躲避敌害训练中的敌害鱼。黑鲷成鱼的体长一般在12~30 cm,为体高的2.6倍^[24],可以推算出黑鲷成鱼的体高约为4.6~11.5 cm。综合作为受训目标种的条石鲷鱼苗和作为敌害异类的黑鲷成鱼的体高差异,可以将避敌格栅的孔径大小锁定在3~4.6 cm之间。此外,由于增殖放流鱼苗在放流前相互之间的体形和规格也有差异,为了初步减少鱼群种内竞争与攻击的可能,在保证有一种孔径大小介于3~4.6 cm之间的避敌格栅的前提下,还可以增加一种孔径大小略小于3 cm的避敌格栅。通过这种孔径大小略小于3 cm的避敌格栅,当有体高大于这种避敌格栅孔径的增殖放流鱼苗因为饥饿等客观原因追逐攻击体高小于这种避敌格栅孔径的同伴时,后者可以通过穿过避敌格栅游入内部,而前者被阻挡,那么后者就可以为自己赢得一定的躲避时间,这也在另一方面体现了避敌格栅的分级原理。

2.1.2 仿岩礁巢穴装置设计

多数增殖放流鱼种,如大黄鱼、黑鲷、条石鲷、皇姑鱼等,具有恋礁性。因此,模拟岩礁、巢穴等

环境可以训练增殖放流鱼苗寻找、识别巢穴和躲避同伴攻击的能力。仿岩礁巢穴装置的外形与钉板类似,将两端倒有圆角的多个柱子安插在平板上,并整体安装在格栅避敌装置的底部圆形格栅内侧。

2.1.3 多重避敌装置整体结构设计

格栅避敌装置和仿岩礁巢穴装置组成多重避敌装置,其整体结构三维建模图如图3所示。

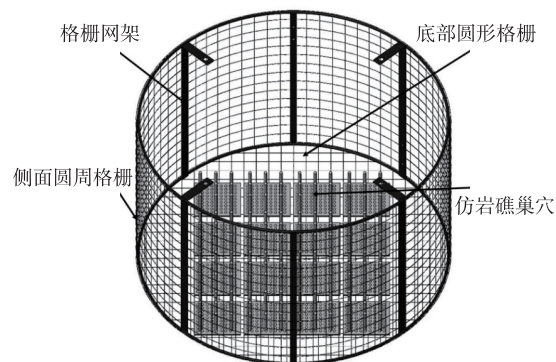


图3 多重避敌装置的三维建模图

Fig. 3 3D modeling diagram of multiple enemy avoidance device

2.2 活饵投放装置设计

2.2.1 结构与空间设计依据

活饵投放装置的结构与空间设计主要以活饵投喂量、暂养密度为考量。活饵投喂量过大,可能会给增殖放流鱼苗造成一种“食物供应充沛”的假象,不利于训练其捕食活饵的能力。活饵的暂养密度过大,会加剧活饵争夺有限空间,竞争生存,导致存活率降低^[25]。综合以上因素,结合实际训练要求,设计出如图4所示的活饵投放装置。

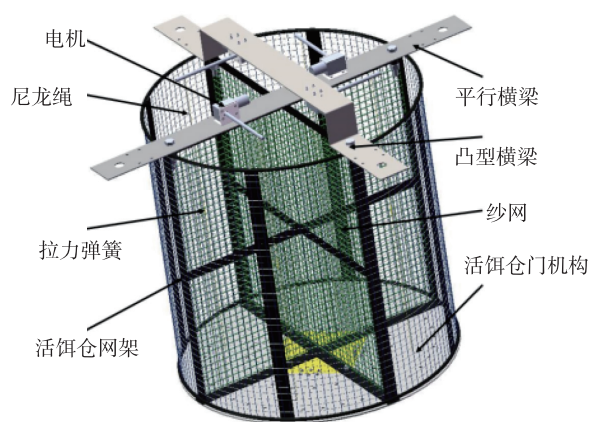


图4 活饵投放装置的三维建模图

Fig. 4 3D modeling diagram of live bait delivery device

2.2.2 仓门运动机构设计

活饵投放装置主要由活饵仓网架、活饵仓门机构、纱网、凸型横梁、平型横梁、电机、尼龙绳、拉力弹簧等组成。活饵仓网架呈圆柱状,内部有 3 个十字形网架。为实现活饵定量投放功能,将纱网安装在活饵仓网架的外侧和十字形网架上将料仓分成四等分。活饵仓门机构包括四扇仓门,安装在最下侧的十字形网架上。电机和活饵仓门分别绑接一段尼龙绳,两段尼龙绳之间以拉力弹簧相连接。拉力弹簧用于缓冲尼龙绳对电机轴的施力负担,防止开闭仓门时间过长而造成尼龙绳绕组拉弯电机轴。安装在平行横梁和凸型横梁上的电机通过拉力弹簧和两段尼龙绳与仓门相连接。若尼龙绳绕组为顺时针方向,当电机通电并顺时针转动时,活饵仓门因材料密度大于海水密度而开启,反之则关闭。

2.2.3 仓门驱动电机转速的确定

仓门开闭时间可以为定时开关模块设定时间提供依据,而电机转速的选择关系到仓门开闭时

间的设定。仓门开闭如图 5 所示。

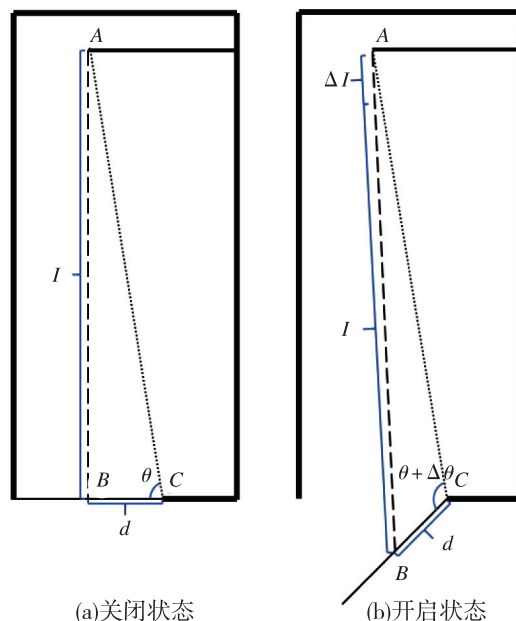


图 5 仓门开闭示意图

Fig. 5 Schematic diagram of opening and closing of warehouse door

$$\Delta l = \sqrt{l^2 + 2d^2 - 2 \times \sqrt{l^2 + 2d^2} \times \cos(\arctan \frac{l}{d} + \Delta\theta)} - l \quad (1)$$

$$N = \frac{\Delta l}{c} \quad (2)$$

$$n_r = \frac{N}{t} \quad (3)$$

式中: Δl 为尼龙绳的伸长量, mm; l 为尼龙绳在仓门关闭状态下的长度, mm; d 为仓门门轴到尼龙绳结点的距离, mm; $\Delta\theta$ 为设定的最大开门角度, ($^\circ$); N 为尼龙绳在电机轴上的绕组圈数; c 为电机轴横截面的圆周长, mm; t 为仓门开闭所需的时间, s; n_r 为电机转速, r/min。

假设尼龙绳处于绷紧拉直状态,拉力弹簧处于原长状态。为了减少仓门开闭过程中对鱼苗和活饵的影响,仓门的运动幅度不宜过快过大,故设定最大开门角度 $\Delta\theta = 45^\circ$, 时间 $t = 5 \text{ min}$ 。根据公式(1)~(3),求得电机转速 n_r 约为 0.6 r/min。选择额定电压为 12 V, 额定转速为 0.6 r/min 的直流蜗轮蜗杆减速电机作为仓门驱动电机。

3 辅助构件设计

3.1 承载浮体设计

3.1.1 承载浮体设计原则

为满足装置的机动性要求,采用一种浮体,由浮体提供浮力,使得装置的一部分可以浮于水面,便于根据需要改变所处位置,避免增殖放流鱼苗在野化训练过程中形成类似驯化的条件反射。以近海小型海洋浮标标体为母型,进行浮体的结构形式和规格尺寸的设计,开展相关数据的计算,并科学选材进行加工。

在承载浮体概念设计阶段需要满足以下两个基本原则:

(1) 浮体所提供的浮力能与整套野化训练装置所受重力相平衡。根据野化训练装置的功能设计要求,预估包括浮体在内的所有组件的重量为浮体的结构形式和规格尺寸的设计提供依据。

(2) 浮体所营造的空间充足。在初步满足

所有组件装载的基础上仍留有一定的空间余量。

3.1.2 结构形式与规格尺寸确定

海洋浮标标体的结构形式有圆盘形、船型、环形、球形、柱形等。圆盘形浮标和球形浮标具有有效面积和空间利用率较高、稳定性较好、能够抵抗恶劣的海洋环境、易于布置投放、运输方便等特点,且这两种浮标结构对称、生产制作成本较低。然而,由于球形浮标在垂荡方向上的随波性较好,通常仅用于波浪测量。船形浮标呈流线型,在纵向上的标体结构较长,因此具有不易倾覆、抗风浪能力较强、拖曳运输方便的特点,但其造价相对较高。柱形浮标吃水量较大,且通常需要水下浮标作为辅助^[26-28]。

为充分利用浮体空间,便于数据采集、控制、通讯、能源供应等设备或系统的安装与使用,结合该野化训练装置在水池或网箱的应用实际,参考现有海洋浮标标体的结构形式,设计一种环形圆柱承载浮体。这种浮体结构简单、制作容易,且其所营造的空间可以得到充分利用。

考虑到增殖放流鱼苗和活饵的规格、数量等因素,本次设计的浮体的规格尺寸为外圈直径 1 m、内圈直径 0.6 m、高度 0.3 m、外圈上下两端圆角半径 0.02 m、圆环上的 4 个通孔直径 0.021 m。

根据以上设计尺寸,取圆周率 $\pi = 3.14$,则该浮体的体积约为 $0.149\ 8\ \text{m}^3$ 。

3.1.3 浮性分析

浮体的规格尺寸决定了其自身的最大排水量,从而决定了其所能够提供的最大浮力的大小。根据阿基米德原理,

$$F = \rho Vg \quad (4)$$

式中: F 为浮体所能提供的最大浮力, N; ρ 为浮体排开水的密度, kg/m^3 ; V 为浮体排开水的体积, m^3 。

海水密度一般在 $1.02 \times 10^3 \sim 1.07 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$ 之间,取 $\rho = 1.02 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$, $g = 9.8\ \text{N}/\text{kg}$,则求得该浮体所能提供的最大浮力 F 约为 $1\ 497\ \text{N}$ 。

根据表 1 所提供的总质量,求出该野化训练装置的总重量 G 为 $539\ \text{N}$ 。

表 1 野化训练装置各组件的质量

Tab. 1 Mass of each component of feralization training device

组件名称	质量/kg
承载浮体	15
活饵投放装置	12
多重避敌装置	14
集成控制中心	5
能源供应装置	9
总计	55

从而得到 $F > G$,说明该浮体承载后仍然能够使得装置的一部分浮于水面。

3.1.4 选材与工艺

海洋浮标标体一般是由钢板制成,将所需功能装置集成在标体上。然而,选用钢制材料需要考虑包括防护在内的许多问题。因此,本设计采用具备众多优良特性的 EVA 材料。EVA 抗菌能力强、无毒、无味、无污染,具有密闭泡孔结构,防潮不吸水,抗海水腐蚀能力强。由于其韧性好、回弹性高和抗张力强,具备良好的减震缓冲性能。它还拥有良好的隔热、保温防寒性能,可应用于严寒和曝晒场合^[29]。

此外,为进一步增强承载浮体的防海水腐蚀能力,在 EVA 材料表面喷涂聚脲酯,形成具有一定厚度的聚脲涂层。相对于传统有机涂层材料,聚脲材料拥有低温韧性好、防腐、耐磨、抗湿滑、耐老化、抗热冲击、耐介质、固含量高等优异的物理化学性能^[30]。问世以来,被广泛应用于防水防渗、防腐耐磨等工程防护领域^[31]。

综上所述,聚脲涂层 EVA 材料承载浮体可以同时适应水池和近海网箱的复杂环境。

3.2 能源供应装置设计

由于水池和网箱占有一定的面积,尤其在占地面积比较大的网箱中,从陆地搭接电缆需要考虑的因素较多,也不利于装置位置的大范围调整,甚至可能会对增殖放流鱼苗的野化训练效果造成不小的影响,充分利用太阳能这类可再生资源供应能源很有必要,故采用蓄电池与太阳能板相结合的方式实现各个用电设备与系统的连续供电。在承载浮体上侧的两个横梁上安装了 4 块太阳能板,太阳能板的功率根据野化训练装置的总体布局和设备用电情况确定。同时,为充分利用活饵投放装置的冗余空间,设计一种隔水密封蓄电池,

将 12 V 锂电池放入与之尺寸规格相匹配的 PVC 管中,用两个 PVC 内堵头加盖封装,并在其中一个堵头中心处打孔穿线,使用带密封圈的金属螺纹堵头拧紧。

4 系统集成设计

4.1 控制系统设计

为实现自动化的综合野化训练工作,设计控制系统,实现对活饵投放装置、监控系统、通信系统等装置或系统的自动运转,同时预留远程手动控制功能,便于变更工作计划。控制系统主要由三个定时开关模块和一个充放电模块构成。通过与定时开关模块相匹配的智能手机应用程序,实现远程手动控制功能。充放电模块选用太阳能充放电控制器,定时开关模块选用 Wi-Fi 四路智能时间控制器。太阳能充放电控制器连接与控制太阳能板、蓄电池、负载三路,具有短路保护、过充保护、过放保护、开路保护、充电过热保护、防反接保护等功能,可以有效保护整体电路的安全与稳定。Wi-Fi 四路智能时间控制器作为电子设备的定时开关,可以通过 Wi-Fi 网络和智能手机应用程序远程设置实现设备开关时间控制功能,具体设置如表 2 所示。

表 2 定时开关模块各路功能简介
Tab. 2 Brief introduction to functions of timing switch module

模块序号	线路序号	功能简介
一号	一路	通信系统通断电
	二路	水下补光灯通断电
	三路	监控系统通断电
	四路	无
二号	一路	电机正转控制
	二路	
	三路	电机反转控制
	四路	
三号	一路	1 号电机启停
	二路	2 号电机启停
	三路	3 号电机启停
	四路	4 号电机启停

3 个定时开关模块各路的功能简介如表 2 所示。二号定时开关模块主要是通过控制电机电路的正负极转换以实现电机的正反转控制,控制原理电路图如图 6 所示。

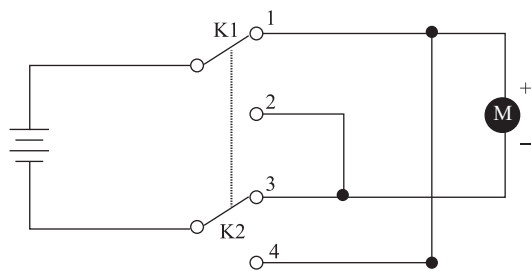


图 6 采用正负极性转换开关构成的简单正反转控制电路

Fig. 6 Simple forward and reverse control circuit composed of positive and negative polarity switch

4.2 通信系统设计

构建通信系统,可以实现装置自动控制的设定、远程手动控制操作、鱼苗行为的实时观测等功能。通信系统的载体是无线通信模块,在此选用移动路由作为无线通信模块。移动路由建立了用户与定时开关模块、录像存储模块之间的无线通信。通过定时开关模块相关智能手机应用程序,可以远程使用定时开关模块以便控制相关设备的启停或正反转控制。移动路由与定时开关模块两者相互作用。移动路由为定时开关模块提供网络通信,定时开关模块控制移动路由的电源通断。

4.3 监控系统设计

在增殖放流鱼苗野化训练过程中,需要对格栅避敌装置、仿岩礁巢穴装置和活饵投放装置进行监控,确认各功能装置运转正常,同时观测鱼苗行为,以便分析野化训练装置的野化效果。监控系统主要由录像存储模块、两个水下摄像头和一个水下补光灯组成。录像存储模块选用网络硬盘录像机。网络硬盘录像机作为远程监控的媒介,采用 POE 传输技术,同时解决了供电和网络问题,其与水下摄像头、通信系统连接,通过与录像存储模块相匹配的智能手机应用程序,用户可以在线观看水下摄像头的实时监控录像。此外,由于供应能源的隔水密封蓄电池额定电压为 12V,采用“12V24V 转 48V3A 升压模块(非隔离)”类型的 DC-DC 直流电源转换器为额定电压为 48V 的网络硬盘录像机供电。

4.4 集成控制中心设计

为实现野化训练装置定时定量投放活饵、实时观测鱼苗行为并录像保存等功能,将定时开关模块、无线通信模块、充放电模块、录像存储模块

集成于防水控制盒中作为集成控制中心,以实现野化训练装置的自主运行,避免人为因素对野化训练工作的干扰。

集成控制中心如图7所示。

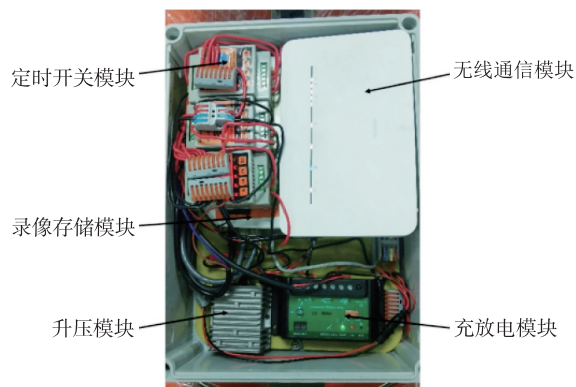


图7 集成控制中心实物图

Fig. 7 Physical drawing of Integrated control center

5 验证试验与效果分析

5.1 模拟生境构建

为了验证野化训练装置的有效性,于2021年夏季在浙江省舟山市西轩渔业科技岛对条石鲷鱼苗开展了野化训练试验。试验水池规格尺寸为5 m×5 m×1.2 m,容积为30 000 L。试验设置两个水池,野化池和对照池。每个水池各投放2 500尾条石鲷鱼苗。野化池投放野化训练装置和4个规格不一的简易封闭辅助格栅,对照池不做任何处理。简易封闭辅助格栅选用绿色2.5 cm正六边形孔丝网和3.3 cm正方形孔加厚2.2 mm聚乙烯平网,不仅可以起到躲避异类的作用,还能达到分级躲避同类大鱼的效果。如图8所示为野化池中的野化训练装置和简易封闭辅助格栅。

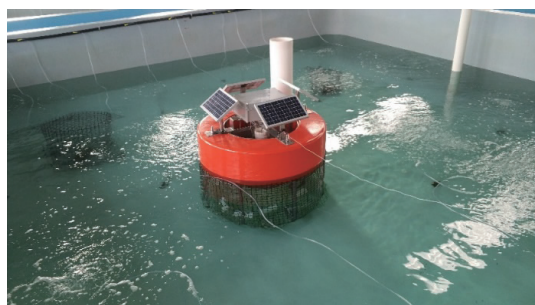


图8 野化池中的野化训练装置和辅助格栅

Fig. 8 Feralization training device and auxiliary grilles in feralization pool

此外,为了更好地观察记录本次试验中野化训练装置的实际效果,在野化池和对照池斜上方分别安装了一台POE球形摄像头并配备了与之相连的网络硬盘录像机用于实时录像。在场地内安装了一台信号放大器用于解决移动网络信号问题。

5.2 野化训练方案

5.2.1 捕食活饵训练方案

根据条石鲷以无脊椎动物或附着于岩礁上的生物为食的特性,初步选择试验场地及其附近较易获取的脊尾白虾作为条石鲷捕食活饵训练用的活饵。

脊尾白虾为热温带海域底栖虾类,对环境适应性广,可在2~38℃的水中生活,最适生存温度为27.0~29.6℃^[32],能够在条件简陋的水池和活饵仓中短期存活,可以作为捕食活饵训练中的活饵。

野化池和对照池每天均投喂4次饵料。野化池每次投放人工饵料时的投喂量与对照池相同。为使训练更加贴近自然状况,并考虑到成本因素,活饵投放没有固定的时间和次数。

5.2.2 躲避敌害训练方案

躲避敌害训练流程图如图9所示。



图9 躲避敌害训练流程图

Fig. 9 Flow chart of enemy avoidance training

黑鲷成鱼来源于近期海钓,水桶暂养环节所用条石鲷均从野化池中随机捞取。

5.3 训练效果与指标分析

5.3.1 捕食活饵训练效果

观察发现,经过15 d的捕食活饵训练,条石

鲷对脊尾白虾从一开始的试探攻击,到群起而攻之,再到“迫不及待”冲进活饵仓抢食,连虾壳都不剩。有时甚至会在仓门没有开启的情况下,透过仓门的小孔,在活饵仓外啄食恰好躺在门孔上的脊尾白虾。

5.3.2 躲避敌害训练效果

在训练初期的水桶暂养环节中,条石鲷与黑鲷之间均存在试探性攻击对方的行为,但双方均没有表面伤痕。到了训练中期的敌害提醒环节,封闭在格栅中的黑鲷与水池中的条石鲷鱼苗互动明显,但最终死亡。捞出并观察该死亡黑鲷,发现其鱼体僵硬且表面多处有伤痕。结合现场观察分析认为封闭格栅限制了黑鲷的活动,而条石鲷以压倒性的群体优势,不断攻击黑鲷,最终导致黑鲷死亡。于是,在训练后期的完全共存环节中,又投放了黑鲷 2 尾。1 d 后黑鲷 1 尾死亡,但另 1 尾表现正常,分析认为前者可能为不适应环境的个体。存活的那一尾黑鲷时常追逐条石鲷鱼群,部分条石鲷能够借助避敌格栅躲避。

5.3.3 基本生长指标对比

鱼苗全长和体质量两个基本生长指标的变化可以在一定程度上体现鱼苗身形的变化。为测定基本生长指标,在野化训练初期和末期各采样一次,两次采样间隔 12 d,每次捞取野化池和对照池鱼苗各 50 尾。鱼苗基本生长指标对比如表 3 所示。

表 3 鱼苗基本生长指标对比

Tab. 3 Comparison of basic growth indicators of fry

序号	平均全长/mm		平均体质量/g	
	野化池	对照池	野化池	对照池
1	46	52	2.49	3.68
2	67	69	6.00	6.17
增长率	45%	32%	41%	68%

分析表 3 中的数据可见,野化池鱼苗相对于对照池鱼苗,全长增长率较高而体质量增长率较低。结合现场观察,野化池鱼苗相对于对照池鱼苗活动次数多、时间长,因此,体长增长快和体质量增长略慢,但生长正常,摄食积极。野化池鱼苗瘦长体型正说明了其较强的活动和摄食能力。

5.3.4 鱼苗死亡情况对比

在试验过程中难免会出现部分鱼苗死亡的现象。

死亡鱼苗的表面特征情况的分类统计如表 4 所示,野化池与对照池鱼苗死亡数量统计如图 10 所示。

表 4 死亡鱼苗的表面特征情况的分类统计

Tab. 4 Classification statistics of surface characteristics of dead fry

死亡鱼苗表面特征类别	野化池数量/尾	对照池数量/尾
完整	33	8
眼缺失、尾缺失或鳃开裂	71	30
鱼体大部分残缺	8	2
鱼体少部分残缺	8	3
头部残缺	2	0

分析表 4 中死亡鱼苗的表面特征情况,发现超过半数的死亡鱼苗为眼缺失、尾缺失和鳃开裂,而野化池中的鱼苗除了眼缺失、尾缺失和鳃开裂外,还有一定数量的死亡鱼苗鱼体残缺,野化池中更有 2 尾死亡鱼苗头部残缺,据此可以推断为受到同伴激烈攻击,显示了存活鱼苗较强的攻击能力和攻击性。

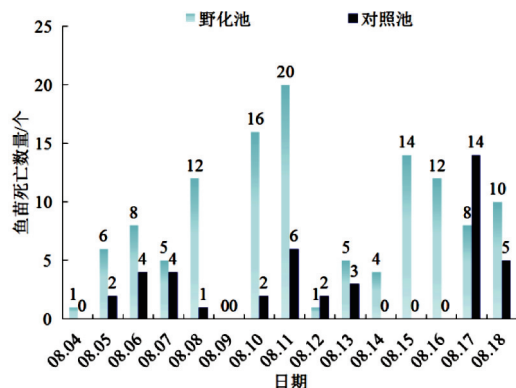


图 10 鱼苗死亡数量统计图

Fig. 10 Statistical chart of number of fry deaths

从图 10 可以看出,除 8 月 9 日和 8 月 17 日以外,几乎每天野化池鱼苗的死亡数量都比对照池要多。对比野化池与对照池鱼苗死亡的数量和表面特征,可以分析出受训鱼苗攻击性强。

6 结论

针对海洋牧场增殖放流苗种的适应性和放流存活率不高的问题,设计了一种增殖放流鱼苗野化训练装置,实现了机动化、自动化的多重野化训练工作。利用野化训练装置针对条石鲷鱼苗开展捕食活饵训练和躲避敌害训练试验。试验表明,

在选定的野化训练模式下,可在一定程度上实现条石鲷鱼苗行为特征的改善,同时验证了增殖放流鱼苗野化训练装置的可行性。□

参考文献

- [1] 张磊,胡庆松,章守宇. 海洋牧场鱼类驯化装置设计与试验[J]. 上海海洋大学学报,2013,22(3):398-403.
- [2] BELL J D,LEBER K M,BLANKENSHIP H L,et al. A new era for restocking, stock enhancement and sea ranching of coastal fisheries resources[J]. Reviews in Fisheries Science,2008,16:1-9.
- [3] LORENZEN K. Understanding and managing enhancements: why fisheries scientists should care[J]. Journal of Fish Biology,2014,85:1807-1829.
- [4] 唐启升. 渔业资源增殖、海洋牧场、增殖渔业及其发展定位[J]. 中国水产,2019(5):28-29.
- [5] 杨红生,章守宇,张秀梅,等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报,2019,43(4):1255-1262.
- [6] SUBOSKI M D,TEMPLETON J J. Life skills training for hatchery fish: social learning and survival[J]. Fisheries Research,1989,7:343-352.
- [7] JACKSON C D,BROWN G E,FLEMING I. Differences in antipredator behaviour between wild and hatchery-reared juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) under seminatural conditions[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2011,68:2157-2166.
- [8] GILLEN A L,STEIN R A,CARLINE R F. Predation by Pellet-Reared Tiger Muskellunge on Minnows and Bluegills in Experimental Systems[J]. Transactions of the American Fisheries Society,1981,110(2):197-209.
- [9] BESNER M,SMITH L S. Modification of swimming mode and stamina in two stocks of coho salmon(*Oncorhynchus kisutch*) by differing levels of long-term continuous exercise[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,1983,40(7):933-939.
- [10] BROWN C,DAVIDSON T, LALAND K. Environmental enrichment and prior experience of live prey improve foraging behaviour in hatchery - reared Atlantic salmon[J]. Journal of Fish Biology,2010,63(S1):187-196.
- [11] OLLA B L,DAVIS M W. The role of learning and stress in predator avoidance of hatchery-reared coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) juveniles[J]. Aquaculture,1989,76(3/4):209-214.
- [12] VILHUNEN S. Repeated antipredator conditioning: a pathway to habituation or to better avoidance? [J]. Journal of Fish Biology,2010,68(1):25-43.
- [13] 邴旭文,徐跑,严小梅. 黄鳝的饵料驯化与网箱养殖技术[J]. 渔业现代化,2003(5):22-24.
- [14] 陈帅,黄洪亮,张国胜,等. 音响驯化对鱼类有效作用范围的研究[J]. 渔业现代化,2013,40(1):36-39.
- [15] JOHNSON J I,BROCKMARK S,NAESLUND J. Environmental effects on behavioural development consequences for fitness of captive-reared fishes in the wild[J]. Journal of Fish Biology,2014,85:1946-1971.
- [16] CÁMARA-RUIZ M,SANTO C E,GESSNER J, et al. How to improve foraging efficiency for restocking measures of juvenile Baltic sturgeon (*Acipenser oxyrinchus*) [J]. Aquaculture,2019,502:12-17.
- [17] BROWN G E,FERRARI M C O,CHIVERS D P. Adaptive forgetting: why predator recognition training might not enhance poststocking survival[J]. Fisheries,2013,38:16-25.
- [18] WATZ J,CALLES O,CARLSSON N, et al. Wood addition in the hatchery and river environments affects post-release performance of overwintering brown trout. Freshwater Biology[J],2019,64,71-80.
- [19] 关长涛,黄滨,林德芳,等. 深水网箱养殖鱼类的分级与起捕技术[J]. 现代渔业信息,2005(7):3-6,13.
- [20] 鲁伟,关长涛,林德芳,等. 网箱养殖鱼类柔性分级系统的试验研究[J]. 海洋水产研究,2004(3):61-67.
- [21] 倪勇,伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京:中国农业出版社,2006:601-602.
- [22] DB33/T 2331—2021 条石鲷增殖放流技术规范[S].
- [23] 沈辉,万夕和,王李宝,等. 3种肉食性鱼类的捕食及脊尾白虾防御行为比较[J]. 水产养殖,2010,31(1):40-42.
- [24] 庄平. 长江口鱼类[M]. 上海:上海科学技术出版社,2006:326-328.
- [25] 李光光,王玉,段健诚,等. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和养殖密度对脊尾白虾生长的影响[J]. 水产科学,2021,40(3):428-433.
- [26] 王军成. 海洋资料浮标原理与工程[M]. 北京:海洋出版社,2013.
- [27] 王军成,厉运周. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用[J]. 山东科学,2019,32(5):1-20.
- [28] 王永超. 近海小型海洋浮标标体基本结构的设计研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [29] 丁宁. 现代纸器包装结构创新性研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2009.
- [30] 韩炜,梁慧,李珍,等. 新型水免疫聚脲混凝土表面防护材料研究[J]. 长江科学院院报,2021,38(11):135-141.
- [31] 吴怀国. 水工混凝土喷涂聚脲弹性体抗冲磨涂层的相关应用技术研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005(1):42-46.
- [32] 马鸿梅,王兴强,曹梅,等. 脊尾白虾养殖研究进展[J]. 现代农业科技,2019(16):171-172,175.

Design and experiment of feralization training device for enhancement and releasing fry

HU Qingsong, WANG Yi, ZU Xilong, CHEN Leilei, LI Jun

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To improve the adaptability and survival rate of enhancement and releasing fry in marine ranching, a feralization training device for enhancement and releasing fry was designed, and the application experiment of the device was carried out with *Oplegnathus fasciatus* as the research object. According to the training needs of enemy avoidance and predating live bait, the body shape differences between the trained fry and the enemy fish were analyzed and the grilles with two apertures of 2.5 cm and 3.3 cm were selected as the enemy avoidance grilles. To reduce the impact on the fry and live bait during the opening and closing of the warehouse door, the movement range of the warehouse door should not be too fast and too large. Set the maximum opening angle of the live bait warehouse door as 45° and the time as 5 min, and select the motor of 0.6 r/min as the driving motor of the warehouse door. The experiment results show that the fry can gradually make full use of the feralization training device to avoid enemies when large fish such as adult *Acanthopagrus schlegelii* were used for enemy avoidance training. And when live bait such as *Exopalaemon carinicauda* was used for predation training, the fry experienced two stages from recognizing food to actively dividing food, and the process of improving predation ability was obvious. Combined with the field observation and through the comparison of basic growth index and fry death situation, it can be analyzed that compared with the control pond fish fry, wild pond fish are active in feeding, lively behavior, and strong aggression. The research showed that the behavior characteristics of *Sparus macrocephalus* fry could be improved to some extent under the selected wild training mode, and the feasibility of the feralization training device for enhancement and releasing fry was verified.

Key words: enhancement and releasing fry; feralization training device; predating live bait; enemy avoidance

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.003

基于麻雀搜索算法优化BP神经网络的深远海养殖平台系统缆力预报研究

许条建¹,金延儒^{1,4},蒋梅荣²,麻常雷³

(1 大连理工大学,海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024;

2 中海油研究总院有限责任公司,北京 100028;

3 国家海洋技术中心,天津 300112;

4 中交四航工程研究院,广东 广州 510230)

摘要:随着海上养殖走向深远海,海洋养殖装备将面临更加恶劣的海况,为了保证装备的安全,必须对其锚泊系统的安全进行评估。采用传统水动力计算分析的方法,能够获得准确的锚泊系统张力,但是计算时间要求很长。为了快速的获取恶劣海况下养殖平台锚泊系统的张力分布,本研究基于机器学习的方法构建了养殖平台锚泊系统缆力预报评估的计算模型(SSA-BP模型),该模型引入了麻雀搜索算法对BP神经网络的权值和阈值进行优化,改善了模型的预报性能。该模型将规则波波高、周期、流速作为模型输入指标,将系泊缆力作为模型输出指标,进行BP预报模型的训练。用麻雀搜索算法对BP模型进行优化并训练(SSA-BP模型),并针对改进后的SSA-BP模型预报结果与传统的BP模型预报结果进行对比。经过对比分析发现,SSA-BP模型整体的各项指标均低于BP模型,且SSA-BP模型各工况系统缆力的预报误差也均低于BP模型并更贴近真实值。研究表明,该SSA-BP模型能够给出更加准确的预报结果。

关键词:深远海养殖平台;系统缆力;BP神经网络;麻雀搜索算法;快速预报

中图分类号:S954.1+3

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0017-010

近年来,水产养殖由近海逐步走向深远海。相较于近海养殖,深远海养殖拥有开阔的养殖环境,有利于降低鱼病的发生概率,提高养殖水产品品质。深远海养殖平台作为深远海养殖的重要生产设施,也是中国先进装备制造的体现^[1]。然而,深远海养殖平台要面临更加恶劣的海洋环境。深远海养殖平台的系泊系统是对抗台风等极端海洋环境荷载的最重要的基础,如果系泊系统遭到破坏,意味着整个平台失效,对养殖户而言是一场巨大的灾难^[2]。因此,极端恶劣海况下深远海养殖平台的系统缆力的高效、快速预报,是实现中国深远海养殖产业健康发展的必然选择。

关于深远海养殖平台的水动力特性研究方面,许条建^[3]采用集中质量法和刚体运动学原理,对组合式网箱及其系泊系统在波浪、海流作用下的水动力特性开展了研究,其数值模型是开展本研究的重要基础。Li等^[4]研究了不规则波浪

下深远海船型浮式养殖平台的运动响应。李玉成等^[5]分析了深远海养殖平台中网衣在不同变形状态下水阻力系数。唐鸣夫等^[6]分析了不同养殖密度下养殖网箱周围的流场变化以及网衣的变形。

近年来,基于人工智能的深度学习方法已经在海洋工程动力响应和安全评估方面得到了广泛应用。陈海等^[7]利用人工神经网络监测半潜式平台模型在风、浪、流联合作用下的运动响应。漆徐良^[8]通过人工神经网络完成FPSO系统缆力的实时预测分析,对各类海况下FPSO的系统缆力和运动响应进行实时监测。陈磊^[9]使用BP神经网络(Error Back Propagation)对海洋平台桩基的轴向承载力进行分析和预报。刘浩然^[10]使用BP神经网络对深远海钛合金结构进行健康诊断。夏天亮等^[11]引入BAS-BP神经网络对南海北部海域的波浪要素进行预报。王维^[12]将机器学习应用于

收稿日期:2022-01-18

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51979037);中央高校基本科研业务费(DUT21LK30)

作者简介:许条建(1983—),男,副教授,博士,研究方向:海洋网箱养殖设施水动力特性研究。E-mail:tjxu@dlut.edu.cn

通信作者:金延儒(1997—),男,硕士研究生,研究方向:深远海养殖平台水动力分析以及其预报与检测。E-mail:769474265@qq.com

海底管道的损伤识别监测研究。李志鑫等^[13]使用机器学习实现适用于各种水文条件下孤立波振幅的分析。周世博等^[14]采用机器学习进行海洋平台受坠物碰撞的损伤分析。张鹏辉^[15]和李海涛等^[16]均针对船舶与海洋工程常见的材料腐蚀速率采用机器学习进行预测分析。高明星等^[17]针对 FPSO 舷侧结构的耐装性能使用机器学习进行优化设计。虽然 BP 神经网络等机器学习方法已经可以完成监测和预报工作,但是人们始终还在追求预报精准度和效率的道路上不断探索。

本研究引入麻雀搜索算法,对 BP 神经网络的权值和阈值进行优化调整,改善 BP 神经网络自身容易收敛到局部最小点的缺陷,提高深远海养殖平台系缆力快速预报模型的性能。

1 深远海养殖平台预报模型分析方法

1.1 养殖平台动力响应数值模型

深远海养殖平台主要包含浮架、网衣和锚绳等构件。其中,浮架为刚性构件,采用刚体动力学建立其运动微分方程^[18];对于网衣和锚绳这类柔性构件,采用集中质量法,将集中质量点作为节点、无重量的弹簧作为单元来模拟网衣^[19-20]和锚绳^[21-23],分别建立其运动微分方程;最后采用四阶 Runge-Kutta 法联立求解深远海养殖平台及其系泊系统的运动微分方程。

无论刚性构件还是柔性构件,运动微分方程都要基于牛顿第二定律进行建立,将结构运动与荷载联系起来。对于深远海养殖平台,重力、浮力和水动力(包括波浪力和流荷载等)等荷载是深远海养殖平台主要考虑的荷载类型。其中,对于波浪力,由于结构杆件都为圆管形式,直径均远小于波长,故选用 Brebbia 和 Walker^[24]提出的修正的 Morison 方程来计算波浪力:

$$\vec{F} = 0.5C_D\rho_w A |\vec{u} - \vec{U}| \cdot (\vec{u} - \vec{U}) + \rho V_0 \ddot{\vec{u}} + C_m \rho V_0 (\ddot{\vec{u}} - \ddot{\vec{U}}) \quad (1)$$

式中: \vec{F} 为波浪力, kN; \vec{u} 为水质点速度, m/s; \vec{U} 为单位长度构件的速度, m/s; $\ddot{\vec{u}}$ 为水质点的加速度分量, m/s²; $\ddot{\vec{U}}$ 为单位长度构件的加速度, m/s²; ρ 为水的密度, kg/m³; V_0 为结构单元的排水体积, m³; A 为单位长度结构水下部分的投影面积, m²;

C_D 和 C_m 分别为拖曳力系数和附加质量力系数。其中,浮架、网衣和锚绳的 C_D 和 C_m 分别依据李玉成^[25]、Choo 等^[26]以及 Webster^[27]的建议选取,详见表 1。

对于流荷载使用如下公式:

$$\vec{F}_c = 0.5C_D\rho\vec{V}^2 A_c \quad (2)$$

式中: \vec{F}_c 为水流作用力, kN; \vec{V} 为海洋里水流的流速, m/s; A_c 为与水流方向垂直的单位长度结构的投影面积, m²。

通过数值模型的建立和求解,获得各种工况下的系缆力,并建立样本集,进行后续预报模型的构建。

表 1 深远海养殖平台各构件水动力系数
Tab. 1 Hydrodynamic coefficients of components of deep-sea aquaculture platform

结构构件	C_D	C_m
浮架	0.65	1.3
网衣	1.12	2.0
系泊缆绳	0.6	1.0

1.2 BP 神经网络

BP 神经网络由输入层、隐藏层和输出层构成,层与层之间全连接,同一层之间的神经元无连接。如图 1 所示,在 BP 网络中,数据经归一化处理后,从输入层开始,经隐藏层之后逐层向后传播至输出层;训练连接权值时,会从输出层开始,经过隐藏层向前修正网络的连接权值;循环重复上述过程进行权值与输出层数据的迭代。经多次迭代达到标准后,输出的数据进行反归一化得到最终的结果^[28]。

BP 神经网络算法由式(3)~式(6)确定。

$$y_j = f(X_j + b_j) \quad (3)$$

$$Z_k = f(Y_k + b_j) \quad (4)$$

$$X_j = \sum_{i=1}^I w_{ij} x_i \quad (5)$$

$$Y_k = \sum_{j=1}^J w_{jk} y_j \quad (6)$$

式中:训练数据中 x 作为输入, z 作为输出,输入神经元个数为 I ,隐藏神经元个数为 J ,输出神经元个数为 K 的一个三层前馈神经网络。其中 y 为隐藏层,隐藏层第 j 个神经元的阈值用 b_j 表示,输出层第 k 个神经元的阈值用 b_k 表示,输入层第 i 个神经

元与隐藏层第 j 个神经元之间的连接权值用 w_{ij} 表示,隐藏层第 j 个神经元与隐藏层第 k 个神经元之间的连接权值用 w_{jk} 表示,隐藏层的输入用 X_j 表示,输出层的输入用 Y_k 表示。 f 为转换函数,隐藏层的计算结果为 y_j ,输出层输出结果为 Z_k 。

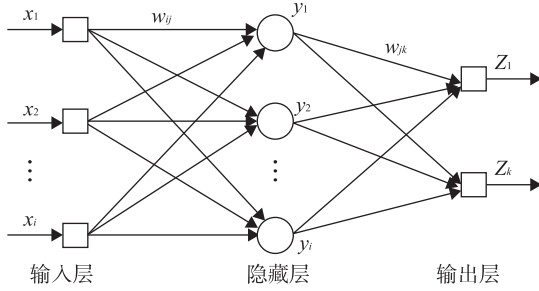


图1 BP神经网络结构图

Fig. 1 Structure diagram of BP neural network

在BP神经网络中,如果神经网络输出结果 z_k 与训练数据的输出 z_k 差别过大,会进行误差的反向传递,采用梯度下降法将误差按权重逐层分配并迭代计算连接权值。

然而,BP神经网络的问题也很明显,其中最为关注的是受权值和阈值影响误差而产生的局部极小问题。因为梯度下降法是沿着负梯度方向寻找最优解,当误差与权值和阈值相关的函数找到梯度为0的点,则已经达到局部最小点,权值的迭代将停止。如果该网络的误差函数具有多个局部最小点,则不能保证最终确定的权值为最优的^[29]。因此,需要对权值和阈值进行优化调整,

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{x_{\text{worst}}(t) - x_{ij}(t)}{t^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ x_{\text{bestj}}(t+1) + |x_{ij}(t) - x_{\text{bestj}}(t+1)| \cdot A^+ \cdot L, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x_{\text{worst}}(t)$ 表示当前全局最差位置; $x_{ij}(t)$ 表示发现者占据的最佳位置; $A^+ = A^T(A^{AT})^{-1}$, A 表示一个内部元素随机分配1或-1的 $1 \times d$ 矩阵, A^T 为 A 的转置。

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} x_{\text{bestj}}(t) + \beta |x_{i,j}(t) - x_{\text{bestj}}(t)|, & f_i > f_g \\ x_{i,j}(t) + K \left(\frac{|x_{i,j}(t) - x_{\text{worstj}}(t)|}{(f_i - f_w) + e} \right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_{\text{bestj}}(t)$ 表示当前全局最佳位置; β 为服从均值为0、方差为1的正态分布随机数的步长控制

并观察误差情况。

1.3 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm,后面简称SSA)是Xue等^[30]受到麻雀觅食以及反捕食行为所提出来的,该算法依据麻雀捕食的仿生学原理提出来的。SSA算法中,麻雀种群包含发现者、加入者和侦察者。发现者由于适应度较高,可引导并提供给加入者觅食区域和方向;加入者为了获取更好的食物,会一直跟随发现者,并监视发现者,为保证捕食率甚至会争夺食物;当侦察者发现捕食者后立即发出警报,麻雀种群集体做出反捕食行为。

发现者的位置更新如下:

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} x_{i,j}(t) \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot T}\right), & r_2 < ST \\ x_{i,j}(t) + Q \cdot L, & r_2 \geq ST \end{cases} \quad (7)$$

式中: t 表示当前迭代次数; T 表示最大迭代次数; $x_{i,j}(t)$ 表示第 i 只麻雀在第 j 维迭代次数为 t 时的位置信息值; α 为 $[0,1]$ 的随机数; r_2 ($r_2 \in [0,1]$) 表示预警值; ST ($ST \in [0.5,1]$) 表示安全值; Q 为服从正态分布的随机数; L 表示一个 $1 \times d$ 的矩阵,其中内部每个元素都为1。

当 $R_2 < ST$ 时,表示周围没有捕食者,发现者可以进行大规模搜索;当 $R_2 \geq ST$ 时,侦察者发现捕食者,立即发出报警信号,所有麻雀迅速飞到其他安全区域。

加入者的位置更新如下:

当 $i > n/2$ 时,表示适应度值较差的第 i 只加入者处于饥饿状态,它需要飞往其他方向寻找食物。侦察者一般占种群的10%到20%,位置更新公式如下:

参数; $K \in [-1,1]$ 表示麻雀运动方向,也是步长控制参数; f_i 表示当前麻雀的适应度值; f_g 和 f_w ,

分别表示当前全局最优值和最差值; e 为一个常数,是为了避免分母为 0。

当 $f_i > f_g$ 时,表示麻雀处于种群的边缘地段,易受到捕食者攻击,当 $f_i = f_g$ 时,表示处于种群中间位置的麻雀意识到危险,因此需要靠近其他麻雀来减少被捕食的概率。

1.4 算法流程

基于麻雀搜索算法改进的神经网络算法(后面简称 SSA-BP 模型)对深远海养殖平台系缆力预报模型的具体建立过程如下:

步骤 1:首先将数值模型的计算结果整合成样本集,同时按照训练集:测试集 = 5:1 的比例随机划分为两组数据,之后对训练全体数据以及测试集的输入指标数据进行归一化处理。

步骤 2:完成 BP 神经网络初始化,包括隐含层层数、隐含层的节点个数、层与层之间的传递函数等。

步骤 3:输出 BP 神经网络预报结果,并在反归一化后依据评估指标进行后续评估。

步骤 4:完成麻雀搜索算法中麻雀种群相关参数初始化。

步骤 5:确定每只麻雀的初始位置。

步骤 6:依据公式(7)~(9),分别更新每只麻雀的位置。

步骤 7:输出最优的麻雀个体位置,并将其作为 BP 神经网络各层之间的权值;同时输出全局最优解,将其作为 BP 神经网络各层的阈值;完成 BP 神经网络各参数的优化。

步骤 8:使用优化后的 BP 神经网络进行训练,并比较各项评估指标。如果满足误差指标,便可以结束计算,输出对应的结果;否则,重新从步骤 4 开始执行。

整个算法流程见图 2。

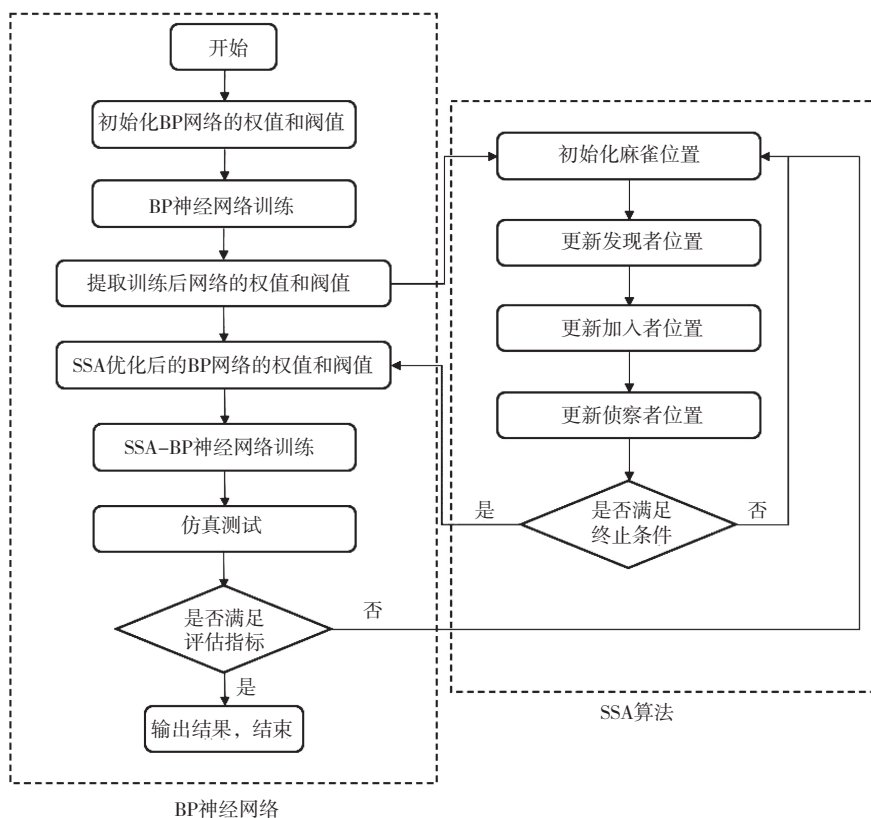


图 2 SSA-BP 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of SSA-BP algorithm

1.5 评估指标

预报模型整体的评估指标主要选取平均绝对误差 MAE、平均绝对百分比误差 MAPE 以及均方

根误差 RMSE 作为主要,其计算公式见(10)~(12)。其中,平均绝对百分比误差 MAPE 是本研究重点关注的评估指标,其评估标准见表 2。这 3

个评估指标的数值越小,模型越精确。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{\text{forecast}} - y_{\text{true}}| \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_{\text{forecast}} - y_{\text{true}}}{y_{\text{true}}} \right| \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{\text{forecast}} - y_{\text{true}})^2} \quad (12)$$

式中: y_{forecast} 表示系缆力的预测值,kN; y_{true} 表示系缆力的真实值,kN。

对于系缆力预报值的评估指标,主要是依据绝对误差、相对误差以及相关性等进行分析。

表2 模型预测精度评估标准

Tab. 2 Model prediction accuracy evaluation criteria

平均绝对百分比误差	预测模型评价
0%~10%	好
10%~20%	良好
20%~30%	一般
大于30%	差

2 深远海养殖平台系泊缆力快速预报实例分析

2.1 深远海养殖平台模型

如图3所示,对该深远海养殖平台系缆力进行预报分析。

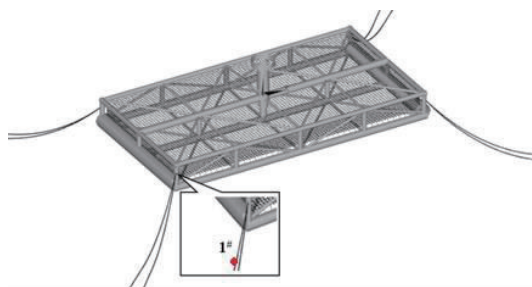


图3 深远海养殖平台及其系泊系统

Fig. 3 Deep sea aquaculture platform and its mooring system

该养殖平台的主尺度如表3所示,锚链参数见表4。

表3 养殖平台主尺度

Tab. 3 Main dimensions of breeding platform

名称/m	数值	名称/m	数值
网箱长度	120	网箱宽度	56
网箱最大高度	26	网箱本体高度	12.5
正常作业工况吃水	11.5	台风自存工况吃水	17.5

表4 系泊锚链参数

Tab. 4 Mooring chain parameters

锚链参数	数值
长度/m	300(AM3船用锚链)
数量/根	8
角度/(°)	42.5, 47.5
公称链径/mm	97, 92
线密度/(kg/m)	206.06, 185.36
破断荷载/kN	6 826.5, 6 204.1
安全系数	1.67
许用荷载/kN	5 181.5

以图3中1#缆绳的锚绳力预报为例。该模型共有13 525个单元,平均一个算例计算100 s需要的时间为1 d。

根据所选的深远海养殖平台的工程实际位置的水文资料,数值模拟的水深为22 m,波浪和水流的方向均为45°方向(图4)。

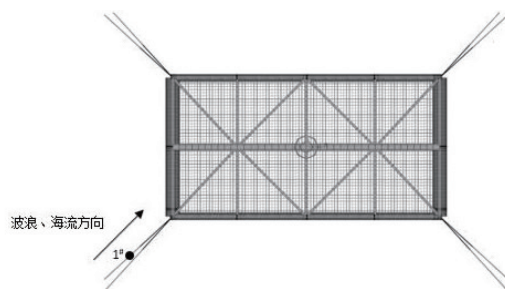


图4 深远海养殖平台俯视图以及波浪、海流方向

Fig. 4 Top view of deep-sea aquaculture platform and direction of wave and current

对于训练样本的构建,依据该平台所在地的水文资料选取。波高分别为5 m、6 m、7 m、8 m、9 m和10 m。周期分别为8 s、10 s和12 s。流速分别为0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s、0.8 m/s和1 m/s。将波高、周期和流速任意组合成工况计算其对应的系缆力,共90组工况。

选出15组工况作为测试集验证网络准确性,也代表已有环境要素下任意组合之后工况的准确性(测试集工况见表5)。

除此之外,额外计算15组在样本范围内的任意工况作为检验集,观察其工程实际应用情况(检验集工况见表6)。

表 5 测试集样本表

Tab. 5 Test set sample table

工况编号	流速/(m/s)	波高/m	周期/s	1#缆绳系缆力/kN
1	0.2	10	10	1 981.12
2	0.2	9	10	1 633.26
3	0.4	5	12	2 552.48
4	0.4	6	12	3 028.30
5	0.4	8	10	2 689.87
6	0.6	5	8	2 385.90
7	0.6	6	10	2 088.47
8	0.6	8	8	3 040.17
9	0.6	10	10	3 448.59
10	0.8	7	12	4 356.30
11	0.8	9	8	4 023.01
12	0.8	10	8	4 570.86
13	1	6	12	4 626.06
14	1	8	8	4 781.56
15	1	9	10	5 163.37

表 6 检验集样本表

Tab. 6 Inspection set sample table

工况编号	流速/(m/s)	波高/m	周期/s	1#缆绳系缆力/kN
1	0.65	8.83	10.8	4 562.00
2	0.68	9.2	11.3	5 070.10
3	1	8.61	11.64	5 125.00
4	0.8	7.96	10.05	4 588.70
5	0.38	5.52	8.13	1 343.10
6	0.53	5.14	9.58	2 202.30
7	0.77	6.54	10.51	3 102.90
8	0.91	7.3	8.43	4 582.10
9	0.2	5.5	10	697.40
10	1	8.7	12	6 213.90
11	0.41	5.48	8.36	1 554.10
12	0.30	9.75	9.95	2 708.80
13	0.49	7.86	10.52	3 265.40
14	0.54	8.92	11.08	3 469.70
15	0.72	6.26	8.91	3 276.20

2.2 预报模型参数选定

对于 BP 神经网络,分别要确定训练次数、学习率、训练目标最小误差、输入层、输出层、结构层数、隐藏层等参数。本 BP 神经网络模型的训练次数为 1 000 次,学习率为 0.01,训练目标最小误差为 0.000 001。输入层为 3 个节点,输出层为 1 个节点。依据本计算模型实例数据库容量并不冗余,故按照广泛应用的 1 个隐藏层。隐藏层节点数依据公式(13)确定范围,并通过训练神经网络之后确定。通过表 7 计算结果可知,隐藏层节点

个数为 5 时的均方误差最小,故设置 5 个隐藏层节点。关于权函数,本研究经多次训练,将输入层到隐藏层的转换函数确定为 tansig 函数,将隐藏层到输出层的转换函数确定为 purelin 函数

$$l = \sqrt{m + n} + \alpha \quad (13)$$

式中: l 是隐含层的神经元个数, m 是输入层节点个数, n 是输出层节点个数, α 是常数, $\alpha \in [0, 10]$ 。

对于麻雀搜索算法,初始种群规模为 30;最大进化代数为 50;安全值 ST 为 0.6;发现者比例 PD 为 0.2;负责侦查的麻雀比例 SD 为 0.2。

表 7 隐藏层节点均方误差表

Tab. 7 Hidden layer node mean square error table

隐藏层节点数	均方误差
3	0.010 253
4	0.012 474
5	0.005 910
6	0.011 001
7	0.012 574
8	0.006 899
9	0.006 946
10	0.007 887
11	0.007 968
12	0.007 633

注:该结果为模型未进行反归一化的结果,便于更快速选取隐藏层结点数

2.3 测试集结果分析

为了验证该深远海养殖平台系缆力的预测效果,对比了测试集 BP 模型和 SSA-BP 模型的计算结果。从图 5 中可以得知,SSA-BP 模型预报系缆力更贴近系缆力真实值,仿真测试曲线与真实值曲线拟合程度也比较高。

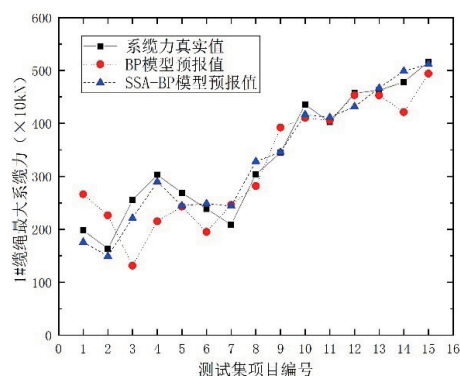


图 5 系缆力真实值与各模型预测值对比图

Fig. 5 Comparison between the real value of mooring force and the predicted value of each model

对于系缆力预报的模型整体分析情况可通过表8进行定量分析。首先,SSA-BP模型的MAPE为6.27%,根据表2的评估标准,其模型评价为好,而BP的评价为良好;SSA-BP模型的MAE也小于BP模型,表示其误差也更小,说明SSA-BP模型预报的更精密;比较RMSE可以得知,SSA-BP模型预报系缆力的离散程度更小,受异常值影响程度也更小。综合来看,MAPE、MAE和RMSE这三项指标表现最好的模型均指向SSA-BP模型。

表8 模型整体评估指标对比表

Tab. 8 Comparison of overall evaluation indicators of the model

模型	RMSE	MAE	MAPE
BP	533.98	426.65	16.19%
SSA-BP	201.54	173.98	6.27%

对比各工况下的系缆力值预测,从表9以及图6可知,SSA-BP模型预报系缆力的相对误差

值全面低于BP模型。不仅如此,在SSA-BP模型的预报下,相对误差低于10%的样本数目增加71.4%。综上,通过预报模型进行预报只需2 min左右就会给出预报结果,且误差减小也反映出SSA算法解决了BP模型自身易陷入局部极小而影响预报精度的问题。

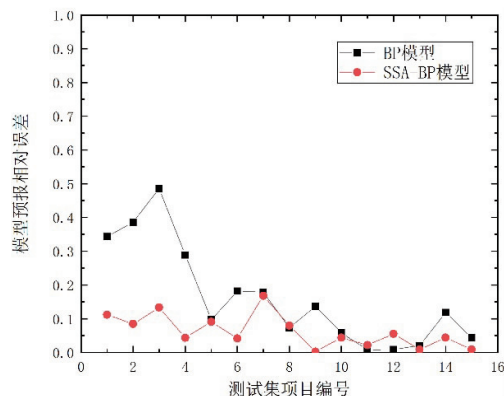


图6 各测试样本预测相对误差对比图

Fig. 6 Prediction relative error diagram of each test sample

表9 测试集样本预测值以及误差对照表

Tab. 9 Test set sample predicted value and error comparison table

工况编号	真实值/kN	预测值/kN		绝对误差/kN		相对误差	
		BP	SSA-BP	BP	SSA-BP	BP	SSA-BP
1	1 981.19	2 660.48	1 758.94	679.30	-222.25	34%	11%
2	1 633.26	2 263.71	1 494.85	630.44	-138.42	39%	8%
3	2 552.48	1 312.80	2 212.30	-1239.69	-340.19	49%	13%
4	3 028.30	2 153.45	2 896.74	-874.85	-131.56	29%	4%
5	2 689.87	2 428.03	2 445.10	-261.84	-244.77	10%	9%
6	2 385.90	1 952.63	2 484.94	-433.28	99.03	18%	4%
7	2 088.47	2 462.24	2 439.45	373.77	350.98	18%	17%
8	3 040.17	2 816.69	3 282.68	-223.47	242.51	7%	8%
9	3 448.59	3 921.10	3 458.63	472.51	10.04	14%	0%
10	4 356.30	4 104.47	4 164.18	-251.82	-192.12	6%	4%
11	4 023.01	4 056.28	4 111.46	33.27	88.45	1%	2%
12	4 570.86	4 530.86	4 318.38	-40.00	-252.48	1%	6%
13	4 626.06	4 530.55	4 666.42	-95.51	40.36	2%	1%
14	4 781.56	4 214.13	4 990.63	-567.44	209.07	12%	4%
15	5 163.37	4 940.78	5 115.91	-222.59	-47.46	4%	1%

2.4 检验集结果分析

对任意工况进行系缆力预报模型的分析,以代表实际工况下的预报效果,对比了检验集BP模型和SSA-BP模型的计算结果。从图8中可以得知,SSA-BP模型预报系缆力更贴近系缆力真实值,仿真测试曲线与真实值曲线拟合程度也比较高。

对于系缆力预报的模型整体分析情况可通过

表10进行定量分析。首先,SSA-BP模型的MAPE为6.87%,根据表2的评估标准,其模型评价为好,而BP的评价为良好;SSA-BP模型的MAE也小于BP模型,表示其误差也更小,说明SSA-BP模型预报的更精密;比较RMSE可以得知,SSA-BP模型预报系缆力的离散程度更小,受异常值影响程度也更小。

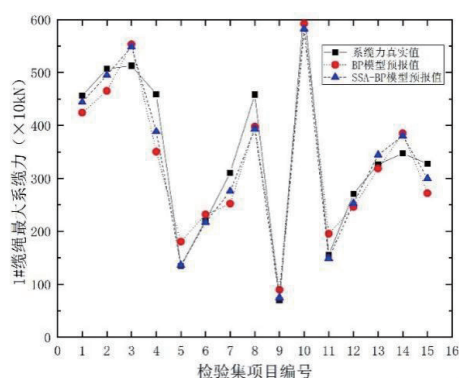


图7 系缆力真实值与各模型预测值对比图

Fig. 7 Comparison between the real value of mooring force and the predicted value of each model

综合来看,MAPE、MAE 和 RMSE 这三项指标表现最好的模型均指向 SSA-BP 模型。且与测试集相比,MAPE 相差不大,意味着对于该深远海养殖平台而言,不用局限于样本已有工况,对于模型范围内的任意工况均适用。

表 10 模型整体评估指标对比表

Tab. 10 Comparison of overall evaluation indicators of the model

模型	RMSE	MAE	MAPE
BP	473.72	410.58	14.49%
SSA-BP	327.58	254.91	6.87%

对比各工况下的系缆力值预测,从图 8 以及表 11 可知,SSA-BP 模型预报系缆力的相对误差值全面低于 BP 模型。其中,5 号工况系缆力预报值相对误差由 BP 模型的 34.56% 经 SSA 算法优化后下降到 1.33%。

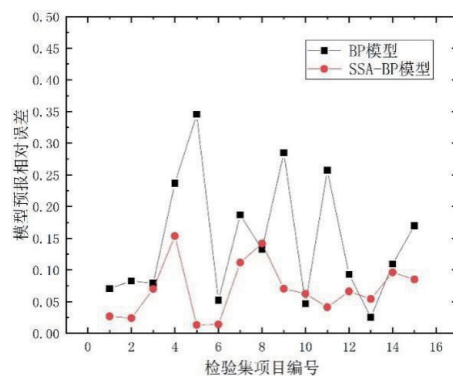


图8 各测试样本预测相对误差对比图

Fig. 8 Prediction relative error diagram of each test sample

综上均可以看出,将 BP 模型的权值和阈值经过 SSA 算法优化后,误差大幅度降低,解决了其自身陷入局部极小而影响预报精度。整个过程获取结果相较数模较快,只需 2 min 左右便可快速获得较为精确的结果。

表 11 检验集样本预测值以及误差对照表

Tab. 11 Inspection set sample predicted value and error comparison table

工况编号	真实值/kN	预测值/kN		绝对误差/kN		相对误差	
		BP	SSA-BP	BP	SSA-BP	BP	SSA-BP
1	4 562	4 239.838	4 440.227	-322.162	-121.773	7.06%	2.67%
2	5 070.1	4 650.414	4 948.473	-419.686	-121.627	8.28%	2.40%
3	5 125	5 529.453	5 484.73	404.452 6	359.730	7.89%	7.02%
4	4 588.7	3 502.071	3 883.683	-1 086.63	-705.017	23.68%	15.36%
5	1 343.1	1 807.281	1 360.958	464.181 4	17.858	34.56%	1.33%
6	2 202.3	2 317.231	2 171.433	114.931 1	-30.867 3	5.22%	1.40%
7	3 102.9	2 523.571	2 756.359	-579.329	-346.541	18.67%	11.17%
8	4 582.1	3 973.871	3 932.327	-608.229	-649.773	13.27%	14.18%
9	697.4	896.255 1	746.440 8	198.855 1	49.041	28.51%	7.03%
10	6 213.9	5 923.721	5 825.576	-290.179	-388.324	4.67%	6.25%
11	1 554.1	1 954.038	1 490.053	399.938 4	-64.047 2	25.73%	4.12%
12	2 708.8	2 457.067	2 529.386	-251.733	-179.414	9.29%	6.62%
13	3 265.4	3 182.946	3 442.553	-82.453 8	177.152 7	2.53%	5.43%
14	3 469.7	3 848.775	3 803.647	379.075 1	333.947 4	10.93%	9.62%
15	3 276.2	2 719.334	2 997.621	-556.866	-278.579	17.00%	8.50%

3 总结

深远海养殖平台的系缆力预报模型整体评价为好,相较于传统数模计算速度快,对样本范围内任意工况均适用,能够对深远海养殖平台的系缆力预报有较好的实用性和准确性。通过使用SSA-BP模型,解决BP神经网络权值和阈值的优化,提高模型精准度。后续可以通过增加样本、改变权函数以及算法等来更加精确地进行预报,也可以研究更多荷载作用下深远海养殖平台的运动响应和结构强度、缆绳疲劳等实时预报等内容,为将来针对深远海养殖平台的预报与监测等研究和应用提供了新的思路和途径。□

参考文献

- [1] 纪毓昭,王志勇.我国深远海养殖装备发展现状及趋势分析[J].船舶工程,2020,42(增刊2):1-4.
- [2] 叶婷,张海,张天义,等.深海养殖存在的问题及对策研究[J].农业技术与装备,2020(11):134-135.
- [3] 许条建.离岸组合式网箱水动力特征研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [4] LI L,JIANG Z Y,MUK CHEN ONG,et al. Numerical analysis of a vessel-shaped offshore fish farm [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2018,140(4):041201.
- [5] 李玉成,桂福坤.平面有结节和无结节网目试验及水阻力系数的选择[J].中国海洋平台,2005,20(6):11-17.
- [6] TANG M F,XU T J,DONG G H,et al. Numerical simulation of the effects of fish behavior on flow dynamics around net cage [J]. Applied Ocean Research,2017,64:258-280.
- [7] 陈海,李志刚,冯加果.基于深度置信神经网络的半潜式平台浮体运动模型和响应预测研究[J].船舶力学,2021,25(5):586-597.
- [8] 漆徐良.系泊系统动态响应实时预测的LSTM神经网络方法[D].大连:大连理工大学,2019.
- [9] 陈磊.BP神经网络在海洋平台桩基轴向承载力中的应用研究[J].海洋技术学报,2019,38(3):85-91.
- [10] 刘浩然.深海装备大型钛合金结构健康监测方法研究[D].镇江:江苏科技大学,2020.
- [11] 夏天亮,李醒飞,杨少波.基于BAS-BP模型的南海北部波高预测[J].海洋湖沼通报,2021,43(5):9-16.
- [12] 王维.基于深度学习的海底管道损伤识别技术[D].天津:天津大学,2019.
- [13] 李志鑫,王晶,张猛.基于机器学习的内孤立波波要素关系研究[J].海洋科学,2021,45(5):113-120.
- [14] 周世博,章文俊,李泽华,等.基于SAPSO-BP网络模型的海洋平台落物碰撞损伤分析[J].中国安全生产科学技术,2019,15(2):64-69.
- [15] 张彭辉,赵建仓,丁康康,等.GA-BP神经网络在铜合金海洋腐蚀预测中的应用[J].装备环境工程,2021,18(12):73-78.
- [16] 李海涛,袁森.基于遗传算法和BP神经网络的海洋工程材料腐蚀预测研究[J].海洋科学,2020,44(10):33-38.
- [17] 高明星,刘刚,黄一.基于改进BP-GA方法的FPSO舷侧结构耐撞性能优化设计[J].船舶工程,2019,1(41):28-33.
- [18] BHATT R B,DUKKIPATI R V. Advanced dynamics [M]. UK: Alpha Science International, Ltd., 2001:213-219.
- [19] THÉRET F. Etude de l'équilibre de surfaces reticulées placées dans un courant uniforme (Application aux chalets) [D]. Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, 1993.
- [20] 毕春伟.海上养殖网箱内部及周围流场特性研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [21] HOU H M, DONG G H, XU T J, et al. System reliability evaluation of mooring system for fish cage under ultimate limit state [J]. Ocean Engineering, 2019, 172: 422-433.
- [22] HOU H M, DONG G H, XU T J, et al. Time-dependent reliability analysis of mooring lines for fish cage [J]. Aquacultural Engineering, 2017, 77: 42-52.
- [23] 范会渠.弹性悬链线方程参数变换法及其工程应用[J].力学与实践,2010,32(2):32-34.
- [24] BREBBIA C A, WALLKER S. Dynamic analysis of offshore structures [M]. UK: Newnes-Butterworths, 1979: 109-143.
- [25] LI Y C, GUI F K, TENG B. Hydrodynamic behavior of a straight floating pipe under wave conditions [J]. Ocean Engineering, 2007, 34(3/4): 552-559.
- [26] CHOO Y I, CASARELLA M J. Hydrodynamic resistance of towed cables [J]. Journal of Hydraulics, 1971, 5(4): 126-131.
- [27] WEBSTER R L. An application of the finite element method to the determination of nonlinear static and dynamic responses of underwater cable structures [R]. In: General Electric Technical Information Series Report R76Emh2, Syracuse, New York, 1976.
- [28] 邱锡鹏.神经网络与深度学习[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [29] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社,2016.
- [30] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.

Prediction model of mooring force of deep-sea aquaculture platform based on sparrow search algorithm optimized BP neural network

XU Tiaojian¹, JIN Yanru¹, JIANG Meirong², MA Changlei³

(1 *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024, Liaoning, China;*

2 *CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100028, China;*

3 *National Ocean Technology Center, Tianjin, 300112, China;*

4 *CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou, 510230, Guangdong, China)*

Abstract: With the development of mariculture moving to the deep sea, mariculture equipment will face worse sea conditions. To ensure the safety of the equipment, it is necessary to evaluate the safety of its anchoring system. Using the traditional hydrodynamic calculation and analysis method, the accurate mooring system tension can be obtained, but the calculation time is very long. To quickly obtain the tension distribution of the mooring system of the aquaculture platform under bad sea conditions, a calculation model for the prediction and evaluation of the mooring force of the aquaculture platform (ssa-bp model) is constructed based on the machine learning method. The sparrow search algorithm is introduced into the model to optimize the weight and threshold of the BP neural network, which improves the prediction performance of the model. The model takes the regular wave height, period, and velocity as the model input index and the mooring line force as the model output index to train the BP prediction model. The sparrow search algorithm is used to optimize and train the BP model (ssa-bp model), and the prediction results of the improved ssa-bp model are compared with those of the traditional BP model. Through comparative analysis, it is found that the overall indicators of ssa-bp model are lower than the BP model, and the prediction error of the mooring force of ssa-bp model under various working conditions is also lower than the BP model and closer to the real value. Finally, it is concluded that the new ssa-bp model can give more accurate prediction results.

Key words: deep sea aquaculture platform; mooring force; BP neural network; sparrow search algorithm; fast forecast

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.004

组合钢架式网箱水动力性能分析

张婧,孙立文,周游,施兴华

(江苏科技大学,船舶与海洋工程学院,江苏 镇江 212028)

摘要:为扩大钢架式网箱的养殖空间,提出了一种在钢架式网箱基础上铰接外网箱的组合钢架式网箱。利用海洋工程水动力软件 OrcaFlex 对其进行水动力性能分析。对比分析在纯流、纯波浪及波流联合工况下,组合钢架式网箱和铰接前钢架式网箱的浮架与网衣连接点的有效张力,网箱容积剩余率和锚绳力,以及组合钢架式网箱的铰链系统运动响应。结果显示:相较于钢架式网箱,组合钢架式网箱的浮架与网衣连接点受力和锚绳力都有所增大;铰接外网箱能够扩大养殖空间并且不会影响内网箱的容积剩余率。通过在钢架式网箱基础上铰接外网箱能够达到扩大养殖空间的目的。研究结果可为在实际中应用铰接外网箱来扩大养殖空间提供参考。

关键词:组合钢架式网箱;铰链;数值模拟;容积剩余率

中图分类号:S953.4

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0027-008

中国海岸线长度位居世界第四,海洋养殖资源充足。但受中国海域气候的影响以及养殖设施性能的约束,海上养殖业发展不够充分。提高网箱系统抵御风浪流的能力以及研发新型养殖网箱变得尤为重要^[1-4]。

国内外对于网箱系统已经进行了大量研究,黄六一等^[5]、张本^[6]通过对张力腿网箱进行水动力特性试验以及实地考察发现,张力腿网箱具有好的抗风浪性能。单恒年等^[7]对重力式网箱进行了水动力分析,网箱的连接构件数量增加时,浮架应力和变形将会减少。董海国等^[8]、隋留洋等^[9]和陈昌平等^[10]都对重力式网箱的锚绳力进行研究,结果表明波流同向下的锚绳力大于波流逆向,多点系泊时的系泊力峰值大于单点系泊。徐为兵等^[11]和崔勇等^[12]对蝶形网箱进行了多海况下的数值计算,证明了流速对锚绳张力影响最大,双层网底网箱的最大锚绳力均大于单层网底网箱。崔江浩^[13]、江涛等^[14]对网箱进行耐流特性研究,不同流速下数值模拟与试验结果相差不大。熊占山等^[15]研制出了淡水组合式浮动网箱。刘永利等^[16]通过对网箱在横、纵两种排布下的模型试验,验证了在流速高时,纵向排布方式抗风浪性能最好。郭根喜等^[17]对高密度聚乙烯圆形网

箱锚绳受力实测试验,验证了锚绳受力与流速呈正比关系。赵国正^[18]对单体、双体和四体方形网箱进行了水动力分析,结果表明四体方形网箱运动幅度最小。Decew 等^[19]用试验和数值模拟的方法研究了一种重力网箱的水动力性能,结果表明锚绳力试验结果比数值模型大。Zhao 等^[20]通过对箱型和柱形网箱在纯波和纯流中进行仿真,结果表明柱形网箱比箱型网箱更稳定,养殖量更多。Hu 等^[21]采用 ABAQUS 研究了 2×2 组合式网箱系泊系统的运动响应,结果表明双系泊系统的系泊张力大于正交系泊系统。Xu 等^[22]通过一系列物理模型试验验证了网箱在水面以下时,网箱变形,网线拉力将明显降低。Myrli 等^[23]通过流固耦合的方法研究网笼的使用寿命,结果表明聚氨酯网线能够延长网笼使用寿命。

组合式网箱能够满足产业化和规模化发展的要求^[24],是海上养殖业未来的发展方向。目前,组合式网箱大多数都采用串联式和双列式^[25],外网箱包围内网箱这种形式的组合网箱在海上养殖中已经有所应用。在实际应用中,铰接外网箱后的组合钢架式网箱水动力性能会与铰接前钢架式网箱的水动力性能有很大差别。

本研究对组合钢架式网箱进行水动力性能分

收稿日期:2022-05-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51809126);江苏省自然科学基金资助项目(BK20181468)

作者简介:张婧(1983—),女,博士,副教授。研究方向:船舶与海洋结构物性能研究。E-mail:zhangjing8270@163.com

析,计算各连接系统的受力及网箱的容积剩余率,并与钢架式网箱的容积剩余率及连接系统受力进行对比,为在实际中运用铰接外网箱扩大养殖空间提供依据。

1 水动力学相关理论

1.1 集中质量法

由于网箱结构中的网线及锚绳都属于柔性杆件,在进行数值模拟中,采用集中质量法^[26]进行计算,假定网衣结构由有限无质量弹簧连接的集中质量构成,集中质量点在网目的中间和两端,锚绳离散成多个集中质量点与构件。

根据牛顿第二定律,集中质量点的运动方程为:

$$Ma = M \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = F + T + B + W \quad (1)$$

式中: M 为集中质量点的质量; a 为集中质量点的加速度; F 为集中质量点所受水流力; T 为网线张力; B 为浮力; W 为重力。

1.2 Morison 方程

一般在计算网衣与锚绳这类细长杆件水动力荷载时,会忽略自身结构对波浪的影响,本研究应用 OrcaFlex 中拓展后的 Morison 方程^[27]来计算水动力载荷,方程为:

$$f = (C_m \Delta a_f - C_a \Delta a_b) + \frac{1}{2} \rho C_d S |v_f| v_f \quad (2)$$

式中: f 为作用在物体上的单位流体力; $C_m = 1 + C_a$ 为惯性力系数; Δ 为排水量; a_f 为水质点绝对加速度; a_b 为物体绝对加速度; C_d 为拖曳系数; v_f 为水

质点绝对速度; S 为拖曳面积。

1.3 网箱容积剩余率计算

网箱在纯流,纯波浪和波流工况下,在一段时间内的容积剩余率是不断变化的,最终会达到稳态,此时容积剩余率会处于恒定的状态。本研究计算容积剩余率采用 Lader 等^[28-29]提出的方法。图 1 为该方法的标记点示意图。如图 1 所示,在圆形网衣上进行标记并编号 01、03、05、21、23、25、31、33、35。坐标系原点设置在顶部中心, X 方向与水流方向相同, Z 方向为水流方向的法向, XZ 平面为网衣的对称平面。因为网箱是对称的,所以测量计算是仅考虑网箱一半。图中标记的位置用于计算网衣的体积减小量。

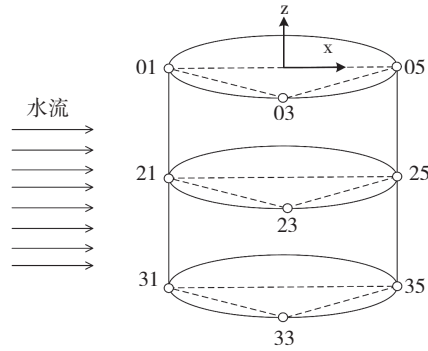


图 1 标记点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of marked points

通过考虑编号为 01-03-05-21-23-25 和 21-23-25-31-33-35 的 2 个三棱柱的体积减去 1/2 中心岛体积,计算出圆形网衣体积减小的估计值。每个三棱柱的体积可以用 V_p 来表示:

$$V_p = \frac{1}{2} (A_{01,03,05} + A_{21,23,25}) \times \left\{ -\frac{1}{3} [(z_{21} - z_{01}) + (z_{23} - z_{03}) + (z_{25} - z_{05})] \right\} + \frac{1}{2} (A_{21,23,25} + A_{31,33,35}) \times \left\{ -\frac{1}{3} [(z_{31} - z_{21}) + (z_{33} - z_{23}) + (z_{35} - z_{25})] \right\} \quad (3)$$

式中: $A_{n1,n3,n5}$ 为跟踪点 $n1$ 、 $n3$ 、 $n5$ 所围成的三角形面积, Z_n 为 n 点的 Z 坐标值。容积剩余率 C_w 如下表示:

$$C_w = \frac{V_p - V_c}{V_{p0} - V_c} \quad (4)$$

式中: V_{p0} 为三棱柱在初始时的体积; V_c 为 1/2 中心岛的体积。

2 组合钢架式网箱模型及计算工况

2.1 组合钢架式网箱特点与参数

组合钢架式网箱主要由中心岛、浮架、网衣和锚碇系统等组成,中心岛与内网箱浮架间采用 36 块板连接,板长 30 m,两板之间夹角 10° 。在内网箱与外网箱的浮架之间布置有 36 根铰

链连接,设置约束条件,实现铰链上下运动。外网箱网衣网目与内网箱网目数一致。表 1 所示,为钢架式网箱和锚绳的具体特征参数。图 2a、图 2b 分别为组合钢架式网箱的主视图和俯视图,图 3a、图 3b 分别为钢架式网箱的主视图和俯视图。

表 1 网箱参数
Tab. 1 Cage parameters

项目	属性	数值	属性	数值
浮架系统	浮架直径/m	80	浮架截面直径/m	0.6
	浮架弹性模量/MPa	960	浮架壁厚/m	0.05
	浮架密度/(kg/m ³)	953	浮架泊松比	0.38
	压载舱直径/m	80	压载舱高度/m	2
	中心岛直径/m	20	中心岛高度/m	60
	浮架吃水/m	0.3		
网箱系统	网线横截面直径/m	0.07	网线弹性模量/MPa	350
	网线密度/(kg/m ³)	1 150	网线泊松比	0.3
	网箱高度/m	40	外网箱直径/m	120
	内网箱直径/m	80		
铰链系统	铰链直径/m	0.35	铰链长度/m	20
	铰链弹性模量/GPa	212	铰链泊松比	0.3
锚碇系统	锚绳长度/m	108	锚绳横截面直径/m	0.08
	锚绳密度/(kg/m ³)	1 150	锚绳泊松比	0.3
	锚绳弹性模量/MPa	350	锚绳破断强度/kN	1 067

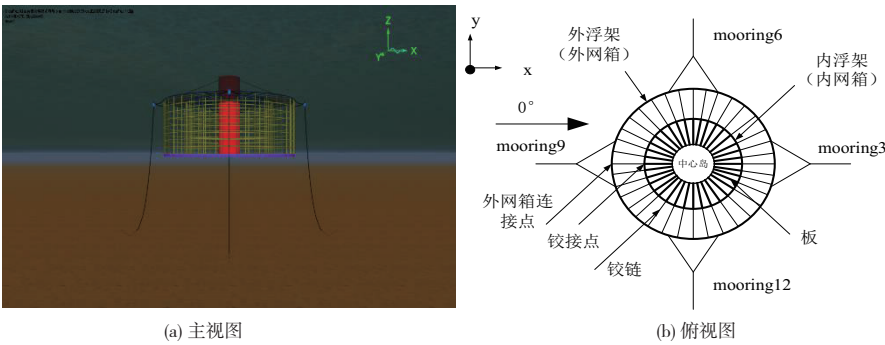


图 2 组合钢架式网箱
Fig. 2 Combined rigid frame cage

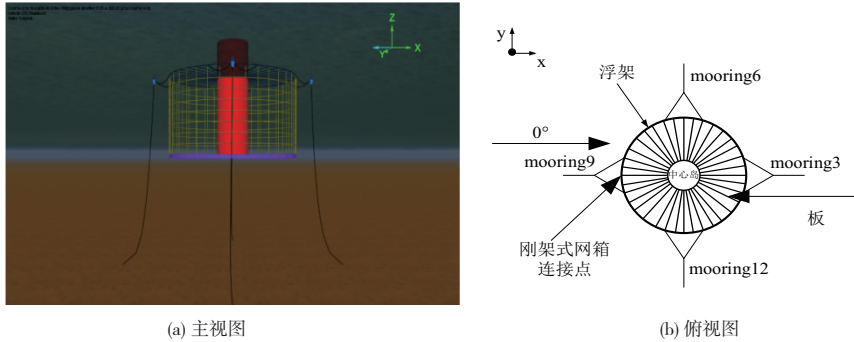


图 3 钢架式网箱
Fig. 3 Rigid frame cage

2.2 网衣模型

网衣数值模型是利用水动力有限元分析软件 Orcaflex 建立的。在 Orcaflex 软件中,网衣模型由“line”模型和“3Dbouy”模型组合而成^[30]。“line”模型被用来建立网线,通过设置不同的材料参数给予模型不同的特性。“3Dbouy”模型为三自由度的小浮体,体积很小,可以布置成小浮标或者连接网线的节点。图 4 为网衣的数值模型,图 4 中 01-02 表示一段网线。

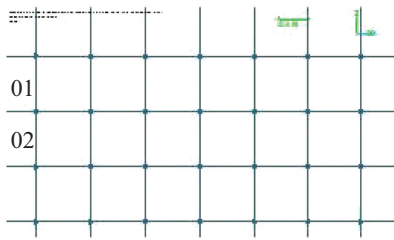


图 4 网衣数值模型

Fig. 4 Mesh numerical model

2.3 计算工况

本网箱布置在福建海域,结合实际海域,考虑在纯流,纯波浪及波流联合 3 种工况下对连接内外网箱的铰链进行运动响应分析,对组合钢架式

网箱和钢架式网箱的浮架与网衣连接点张力,网箱容积率和锚绳力进行水动力对比分析,具体工况如下:

纯流工况下,入射水流为 0° ,流速分别为 $U=0.25\text{ m/s}$ 、 1 m/s 、 2.25 m/s 、 4 m/s ,水深为 100 m ;纯波浪工况下,波高为 $H=1.3\text{ m}$,周期 $T=6、7、8\text{ s}$ 及浪向 0° ,水深为 100 m ;波流工况下,流速 $U=4\text{ m/s}$,波高 $H=1.3\text{ m}$, $T=6\text{ s}$ 及波流夹角分别为 $0^\circ、90^\circ、180^\circ$,水深为 100 m 。

3 水动力分析

3.1 铰链系统垂向运动响应

铰链系统垂向运动响应是衡量组合钢架式网箱安全的重要参数。以铰接点初始位置为坐标原点,对铰接系统垂向运动响应进行分析。在实际海域中,波流是同时存在的,波流联合工况下铰链系统的垂向位移也更贴合实际。图 5 为网箱在不同波流夹角下铰链的垂向位移曲线。表 2、3、4 为铰接点和外网箱连接点在纯水流,纯波浪及波流联合作用下最大垂向运动幅度及最大有效张力对比。

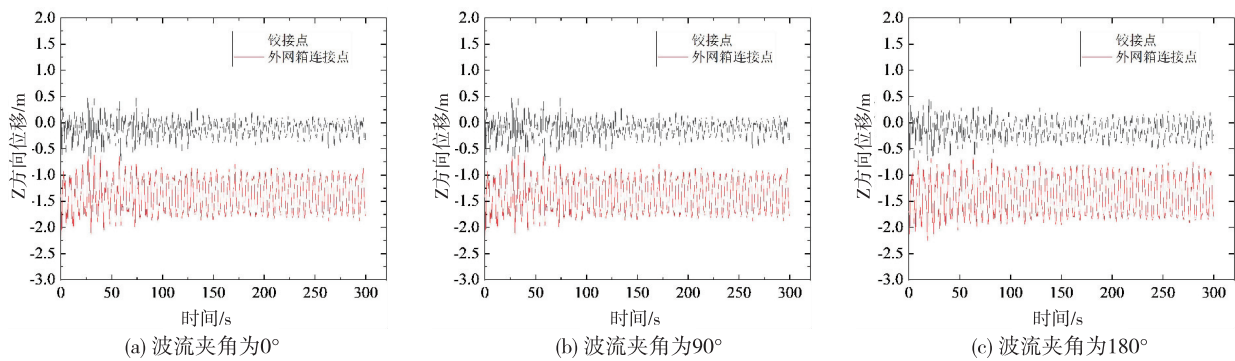


图 5 波流联合作用下连接点垂向位移

Fig. 5 Vertical displacement of joint under combined action of wave and current

表 2 纯流作用下铰链垂向位移及最大有效张力对比

Tab. 2 Comparison of hinge vertical displacement and maximum effective tension under pure flow

流速/(m/s)	铰接点		外网箱连接点		最大有效张力/kN
	垂向位移幅度/m	最大垂向位移/m	垂向位移幅度/m	最大垂向位移/m	
0.25	-0.253~0.011	0.264	-1.485~-1.182	0.303	499.45
1	-0.253~0.2	0.273	-1.497~-0.184	0.313	345.9
2.25	-0.27~0.002	0.272	-1.484~-1.158	0.326	295.5
4	-0.253~0.01	0.263	-1.489~-1.169	0.32	193.4

表3 纯波浪作用下铰链垂向位移及最大有效张力对比

Tab. 3 Comparison of hinge vertical displacement and maximum effective tension under pure waves

周期/ s	铰接点		外网箱连接点		最大有效张力/ kN
	垂向位移幅度/ m	最大垂向位移/ m	垂向位移幅度/ m	最大垂向位移/ m	
6	-0.46~0.24	0.69	-1.89~-0.84	1.05	318.63
7	-0.53~0.43	0.96	-2.1~-0.85	1.25	564.46
8	-0.6~0.47	1.07	-2.23~-0.48	1.75	319.39

表4 波流联合作用下铰链垂向位移及最大有效张力对比

Tab. 4 Comparison of hinge vertical displacement and maximum effective tension under combined action of wave and current

波流 夹角/ $(^{\circ})$	铰接点		外网箱连接点		最大有效 张力/ kN
	垂向位移幅度/ m	最大垂向位移/ m	垂向位移幅度/ m	最大垂向位移/ m	
0	-0.53~0.28	0.82	-1.88~-0.79	1.09	128
90	-0.65~0.2	0.85	-2.03~-0.18	1.22	182
180	-0.51~0.28	0.79	-2.03~-0.81	1.19	203

由图5可见,不同波流夹角下,铰接点的最大垂向运动幅度都小于外网箱连接点的运动幅度,在波流夹角为 90° 时,垂向运动幅度最大。由表2、3、4可见,在纯水流,波流联合工况下,铰接点的最大垂向位移幅度在不同流速,不同波浪夹角下数值结果相差并不大。但铰链的最大有效张力随流速的增加反而会减小,随波流夹角变大而增大。在纯波浪工况下,其最大垂向位移幅度随波浪周期增加而增大,铰链最大有效张力出现在周期 $T=7s$ 时。通过对比3种工况下的铰接点及外网箱连接点的最大垂向位移,可以明显看出纯波浪及波流联合工况下的最大垂向位移大于纯流工

况,这说明铰链的垂向运动位移受波浪的影响较大。结合3种工况下铰链的最大有效张力数值,可以看出波流工况下铰链的安全性高于其他两种工况,也体现了通过铰链连接内外网箱这方案的可行性。

3.2 浮架与网衣连接点受力分析

选取与迎流面锚绳 mooring 9 最近的迎流面外网衣与外浮架的连接点,同时选取与迎流面锚绳 mooring 9 最近的迎流面内网衣与内浮架的连接点进行分析。图6为内、外浮架与网衣连接点在纯流,纯波浪及波流联合工况下的有效张力。

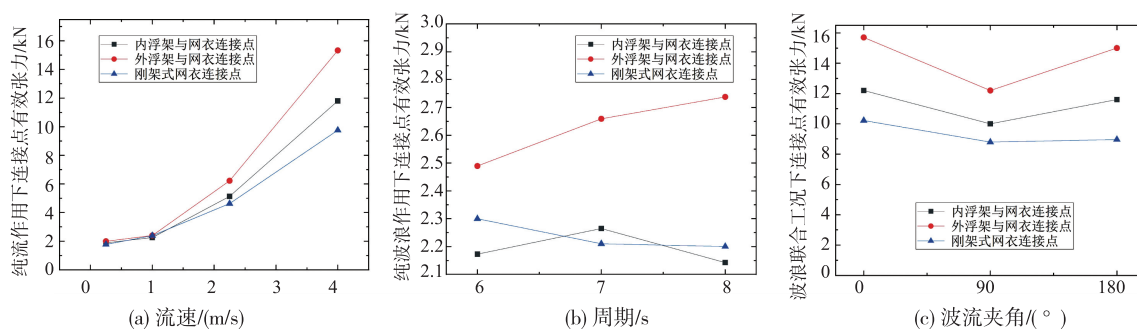


图6 连接点有效张力

Fig. 6 Effective tension at joint point

由图6可见,3种工况下,外浮架与网衣连接点的有效张力始终比内浮架与网衣连接点和钢架式网箱连接点的有效张力大。由图6a可见,在纯流工况下,随着流速变大,连接点有效

张力也变大。内外浮架与网衣连接点的有效张力差也变大。相比钢架式网箱的连接点有效张力,组合钢架式网箱的连接点有效张力始终大于钢架式网箱的连接点有效张力。由图6b可

见,在纯波浪工况,外浮架与网衣连接点的有效张力和内浮架与网衣连接点的有效张力低于其他两种工况,这说明连接点有效张力受波浪的影响小于流以及波流联合的影响。由图 6c 可见,在波流联合工况下,外浮架与网衣连接点的有效张力和内浮架与网衣连接点的有效张力最小时出现在波流夹角为 90° 时,波流同向与波流逆向时有效张力相差不大。

3.3 网箱容积剩余率

网箱的容积剩余率不仅可以反映网箱生存空间大小,也可以反映网衣的变形程度。计算容积剩余率采用 Lader^[28] 提出的方法。

图 7 为纯流、纯波浪及波流联合作用下组合钢架式内外网箱和钢架式网箱的最大容积剩余

率。由图 7 所示,3 种工况下,组合钢架式内网箱和钢架式网箱的最大容积剩余率大于组合钢架式外网箱最大容积剩余率,且组合钢架式内网箱和钢架式网箱的最大容积剩余率相差不大,这说明在钢架式网箱铰接一外网箱不会影响内网箱的生存空间。外网箱的最大容积剩余率也能达到 90% 以上。在纯流工况下,随着流速变大,网箱的剩余容积率变小。纯波浪工况下组合钢架式外网箱最大容积剩余率低于纯流及波流联合工况下的最大容积剩余率,这说明网箱的最大容积剩余率受波浪的影响低于流的影响。波流同向和波流逆向时网箱最大容积剩余率大于波流夹角 90° 时。图 8 为纯流工况下不同流速的网衣变形。随着流速的增大,网衣的变形程度也越大。

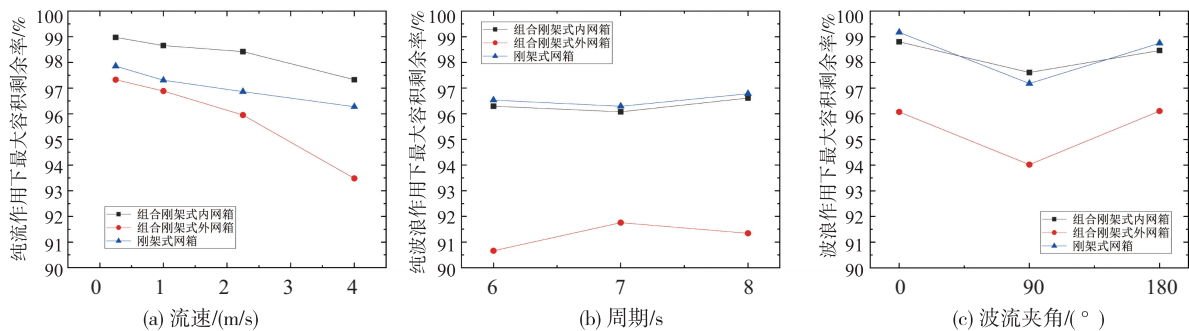


图 7 网箱容积剩余率对比

Fig. 7 Comparison of net box volume residual ratio

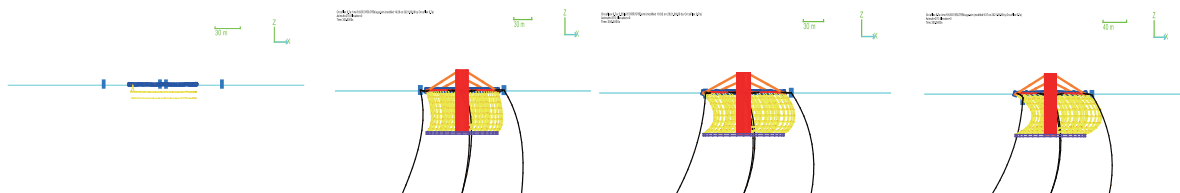


图 8 网箱稳态图

Fig. 8 Steady state diagram of cage

3.4 锚绳力分析

锚绳最大张力是衡量组合钢架式网箱系泊系统安全性的重要的参数之一。以迎浪侧锚绳 mooring 9 的锚绳受力情况为对象进行分析。图 9 为组合钢架式锚绳及钢架式锚绳在纯流,纯波浪及波流联合作用下最大锚绳力对比。由图 9 所示,钢架式网箱的最大锚绳力小于组合钢架式最大锚绳力,这是由于铰接外网箱导致的。铰接一个外网箱后的组合钢架式网箱最大锚绳

力出现在波流夹角为 0° 的工况,相较于钢架式网箱增大了 16%,且能够达到 API RP 2SK^[31] 规范规定的安全系数。由图 9a 知,同一流速下,两者之间锚绳力相差较小,且随着流速增大,两种形式的网箱最大锚绳力都在增加。同时,纯流及波流工况下两种形式网箱的最大锚绳力都远大于纯波浪工况下,这说明流速对锚绳的影响较大。由图 9c 知,波流联合作用下,组合钢架式网箱的锚绳力最大。

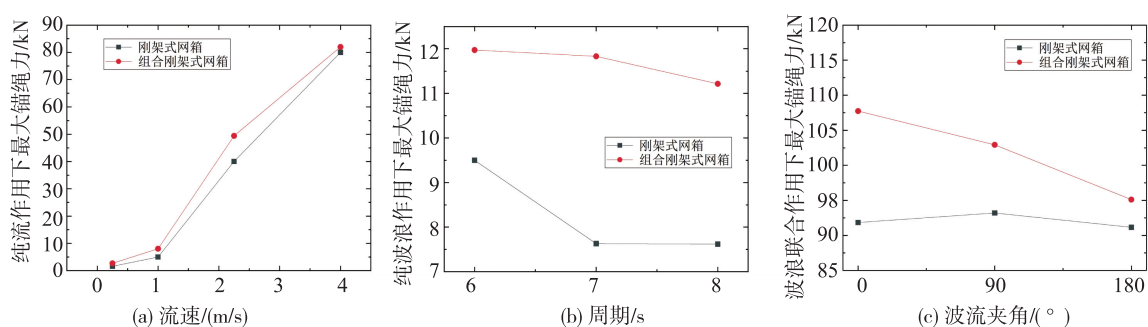


图9 最大锚绳力对比

Fig. 9 Comparison of maximum mooring line forces

4 结论

通过数值模拟对比分析组合钢架式网箱和钢架式网箱的水动力性能,结果显示,组合钢架式网箱的浮架与网衣连接点有效张力大于钢架式网箱连接点。因此,组合钢架式网箱浮架与网衣连接处需要保护措施,预防发生网衣断裂或浮架破坏。铰接点与外网箱连接点的最大垂向位移受流速的影响较小,铰链的最大有效张力会随着流速增加而减小,最大有效张力在波流联合作用下最小。组合钢架式内网箱在纯流、纯波浪和波流工况下的最大容积剩余率都在95%以上,外网箱的最大容积率能够达到90%,在纯流工况下内网箱最大容积剩余率高于钢架式网箱。这表明通过铰接外网箱在获得更大养殖空间的同时,对内网箱的养殖空间有一定保护作用。

参考文献

- [1] 张起信,张启胜,刘光穆,等. 浅谈深海抗风浪网箱养鱼业[J]. 海洋科学,2007(3):82-83.
- [2] 桂福坤,祝含接,冯德军. 海洋养殖网衣水动力特性研究进展[J]. 渔业现代化,2019,46(5):9-14,21.
- [3] 马云瑞,郭佩芳. 我国深远水养殖环境适宜条件研究[J]. 海洋环境科学,2017,36(2):249-254.
- [4] 胡方珍,盛伟群,王体涛. 深远海养殖装备技术现状及标准化工作建议[J]. 船舶标准化工程师,2021,54(5):6-12.
- [5] 黄六一,杨正,李玉岩,等. 水流作用下自升降式张力腿网箱水动力学特性试验研究[J]. 渔业现代化,2021,48(2):9-15.
- [6] 张本. 介绍一种近海养鱼张力腿网箱[J]. 渔业现代化,2002(6):36-37.
- [7] 单恒年,董国海,许条建. 重力式网箱浮架结构的动力响应特性研究[J]. 渔业现代化,2015,42(2):55-59,66.
- [8] 董国海,孟范兵,赵云鹏,等. 波流逆向和同向作用下重力式

网箱水动力特性研究[J]. 渔业现代化,2014,41(2):49-56.

- [9] 隋留洋,黄小华,刘海阳,等. 系泊方式对深水养殖网箱动力特性影响研究[J]. 南方水产科学,2021,17(4):98-108.
- [10] 陈昌平,李玉成. 组合式网箱锚绳受力特性研究[J]. 中国海洋平台,2007(3):12-17.
- [11] 徐为兵,朱克强,张大朋,等. 网格锚定单体碟形网箱的水动力特性研究[J]. 海洋科学,2015,39(10):68-72.
- [12] 崔勇,关长涛,黄滨,等. 波浪作用下双层网底网箱水动力特性的数值模拟[J]. 渔业科学进展,2019,40(6):18-24.
- [13] 崔江浩. 重力式养殖网箱耐流特性的数值模拟及仿真[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.
- [14] 江涛,苏世强,谌志新,等. 新型顺流式网箱的研究[J]. 渔业现代化,2005(1):36-38,23.
- [15] 熊占山,胡国宏,张家松,等. 淡水组合式浮动网箱的研制[J]. 渔业现代化,2015,42(3):43-46.
- [16] 刘永利,王磊,石建高,等. 方形组合式养殖平台性能分析[J]. 渔业信息与战略,2015,30(1):45-49.
- [17] 郭根喜,黄小华,胡昱,等. 高密度聚乙烯圆形网箱锚绳受力实测研究[J]. 中国水产科学,2010,17(4):847-852.
- [18] 赵国正. 组合式方形网箱水动力特性的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [19] DECEW J, FREDRIKSSON D W, BUGROV L, et al. A case study of a modified gravity type cage and mooring system using numerical and physical models[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,2005,30(1):47-58.
- [20] ZHAO Y P, GUI F K, XU T J, et al. Numerical analysis of dynamic behavior of a box-shaped net cage in pure waves and current[J]. Applied Ocean Research,2013,39:158-169.
- [21] HU K, FU S X, XU Y W, et al. Hydrodynamic response of multiple fish cages under wave loads[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE. San Francisco: ASME, 2014: OMAE2014-23716.
- [22] XU T J, ZHAO Y P, DONG G H, et al. Analysis of hydrodynamic behavior of a submersible net cage and mooring system in waves and current[J]. Applied Ocean Research, 2013, 42(8):155-167.
- [23] MYRLI O, KHAWJA H. Fluid-structure interaction (FSI)

- modelling of aquaculture net cage[J]. International Journal of Multiphysics, 2019, 13(1): 97-111.
- [24] 闫国琦, 倪小辉, 莫嘉嗣. 深远海养殖装备技术研究现状与发展趋势[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(1): 123-129.
- [25] 何伟, 李春柳. 组合式网箱的锚绳受力分析与布置方式[J]. 科学养鱼, 2013(7): 75-76.
- [26] 陈昌平, 赵云鹏, 李玉成, 等. 波流作用下双体组合式网箱水动力特性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(4): 360-367.
- [27] 张美满, 包雄关, 黄栋. 基于 Orcaflex 的张力腿网箱水动力分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(1): 135-140.
- [28] LADER P F, FREDHEIM A. Dynamic properties of a flexible net sheet in waves and current-A numerical approach [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(3): 228-238.
- [29] LADER P F, FREDHEIM A, LIEN E. et al. Modeling of 3D net structures exposed to waves and current [C]. 3rd International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology. Department of Engineering Science; The University of Oxford, UK, 2003: 19-26.
- [30] 于泽群. 深水网箱水动力性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- [31] American Petroleum Institute. API RP 2SK, Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures [M]. Washington: API Press, 2005.

Analysis of hydrodynamic performance of combined rigid frame cage

ZHANG Jing, SUN Liwen, ZHOU You, SHI Xinghua

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu, Zhenjiang 212028, China)

Abstract: To expand the breeding space of rigid frame cages, a new type of combined rigid frame cage with a hinged outer cage on the base of the rigid frame cage was put forward. The hydrodynamic performance of the model was analyzed by using the marine engineering hydrodynamic software OrcaFlex. Under the conditions of pure flow, pure wave, and wave-current, the effective tension of the connection point between the floating frame and the net clothing of the combined rigid frame cage and the hinged rigid frame cage, the residual volume of the cage and the anchor rope force were compared and analyzed. At the same time, the Kinematic response of the hinged system of the combined rigid frame cage was analyzed. The results show that; compared with the rigid frame cage, the force of the connection point between the floating frame and the net clothing and the anchor rope is increased; the hinged outer cage can expand the breeding space and does not affect the remaining volume of the inner cage. The purpose of expanding the breeding space can be achieved by articulating the outer cage based on the steel frame cage, and the research results can provide a reference for the application of the hinged outer cage in practice to expand the breeding space.

Key words: combined rigid frame cage; hinge; numerical simulation; volume residual rate

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.005

管道式气力提升池底吸污装置性能研究及试验

黄 达,张宇雷,张海耿,李金刚,高倩倩

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室,上海 200092)

摘要:气力提升装置具有结构简单,运行成本低廉等优点,在水处理领域具有广泛应用。本研究建立了气力提升系统理论模型,分别考察了进气流量、提升立管管径、淹没率和吸口截表面积对管道式气力提升池底吸污装置吸口流速和吸污效率的影响。试验研究了进气流量、提升立管管径、淹没率和吸口截面积等因素对吸污装置吸口流速和吸污效率的影响规律。结果显示:吸口流速和吸污效率都与进气流量和淹没率呈线性增长关系;在管径不变的条件下,吸口流速随着吸口截面积增大而减小,吸污效率增加后趋于稳定。进气流量为 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 、淹没率为 0.778、提升立管管径为 50 mm 和吸口截表面积为 226 mm^2 的工况条件下,管道式气力提升池底吸污装置可以达到最优性能。本研究为后续装备研发、试验和推广应用提供参考。

关键词:气力提升;吸污装置;吸口流速;吸污效率

中图分类号:TP23

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0035-007

气力提升技术是将压缩空气注入提升立管中,利用管内外的压力差输送液体。气力提升装置无机械传动机构,安装方便、稳定性好^[1]。广泛应用于石油开采^[2]、深井取水^[3]、化工行业、有毒液体输送等领域。在水处理领域中气力提升技术应用较早,如污水处理厂排泥工况常采用气力提升技术^[4]。气力提升技术理论和试验研究为管道式气力提升池底吸污装置提供理论基础。裴江红等^[5]发现淹没率与气提效率不呈线性关系,进气流量也不是越大越好,存在最优进气流量。陈光国等^[1]研究了淹没率、进气流量和流体浓度三个参数对液体提升流量和提升效率的影响。丁海荣等^[6]发明脉冲式气提排泥装置,可以用于水处理领域排泥,也可以用于生物池的反硝化回流。王庆松等^[7]研发一种污泥气提装置,该装置可以实现自动化排污,且可以控制污泥排放量。当前,影响气力提升技术的主要问题有:排污均匀性较差;排污量和排污效率还需提高。

工厂化循环水苗种繁育过程中水流流速不高,造成粪便残饵在池底堆积,容易滋生大量微生物,进而影响受精卵的孵化进程和苗种健康生

长^[8]。育苗期间为了保证育苗池清洁需要经常吸污,一般使用虹吸法去除底部污物^[9]。该方式需要依靠人工完成,易导致鱼苗应激,水体浑浊,劳动强度大和清污不均匀等。查阅文献可知,国内外针对水下鱼池清刷设备的研究较少。中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所设计了一款水下鱼池清刷机器人,利用内螺旋路径规划算法完成全覆盖清扫任务^[10-13];郭根喜等^[14-15]设计了一款深远海网箱养殖网衣清洁机器人,利用高速水流驱动叶轮旋转,在反冲击力的作用下,使固定在工作盘上的清扫刷在网衣表面进行摩擦旋转清洗;杨强等^[16]对遥控泳池清洁机工作原理、模型方程以及系统设计提供研究方法。对比传统人工清洁方式和现有的水下清洁装备,水下清洁装备结构较为复杂、设备体积较大,不适用于小型育苗池使用;清洁方式都是利用刷盘清洁,对水体扰动较大,容易造成幼鱼应激反应导致死亡。因此需要研究一款结构简单、体积较小、对幼鱼应激较小的清洁装备。

本研究将气力提升技术与水下清洁装备技术相结合,设计了一款管道式气力提升池底吸污装备。

收稿日期:2022-06-09

基金项目:国家重点研发计划“海水鱼循环水智能育苗设备技术合作研究(2021YFE0108700)”;国家海水鱼产业技术体系(CARS-47-G20);中国水产科学研究院科技创新团队项目(2020TD78)

作者简介:黄达(1994—),男,硕士研究生,研究方向:机械工程。E-mail:huangda@fmiri.ac.cn

通信作者:张宇雷(1980—),男,副研究员,研究方向:渔业装备与工程技术。E-mail:zhangyulei@fmiri.ac.cn

1 气力提升系统工作原理及系统组成

1.1 工作原理

常规的气力提升装置如图 1 所示,主要由提升管和进气管组成。

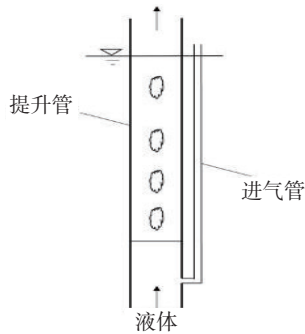


图 1 气提装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air-lift

提升管一端浸没在液体中,提升管底端连接进气管^[17]。气力提升装置的原理是:压缩空气经气管注入提升管中,空气与管中液体冲击后有大量气泡产生,气泡在提升管中做垂直向上运动,气泡上浮中会聚集成与管径相当的气泡时发生破裂。在气提过程中,液体与气泡会交替出现,气泡在管内的运动会带动液体连续上升,直至被提升出管外^[18]。当管道中的固体颗粒物受到液体摩擦阻力大于自身重力时,颗粒物就会提升出管外^[19]。

1.2 系统组成

根据气力提升工作原理设计了一款旋转管道式气力提升池底吸污装置,如图 2 所示。该装置由吸污管、提升立管、集水槽、轴承座、旋转轴、减速电机、齿轮和进气管组成。图 3 是旋转管道式气力提升池底吸污装置试验装置。

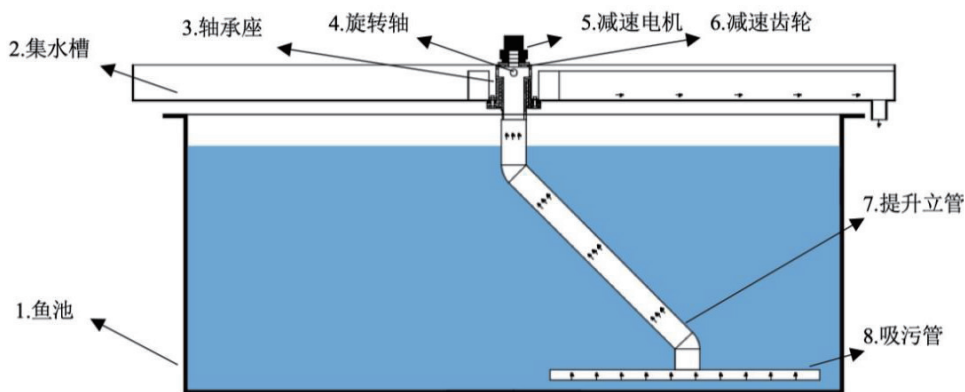


图 2 气提吸污装置系统组成

Fig. 2 System composition of air-lift sewage suction device



图 3 试验装置实物图

Fig. 3 Experimental device

2 气力提升系统理论模型建立

2.1 设计参数

提升管管径、淹没率和进气流量是管道式气力提升池底吸污装置的主要设计参数^[20]。参考《给水排水设计手册(第五册)》中的公式计算^[21]。

$$h = \frac{H}{\mu - 1} \quad (1)$$

式中: h 为提升管淹没高度, m; H 为提升管提升高度, m; μ 为密度系数, 一般取值 2~2.5。

$$Q_g = \frac{KQH}{\left(231g \frac{h+10}{h}\right) \gamma} \quad (2)$$

式中: Q_g 为气体流量, L/min; K 为安全系数, 一般取 1.2; Q 为提升管设计提升流量, m^3/h ; γ 为效率系数, 一般取值 0.35~0.45; g 为重力加速度, m^2/s 。

根据上述公式, 可确定进气流量、淹没率、提升管管径等都需通过其他方法确定参数。

2.2 提升管管径计算

通过查阅文献^[17], 气液流型和提升管管径之间的关系已有学者研究, 但是由于不同的工况条件, 流体流型也存在差异。因此需要根据具体实际工况选择合适的计算模型。谷晓娟^[22]将流体流型分为环状流、团状流、气泡流和块状流。气力提升效率在团状流的模型中效果最好, 根据团状流方程计算相应管径大小。

$$\mu_g = \frac{Q_g}{A} \quad (3)$$

$$\mu_l = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

$$\mu_g^* = \frac{\mu_g}{\sqrt{gD(\gamma_1/\gamma_2)}} \quad (5)$$

$$\mu_l^* = \frac{\mu_l}{\sqrt{gD}} \quad (6)$$

$$\mu_g^* = 0.0061 + 0.007\mu_l^* \quad (7)$$

$$\mu_g^* = 0.136 + 0.022\mu_l^* \quad (8)$$

式中: μ_g 为压缩空气的表观速度; μ_l 为提升液体的表观速度; μ_g^* 为压缩空气的修正汝德数; μ_l^* 为提升液体的修正汝德数; g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为提升管管径, m; γ_1 为提升液体的容重, kg/m^3 ; γ_2 为压缩空气的容重, kg/m^3 。

公式(7)是气泡流模型和团状流模型的分界线公式; 公式(8)是团状流模型和泡沫流模型的分界线公式。根据上述计算公式, 已知气力提升的液体流量和进气量就可以计算出提升管的管径范围。

2.3 淹没率计算

淹没率是指提升立管浸没在水面以下的高度与提升立管高度的比值。相关研究表明^[17], 气力提升装置的提升能力随淹没率的增加而增加。《排水工程(下册)》^[21]规定, 在一般情况下, 淹没率应大于等于 0.5。所以, 在满足一定的液体提升高度条件下, 尽可能增大淹没率, 且应大于或等

于 0.5。

2.4 进气量计算

利用 Golan 流型分界线方程和 Sadek Z. Kassab 计算模型联合求解^[23], 计算进气量的范围值。

$$K = \frac{4f(h+H)}{D} \quad (9)$$

$$s = 1.2 + 0.2 \frac{Q_g}{Q} + \frac{0.35\sqrt{gD}}{V_L} \quad (10)$$

式中: K 为摩擦参数; s 为滑移率; V_L 为进口处的提升液体流速, m/s; f 为摩擦因子。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \lg \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \lg \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{13}{Re} \right) \right] \quad (11)$$

$$\frac{h}{h+H} - \frac{1}{1 + \frac{Q_g}{sQ}} = \frac{v_l^2}{2g(h+H)}$$

$$\left[(K+1) + (K+2) \frac{Q_g}{Q} \right] \quad (12)$$

Dare^[24]的研究表明, 气力提升的提升高度与提升立管管径相关, 提升立管管径越大, 气力提升高度越低。相关研究表明, 气力提升的效率与管径相关, 提升立管管径越大, 气力提升效率越高。因此在选择提升立管管径时, 应考虑工程应用中对气力提升高度和效率的要求。

3 气力提升吸污效果试验

3.1 试验设计

研究进气量、提升立管管径、淹没率和吸口截表面积 4 个因素对管道式气力提升装置提升能力的影响, 即与吸口流速和吸污效率之间的关系。池底吸污装置设定启动时长为 2 min, 收集 2 min 内通过提升立管中液体, 使用 5 L 烧杯测量液体体积, 计算得出单位时间内提升立管中的液体流量, 即气提流量。进气流量测定是通过在进气管上安装气体流量计, 调节流量计至设定的进气流量即可。吸口截表面积通过测量吸污管上吸口尺寸与吸口数量计算得出。吸口流速通过气提流量和吸口截表面积计算得出, 吸污效率是气提流量和进气流量的比值。

3.2 进气量

风机将压缩空气注入提升立管中的体积流量

即为进气量,是管道式气力提升池底吸污装置的能量来源。本试验在淹没率为 0.778、提升立管直径为 75 mm、吸污管上均匀分布 $8 \times \varnothing 8$ mm(表面积为 402 mm^2)的吸污口的条件下,研究进气量分别在 2、4、6、8、10 和 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 工况条件下管道式气力提升池底吸污装置吸口流速和吸污效率。图 4 所示,吸口流速随着进气量的增加而增加,在进气流量为 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 时最大吸口流速 1.279 m/s ;吸污效率随着进气流量增大趋于稳定,在进气流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时最大吸污效率为 15.9%。

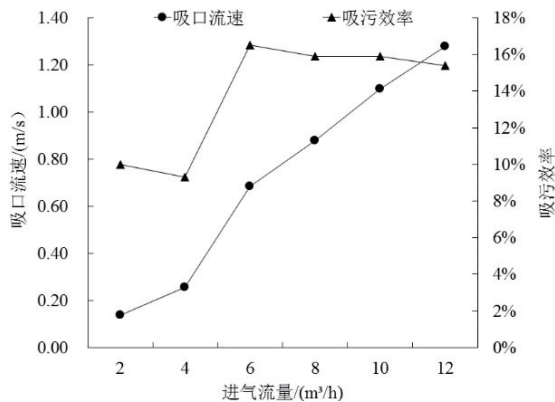


图 4 吸口流速和吸污效率与进气量的关系

Fig. 4 The relationship between suction flow rate and suction efficiency with intake air flow

3.3 立管管径

根据前文的理论计算,可知管径越小,提升高度越高;管径越大,提升效率越高,因此提升立管管径选择是管道式气力提升池底吸污装置的重要设计参数。本试验在淹没率为 0.778、吸污管上均布 $8 \times \varnothing 8$ mm(表面积为 402 mm^2)的吸污口的条件下,研究进气量分别在 2、4、6、8、10 和 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 工况条件下提升立管管径分别为 50 mm 和 75 mm 时吸口流速和吸污效率。

图 5 为立管直径为 50 mm 和 75 mm 在不同进气流量下的吸口流速,在进气流量 $\leq 7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, $\varnothing 50$ mm 的提升立管吸口流速大于 $\varnothing 75$ mm 提升立管的吸口流速。图 6 表明, $\varnothing 50$ mm 的提升立管吸污效率大于 $\varnothing 75$ mm 提升立管的吸污效率;进气流量 $> 7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, $\varnothing 75$ mm 的提升立管吸口流速大于 $\varnothing 50$ mm 提升立管的吸口流速,同时 $\varnothing 75$ mm 的提升立管吸污效率大于 $\varnothing 50$ mm 提升立管的吸污效率。

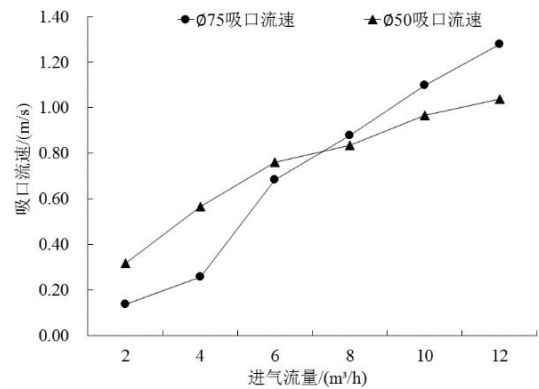


图 5 立管管径与吸口流速的关系

Fig. 5 The relationship between the diameter of the lifting riser and the suction flow rate

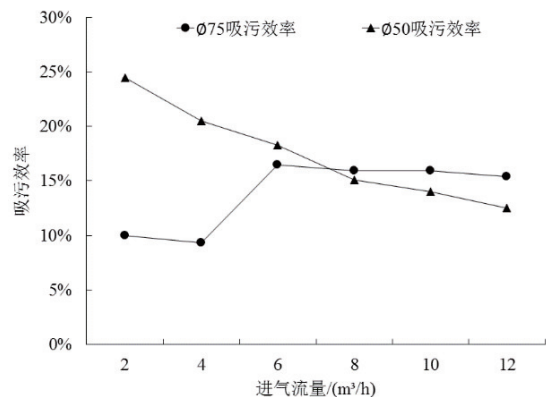


图 6 立管管径与吸污效率的关系

Fig. 6 The relationship between the diameter of the lifting riser and the suction efficiency

3.4 淹没率

本试验在进气流量为 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、吸污管上均布 $8 \times \varnothing 8$ mm(表面积为 402 mm^2)的吸污口,提升立管管径为 $\varnothing 50$ mm 的条件下,研究淹没率分别在 0.333、0.444、0.556、0.667 和 0.778 工况下管道式气力提升池底吸污装置吸口流速和吸污效率。图 7 表明,在 5 种工况下,管道式气力提升池底吸污装置吸口流速分别为 0.089、0.364、0.549、0.69 和 0.76 m/s ;吸污效率分别为 2.2%、8.8%、13.3%、16.5% 和 18.3%。

3.5 吸口截表面积

鱼池池底颗粒物主要通过吸口进入提升立管进而排出管外,所以吸口截表面积也是影响管道式气力提升池底吸污装置的重要设计参数。本试验在淹没率为 0.778,进气量为 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 和提升立管管径为 $\varnothing 50$ mm 的条件下,考察吸口截表面积

分别为 75.4 mm^2 ($6 \times \emptyset 4 \text{ mm}$)、 226.1 mm^2 ($8 \times \emptyset 6 \text{ mm}$)、 502.4 mm^2 ($10 \times \emptyset 8 \text{ mm}$)、 785 mm^2 ($10 \times \emptyset 10 \text{ mm}$) 和 942 mm^2 ($12 \times \emptyset 10 \text{ mm}$) 工况下管道式气力提升池底吸污装置吸口流速和吸污效率。图 8 表明,在五种工况下,管道式气力提升池底吸污装置吸口流速分别为 1.52 m/s 、 1.04 m/s 、 0.88 m/s 、 0.64 m/s 和 0.55 m/s ;吸污效率分别为 5.1% 、 10.6% 、 19.9% 、 22.5% 和 23.5% 。

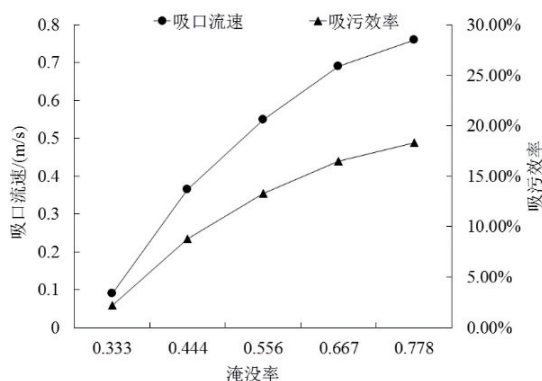


图 7 吸口流速和吸污效率与淹没率的关系

Fig. 7 The relationship between suction flow rate and suction efficiency with submergence rate

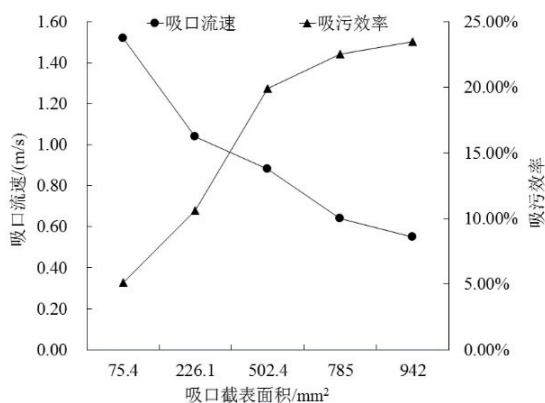


图 8 吸口流速和吸污效率与吸口截表面积的关系

Fig. 8 The relationship between suction flow rate and suction efficiency with suction cross-sectional surface area

4 讨论

4.1 进气流量对吸污效果影响分析

图 4 可以发现,在低进气流量时,吸口流速很低,池底颗粒物不能被提上来,只有当进气流量达到一定值时,颗粒物所受到的摩擦阻力大于其自身重力时才能被提上来,此时的进气流量称为临

界进气流量。当进气流量小于临界进气流量时,大量聚集的小气泡未能形成大气泡,液体在提升立管中不能流出管外,该流型为气泡流。当进气流量大于临界进气流量时,提升立管中有大气泡形成,该流型为弹状流;此时提升立管中的液体会慢慢流出管外,吸口流速也会增大;当进气流量继续增大时,吸口流速增加的幅度会变小,最后维持不变,这时的流型为团状流^[25-28]。

4.2 淹没率对吸污效果影响分析

图 7 可以看出,吸口流速和吸污效率随着淹没率的增加也会相应增加。分析原因:一方面当淹没率增加时,浸没在液体中提升立管高度增加,在提升立管中的压缩空气与管内流体混合更加均匀,随着气泡上升的流体流量更多;另一方面当淹没率增加,液体的提升高度减小,流出管外的流体所需能量减少,在进气流量不变的情况下,提升流体的能量不变,根据能量守恒原理,流出管外的流体更多,吸口流速和吸污效率也会相应增加。

4.3 吸口截面积对吸污效果影响分析

当吸口截面积增大时,吸口流速减小后趋于稳定,因为在淹没率和进气流量不改变的情况下,提升立管已达到最大的提升能力,吸口流速会趋于稳定;吸口截面积增大时,吸污效率会增大后趋于稳定,吸口截面积增大,流体进入吸口的面积增大,进入到提升立管中的流体更多,吸污效率也会增大,受限于淹没率和进气流量,吸污效率会趋于稳定。

4.4 吸口形状和位置对吸污效果影响分析

试验表明,吸口形状和位置会影响吸污均匀性,后期将进一步优化吸污管的吸口形状和位置,提高吸污均匀性和吸污效率。通过查阅相关文献^[29],提升立管中流体流型是影响气力提升装置性能的重要因素,提升立管中的流体流型除了和管径相关,进气方式同样也是主要因素^[30]。后期将改变进气方式,优化吸污装置的排污性能。

5 结论

本研究从循环水育苗池底清污需求出发,首次将气力提升技术运用在水产养殖育苗系统中,解决了育苗过程中池底清污技术空白,大大降低劳动强度,提高生产效率。通过建立气力提升系统理论模型和气力提升吸污效果试验研究,试验

得出在进气量为 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、淹没率为 0.778、提升立管管径为 50 mm 和吸口截表面积为 226 mm^2 的工况条件下,管道式气力提升池底吸污装置可以达到最优性能。该池底吸污装备存在吸污不均匀现象,在提升立管一侧的吸污效果好于远离提升立管一端。因此需进一步优化设计参数,包括吸口位置和进气方式等,其他因素对吸污效果的影响需要进行进一步试验。本研究也为后续装备研发、试验和推广应用提供理论指导。 □

参考文献

- [1] 陈光国,阳宁,唐达生,等.管道气力提升系统运行性能研究[J].矿冶工程,2009,29(5):24-28.
- [2] 宋立辉,董社霞,付强,等.气举采油工具的优化改进[J].化工管理,2016,7(20):56-58.
- [3] 卓云,陈薇,晏箭飞,等.深井超深井气体钻井一次性气举工艺技术[J].钻采工艺,2011,34(1):17-18.
- [4] 勒德智,洪庆松,王礼敬.液压往复式池底刮泥机及气提排泥装置在净水厂中的设计与应用[J].给水排水,2017,28(1):142-144.
- [5] 裴江红,唐川林,张凤华.气举装置特性研究[J].机械,2007,34(1):1-3.
- [6] 丁海荣,王庆芬,邹俊峰,等.一种脉冲式气提排泥装置:CN201220499441.7[P].2013-10-10.
- [7] 王庆松,钱东,王兴林,等.一种污泥气提装置:CN201220193059.3[P].2015-10-10.
- [8] 陈国华.石斑鱼繁育和养殖新技术[M].海口:三环出版社,2007:11.
- [9] 王永波,符书源.鞍带石斑鱼人工育苗与养殖[M].北京:海洋出版社,2011:10.
- [10] 黄达,倪琦,胡勇兵,等.水下鱼池清刷机器人系统设计与试验分析[J].渔业现代化,2019,46(6):29-34.
- [11] 胡勇兵,倪琦,黄达,等.工厂化循环水养殖鱼池清刷机器人的定位精度分析[J].渔业现代化,2021,48(2):16-21.
- [12] 黄达.水下鱼池清刷机器人关键技术研究[D].上海:上海海洋大学,2020.
- [13] 胡勇兵.水下清刷机器人路径规划研究[D].上海:上海海洋大学,2021.
- [14] 黄小华,郭根喜,胡昱,等.轻型移动式水下洗网装置设计[J].渔业现代化,2009,36(3):49-51.
- [15] 张小明,郭根喜,陶启友,等.歧管式高压射流水下洗网机的设计[J].南方水产科学,2010,6(3):46-51.
- [16] 杨强,桂堂军,翼龙飞,等.遥控泳池清洗机的开发设计[J].科技传播,2013(6):80-86.
- [17] 朱梦然.穿孔气提排泥影响因素分析及设计参数优化[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [18] 裴杰.气力提升液体的理论分析及实验研究[D].株洲:湖南工业大学,2015.
- [19] 胡东.气举提升装置的理论分析和实验研究[D].株洲:湖南工业大学,2007.
- [20] KIM S H, SOHN C H, HWANG J Y. Experimental study of performance and bubble pattern of air-lift pumps with various tube diameters and submergence ratios[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 2013, 37(9): 122-128.
- [21] 北京市市政工程设计研究总院.给水排水设计手册(第5册)城镇排水[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [22] 谷晓娟.污水处理厂污水和污泥气力提升系统的研究与应用[D].广州:华南理工大学,2013.
- [23] CONG X, HUI Y. Prediction of the pumping capacity for reverse-flow diverter pumps[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2014, 92(7): 1219-1226.
- [24] DARE A A. Eeperimental investigation of air lift pump[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 12(1): 167-274.
- [25] 唐川林,葛瑞瑞,胡东,等.气力提升系统管道压力实验研究[J].水动力学研究与进展,2016,5(1):37-42.
- [26] ALMALIKY S J B. Effect of suction pipe diameter and submergence ratio on air lift pumping rate[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1036(1): 703-707.
- [27] HOSOKAWA S, FUJIMOTO S, TOMIYAMA A. Gaslift pump making use of phase change of working fluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103(1): 1119-1125.
- [28] SAMARAS V C, MARGARIS D P. Two-phase flow regime maps for air-lift pump vertical upward gas-liquid flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(6): 757-766.
- [29] SHEN X, SCHLEGEL J P, CHEN S, et al. Flow characteristics and void fraction prediction in large diameter pipes[M]. Springer International Publishing, 2014, 26(3): 55-103.
- [30] TANG C, DONG H U, PEI J, et al. Effect of air injector on the performance of an air-lift for conveying river sand[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 122-128.

Research and experiment on the performance of the pipeline air-lift tank-bottom sewage suction equipment

HUANG Da, ZHANG Yulei, ZHANG Haigeng, LI Jingang, GAO Qianqian

(*Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Key laboratory of Fishery Equipment
and Engineering of The Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China*)

Abstract: The air-lift device has the advantages of simple structure and low operating cost, and is widely used in the field of water treatment. In this paper, a theoretical model of the air-lift system is established, and the effects of the intake airflow, the diameter of the lifting riser, the submergence rate, and the cross-sectional surface area of the suction port on the suction flow rate and the suction efficiency of the sewage suction device at the bottom of the pipeline air-lift tank are respectively investigated. Through experiments, the influence law of intake flow, riser pipe diameter, submerged rate, and suction cross-sectional area on the suction flow rate and suction efficiency of the sewage suction device was studied. The experiment shows that the flow velocity and suction efficiency of the suction port has a linear relationship with the intake flow and the submergence rate; under the condition of constant pipe diameter, the flow velocity of the suction mouth decreases with the increase of the cross-sectional area of the suction mouth, and the suction efficiency tends to be stable after the increase of the suction efficiency. Under the working conditions of the intake flow rate of $6 \text{ m}^3/\text{h}$, submersion rate of 0.778, lift riser pipe diameter of 50 mm, and suction cross-sectional surface area of 226 mm^2 , the pipeline-type pneumatic lift pool bottom sewage suction device can achieve optimal performance. This research also provides theoretical guidance for the follow-up equipment research and development, testing and promotion, and application.

Key words: air-lift; sewage suction; suction flow rate; suction efficiency

围栏养殖平台振动实时监测系统设计与试验

邓浩然¹, 崔勇², 关长涛², 于方杰¹

(1 中国海洋大学信息科学与工程学部, 海洋技术学院, 山东 青岛 266100;

2 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要:为实现海上养殖围栏结构振动实时监测, 研发了围栏养殖平台振动实时监测系统。该系统分为监测设备和监测软件两部分。监测设备通过微处理器主板控制三轴加速度计进行围栏柱体结构振动数据实时采集, 并利用 4G-DTU 无线传输至监测软件; 监测软件实现对监测设备所采集数据的实时可视化、存储以及后续下载分析。为验证系统有效性, 布设了两个监测节点对莱州湾大型管桩围栏进行了现场监测试验。试验结果显示: 布设的监测节点可以有效采集围栏结构三轴加速度数据并实时传输至监测软件进行可视化与存储; 同时后续数据分析揭示了试验监测对象莱州湾大型管桩围栏振动基本规律, 其振动主频约为 4 Hz, 振动数值在不同监测节点表现出了明显的空间与时间差异。证明了所研发系统的有效性。

关键词:海上养殖围栏; 振动实时监测; 无线传输; 频谱分析

中图分类号: S969

文献标志码: A

文章编号: 1007-9580(2022)00-0042-007

振动现象普遍存在于自然界, 但在海洋工程项目中, 受环境侵蚀长期影响, 频繁振动往往会致使工程结构材料疲劳从而导致形变影响结构安全^[1-2]。为确保结构安全, 海洋工程结构振动监测必不可少^[3-4]。随着人们对海产品需求的不断提高, 深远海围栏养殖业、深远海网箱养殖业等海洋养殖产业迅猛发展^[5-8]。大型管桩围栏养殖是近年来兴起的离岸养殖重要模式之一, 其具有养殖水体大、鱼类活动空间大、养殖环境更近自然和养殖鱼类品质更近生态等特点^[9-12]。目前, 围栏结构设计和工程技术尚不成熟, 其安全性评估缺乏相关依据, 对应有效的安全监测手段也尚属空白^[13-15]。传统海洋平台振动监测一般采用单轴振动传感器进行数据采集, 并采用人工辅助布设导线的方式进行数据传输, 需要专业的振动数据采集设备以及人员参与, 这种数据采集方式极不方便且成本高昂^[16-18]。同时单轴振动数据无法具体反映围栏结构在复杂海况下的空间振动, 因此, 传统的海洋平台振动监测方法对于围栏养殖平台振动监测并不适用^[19-20]。

针对以上现状, 研发了围栏养殖平台振动实时监测系统。该系统通过嵌入式微处理器主板控制数字型三轴加速度计进行围栏三轴加速度数据采集, 利用 4G 通信装置进行采集数据的实时传输。

1 监测系统架构设计

围栏养殖平台振动实时监测系统架构如图 1 所示, 监测系统包括监测设备和监控软件, 其中单个监测设备由数据采集与传输以及电源模块组成。在监测网络中每个监测设备作为一个独立监测节点, 基于 TCP 通信协议进行数据传输。

在实际监测过程中, 为确保所采集监测数据真实反映柱体结构振动, 监测设备部署时, 需确保监测设备与柱体结构之间形成刚性连接。监测设备部署完毕后在电源模块的支持下, 监测设备将会拥有市电以及锂电池两种供电模式, 以确保在受限制海洋环境下长时间序列的工作能力。最后用户可通过浏览器进入监测终端, 在监测终端可对监测设备所采集三轴加速度数据进行实时可视化以及下载与后续分析。

收稿日期: 2021-12-26

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0900902); 国家自然科学基金(31772898); 国家现代农业产业技术体系(CARS-47); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项资金(2020TD51)

作者简介: 邓浩然(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 海洋物联网监测。E-mail: 763072408@qq.com

通信作者: 崔勇(1980—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向: 渔业工程。E-mail: cuiyong@ysfri.ac.cn

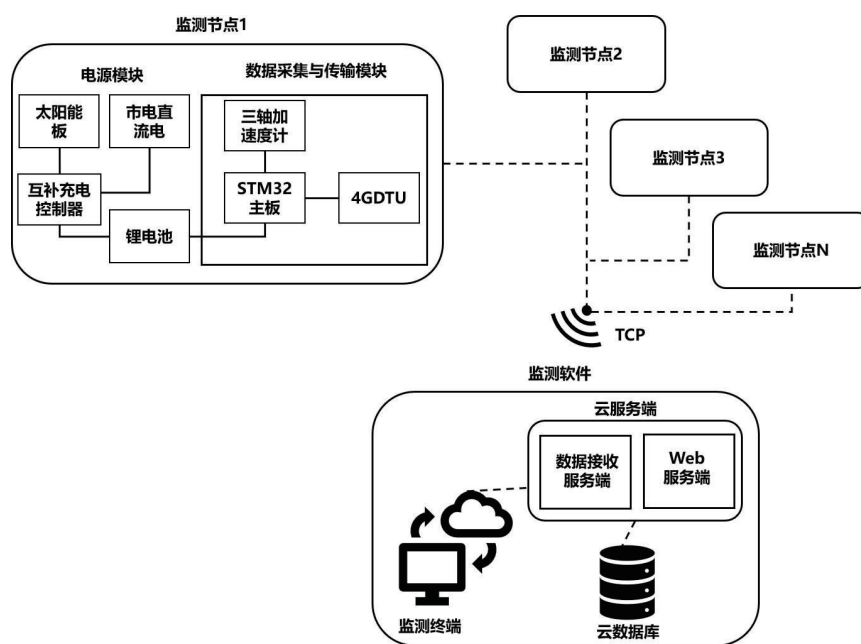


图1 监测架构图

Fig. 1 Monitoring architecture diagram

2 监测设备设计

2.1 监测设备整体设计

监测设备如图2所示,整体由数据采集与传输模块以及电源模块组成。其外壳采用抗盐雾、耐腐蚀适合于海洋工业的IP68级的水密盒子集成封装。



图2 监测设备照片

Fig. 2 Monitor device photo

2.2 数据采集与传输模块

数据采集模块和传输模块由三轴加速度计、

嵌入式微处理器主板以及4G通信装置三部分组成,三部分之间采用RS-485串口总线进行连接。

三轴加速度计采用型号为RION AFK392的单晶硅电容式传感器,其由一片经过微机械处理的硅芯片、用于信号调整的低功率ASIC、用于存储补偿值的微处理器及温度传感器组成。该加速度计基于MEMS技术进行三轴加速度数据采集并利用RS232/RS485等主流数字接口进行输出;采样频率为5~1 000 Hz;量程可达 $\pm 8G$ 。

通信装置采用4G-DTU,支持多种网络制式下的网络透传功能。4G网络透传模式如图3所示。在此模式下用户的串口数据,可以通过通信装置发送到网络上指定的服务器。同时也可以接收来自服务器的监控指令数据,并下发至用户指定设备的串口。在网络透传模式下可以简单、快捷地实现数据采集节点与监控软件之间的双向数据通信^[20-22]。

采用搭载STM32F407高性能处理芯片主板作为嵌入式微处理器主板。该芯片基于ARM Cortex-M4内核架构,具有高性能、低功耗等优势特点。主板上集成多个RS-485串口总线接口以及电压转换模块,可以稳定地控制数据在串口之间传递,并将电源模块提供电压转换成各模块所需电压。根据香农采样定理以及振动频率特点,

只有当采样频率是被测物体固有频率 2 倍才能有效反应其频率特点^[23-24], 这表明振动数据采集是一个相对高频的过程。过高频率数据传输会导致采样数据丢失, 通信时延也会使数据失去实时性。为解决高频振动采样下的数据高频传输问题, 本研究利用微处理器主板中主控芯片缓存数据, 只

有当数据达到指定采样频率, 主板才进行自定义数据协议帧格式封装, 最后传递给通信模块进行无线传输。通过上述流程, 增大了单次数据传输字节, 降低了数据传输频率。基于空间换时间的算法思想充分利用到 4G 通信高带宽的特点, 提高了数据传输的有效性及实时性。

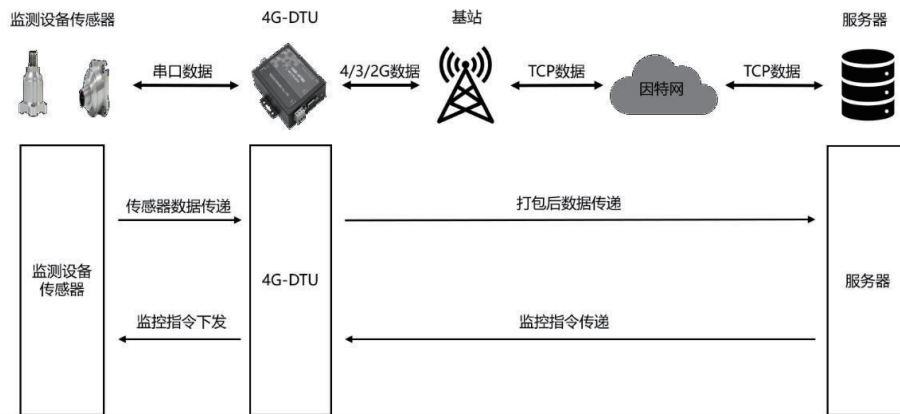


图 3 网络透传模式示意图

Fig. 3 Network transport mode diagram

2.3 电源模块

受海洋环境条件所限, 海洋平台中一般存在电源提供不稳定、电源线布设困难等难题^[25]。为解决这一问题, 本系统监测设备进行了灵活的电源模块设计。电源模块由太阳能板、24 V 锂电池、市电转换器以及市电与太阳能互补充电控制器组成。数据采集与传输模块和电源模块之间采用直流电源线进行连接。监测设备供电来自市电与锂电池, 太阳能板和市电为锂电池提供充电功能。市电与太阳能互补充电控制器则提供市电以及锂电池供电之间的切换和整个电路的充放电保护。通过使用上述电源模块提供了灵活且互补的电源供应能力。该电源模块在有稳定市电提供的情况下可以使用市电, 没有市电的情况下也可采用锂电池和太阳能的组合, 确保了监测设备在受环境限制的围栏养殖平台上的长期工作能力。

3 监测软件设计

监测软件实现对监测设备所采集振动数据的实时接收、可视化及存储。现有主流监测软件开发架构有浏览器/服务器 (B/S), 客户端/服务端

(C/S)^[26-27]。其中 B/S 架构, 客户端支持通过浏览器多端访问, 从而被广泛应用在物联网监测上位机的开发应用中, 但由于数据的存储全部依赖云服务器, 对云服务器的存储资源有较大要求。与之相比 C/S 架构可大量使用缓存而具有更好的性能与流畅性, 目前仍被广泛使用, 但其需要单独安装客户端, 且客户端需要长期在线, 难以做到实时接收与存储效果^[28-30]。

针对以上现状, 为满足对监测设备所采集围栏三轴加速度数据的实时接收、可视化及存储需求, 本研究基于 B/S 架构进行监测软件的开发。技术选型采用 Vue+SpringBoot 的前后端框架, 并采用 Mysql 数据库进行数据存储, Mybatis 作为数据库和后端之间的映射。其主要设计思路为, 后端开发 Web 服务端和数据接收服务端, Web 服务端处理用户在浏览器进行的相关操作逻辑。数据接收服务端即是一个 TCP-Sever 监听监测设备中设定的服务端 Ip 和端口号, 在和监测设备建立连接并接收到监测设备传输来的数据后, 数据接收服务端会将数据进行解析并存储至数据库然后推送到 Web 端进行实时可视化。大容量振动数据的实时存储能力由 Mybatis 以及 Mysql 支持事务的特点提供。最后为降低对服务端存储资源的要

求, Mysql 数据库布设在单独的存储资源充足的云服务器之上,与服务端之间进行远程调用从而完成云数据库的搭建。

4 现场监测试验及数据分析

4.1 试验场地及监测设备布置概况

大型管桩围栏养殖平台位于山东省烟台市莱州湾,其中心点坐标: (37°30'13.60"N, 120°03'

11.30"E),整体由柱桩以及柔性网衣所组成,结构之间形成一个完整环形(面积 12 661 m², 水体 156 996 m³)。采用两台监测设备布置两个监测节点,于 2020 年 11 月 05 日零时至 2020 年 11 月 09 日零时进行了一次为期 4 d 的海上现场试验。两台监测设备采用悬挂式固定在围栏结构之上,其中监测节点 1 朝向开阔海域,监测节点 2 面向海岸(图 4)。

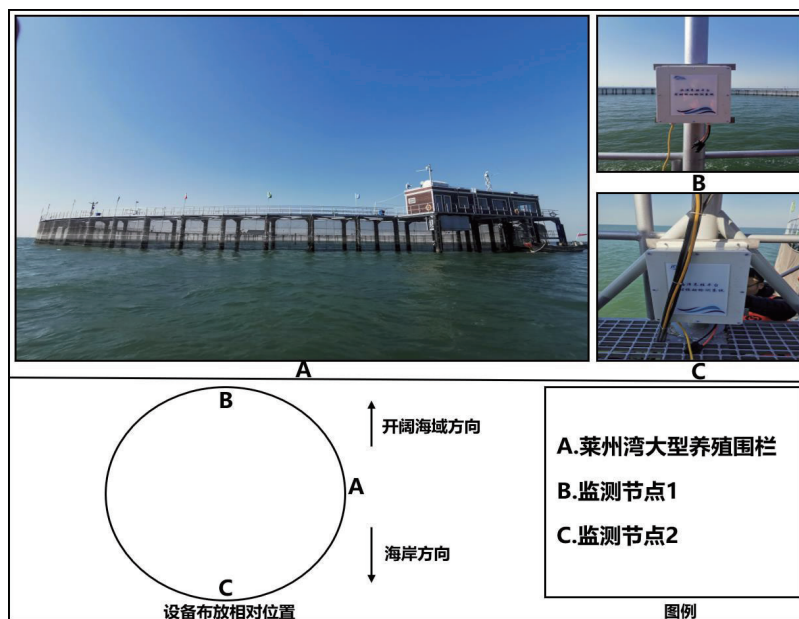


图 4 海上现场试验设备布置概况

Fig. 4 Overview of offshore field test equipment layout

本次试验采用锂电池和太阳能的组合供电,为控制功耗将监测设备采样频率设定为 10 Hz,每采样 10 min 后休眠 10 min。监测设备的固定方式采用不锈钢抱箍固定在围栏之上,使监测设备与围栏之间形成刚性连接。本次试验共采集 4 d 数据,各监测节点每日采样数据总数记录见表 1。

表 1 每日采样数据总数记录

Tab. 1 Daily total sampled data record

采样时间	监测节点	采样数据记录/条
2020-11-05	节点 1	342 200
	节点 2	348 100
2020-11-06	节点 1	311 040
	节点 2	340 610
2020-11-07	节点 1	331 990
	节点 2	341 810
2020-11-08	节点 1	327 360
	节点 2	342 340

4.2 监测数据时序分析

从图 4 可知,监测设备采用悬挂式布放在围栏结构之上,三轴加速度计 Y 轴承受重力加速度影响,在做数据分析时需要进行预处理,将重力加速度施加给 Z 轴。

如图 5 所示,对完整 4 d(2020 年 11 月 05 日零时至 2020 年 11 月 09 日零时)进行预处理过后的围栏加速度数据进行时域可视化。振动产生时监测节点 1 与监测节点 2 处所采集到三轴加速度均有数值且表现出了明显的空间与时间差异。结合图 5 从监测节点所处位置可知,监测节点 1 面向开阔海域更易受海面情况影响从而产生振动。11 月 05 和 11 月 06 的振动数值也直观表现出这一特点,在这两天监测节点 2 处产生的振动数值均较小,而监测节点 1 处各轴都产生了接近 0.5G

加速度的频繁振动,且振动产生时间大多在夜间。其原因可能是这两天夜间海况较差,监测节点 1

处围栏结构频繁受到海况影响从而产生空间振动。

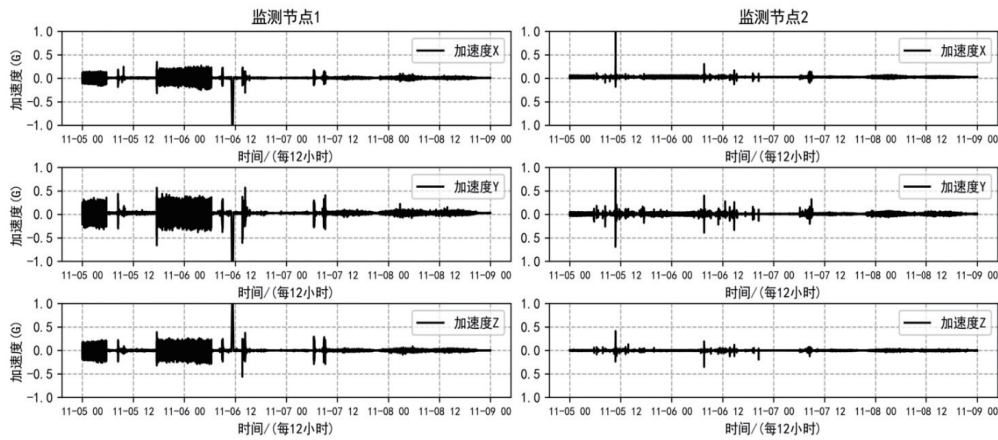


图5 振动监测时序图

Fig. 5 Vibration monitoring time series diagram

与前两日相比,11月07与11月08这两日,监测节点1与监测节点2处所采集的振动数值均表现出振动规律接近、振动数值小的特点。

由此可见,因为振动数值具有明显空间与时间差异,养殖围栏不同区域其材料结构疲劳程度也会具有对应差异,对其结构维护、安全性保障需

要综合考虑这一特点。

4.3 监测数据频谱分析

功率谱密度是结构在随机动态载荷激励下响应的统计结果,是一条功率谱密度值-频率值的关系曲线,能有效反映随机振动其频率特点^[31-33]。振动监测功率谱密度如图6所示。

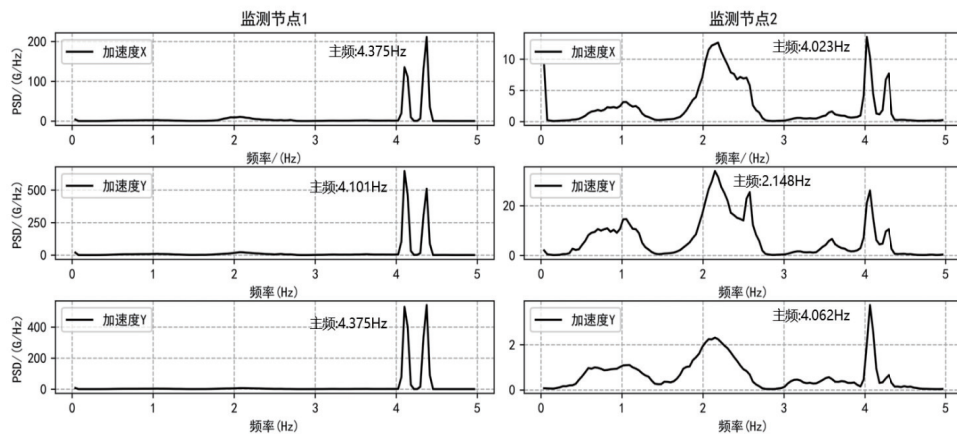


图6 振动监测功率谱密度图

Fig. 6 PSD diagram for vibration monitoring

为降低功率谱能量泄露,常采用 Welch 方法进行功率谱密度分析^[34]。Welch 方法是一种修正周期图功率谱密度估计方法,它通过指定窗函数对数据进行加窗函数处理,从而降低信号中的旁瓣效应减少功率谱能量泄露^[35]。围栏养殖平台振动属于典型随机振动,按照 Welch 方法可以有效分析其振动频率特点。本研究按 Welch 方法

选择“汉宁窗”作为窗函数进行功率谱密度分析。如图6所示,监测节点1和监测节点2所采集数据振动主频接近且 PSD 数值差异明显。

表2中给出了具体振动主频参数,除监测节点2的Y轴振动主频为2.14 Hz外,其余监测节点的各轴振动主频均分布在4 Hz左右,这表明莱州湾大型养殖围栏其围栏结构振动频率是4 Hz

左右的低频空间振动。

表2 振动主频表
Tab. 2 Vibration frequency meter

监测方向	监测节点 1	监测节点 2
X 轴/Hz	4.375	4.023
Y 轴/Hz	4.101	2.148
Z 轴/Hz	4.375	4.062

5 结论

研发了围栏养殖平台振动实时监测系统,克服了传统海洋平台振动监测方法导线布设烦琐、监测振动数据轴向单一无法反映复杂海况下围栏空间振动特点等局限性。通过莱州湾大型养殖围栏海上试验验证了系统的有效性,并初步揭示了试验监测对象基本振动规律及特点。其振动主频约为 4 Hz,不同监测节点在振动数值上表现出了明显的空间与时间差异,面向开阔海域的监测节点对比面向海岸的监测节点表现出持续时间更长且数值更明显的振动,表明围栏结构振动易受海况影响。研发的监测系统具有较高的实用性,可为其他安全监测领域系统设计提供参考。□

参考文献

- [1] 欧进萍,肖仪清,黄虎杰,等. 海洋平台结构实时安全监测系统[J]. 海洋工程,2001(2):1-6.
- [2] 李宏男,高东伟,伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J]. 力学进展,2008(2):151-166.
- [3] 谢卓,张火明,方贵盛,等. 固定式海洋平台的时域振动响应研究[J]. 舰船科学技术,2016,38(15):52-56.
- [4] 桂洪斌,金咸定,肖熙. 海洋平台振动控制研究综述[J]. 中国海洋平台,2003(5):22-28.
- [5] 秦宏.“蓝色粮仓”建设相关研究综述[J]. 海洋科学,2015,39(1):131-136.
- [6] 张守都,李友训,姜勇,等. 海洋强国背景下我国发展现代海水养殖业路径分析[J]. 海洋开发与管理. 2021,38(11):18-26.
- [7] 石建高,余雯雯,卢本才,等. 中国深远海网箱的发展现状与展望[J]. 水产学报,2021,45(6):992-1005.
- [8] 石建高,余雯雯,赵奎,等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展[J]. 水产学报,2021,45(3):472-485.
- [9] 桂福坤,祝含接,冯德军. 海洋养殖网衣水动力特性研究进展[J]. 渔业现代化,2019,46(5):9-14.
- [10] 石建高. 养殖网围用的立柱桩:CN201310347972.3[P]. 2013-12-11.
- [11] 石建高. 一种大型网围立柱桩和网衣的连接方法:

- CN201310347866.5[P]. 2013-12-25.
- [12] 王磊,王鲁民,黄艇,等. 柱桩式铜合金围栏网养殖设施的发展现状与分析[J]. 渔业信息与战略,2017,32(3):197-203.
- [13] 辛晓辉,王晓蕾,胡晓明,等. 海上平台栏杆结构设计规范探讨[J]. 天津科技,2020,47(10):26-28.
- [14] 周文博,石建高,余雯雯,等. 中国海水围网养殖的现状与发展趋势探析[J]. 渔业信息与战略. 2018,33(4):259-266.
- [15] 石建高. 深远海生态围栏养殖技术[M]. 北京:海洋出版社,2019:170-222.
- [16] SURACEC. Damage assessment of structures using only post-damage vibration measurements[J]. Key Engineering Materials, 2013,569-570:11-22.
- [17] YI T H, LI H N, GUM. Optimal sensor placement for structural health monitoring based on multiple optimization strategies[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2011, 20(7):881-900.
- [18] 徐文,鄢社锋,季飞,等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述[J]. 中国科学(信息科学), 2016, 46(8):1053-1085.
- [19] ZHOU D, YU Y, WANGJ, et al. Design and validation of a fast wireless low-frequency vibration inspection system for offshore platform structures[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2019, 39(3):720-728.
- [20] 黎明,陈泉,周琳,等. 海洋平台监测系统方法及:CN201710119854.5[P]. 2019-04-26.
- [21] 路荣坤,陈忠孝,秦刚,等. 基于 4G-DTU 水质监测系统的设计[J]. 机械与电子,2018,36(1):58-61.
- [22] 傅纬球,胡兵. DTU 透传模式研究[J]. 科技信息,2011(3):490-492.
- [23] LONG J F, HAN Y J, YE P X. Recent progress of shannon sampling theory with applications[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,529:354-358.
- [24] 戴琼海,付长军,季向阳. 压缩感知研究[J]. 计算机学报, 2011,34(3):3425-3434.
- [25] 李雪,张安安,敬佳佳,等. 海上平台电力系统研究综述[J]. 电网与清洁能源,2016,32(2):1-7.
- [26] 张友生,陈松乔. C/S 与 B/S 混合软件体系结构模型[J]. 计算机工程与应用,2002(23):138-140.
- [27] 张淑荣,苏兵. C/S 与 B/S 两种软件体系结构[J]. 电脑学习,2010(6):126-135.
- [28] 林伟婷. C/S 与 B/S 架构技术比较分析[J]. 科技资讯,2018,16(13):15-16.
- [29] 王辉,王敬华,徐丙垠,等. 基于 B/S 架构的分布式电源并网监控系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14):160-165.
- [30] 王磊,王皓. 基于 C/S 架构的机场地理信息系统的设计与实现[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(3):68-72.
- [31] 纪国宜,赵淳生. 振动测试和分析技术综述[J]. 机械制造与自动化,2010,40(3):1-5.
- [32] 郑志国,王宇峰. 随机振动中的参数介绍及计算方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(6):45-48.

- [33] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1907-1915.
- [34] 邢晓晴, 朱根民. Welch 功率谱估计中窗函数的选择与算法分析[J]. 计算机时代, 2018(2): 1-4.
- [35] 刘宝洲. 周期图法功率谱估计及其改进算法的研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 76-79.

Design and experiment of real-time vibration monitoring system for aquacultural enclosure platform

DENG Haoran¹, CUI Yong², GUAN Changtao², YU Fangjie¹

(1 College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering,
Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

2 Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: To realize the real-time vibration monitoring of vibration of mariculture enclosure structure, a real-time vibration monitoring system of the fence aquaculture platform was developed. The system is divided into monitoring equipment and monitoring software. The monitoring device controls the three-axis accelerometer through the microprocessor main board to collect the vibration data of the maricultural enclosure in real-time and transmits it to the monitoring software wirelessly using 4G-DTU. Monitoring software enables real-time visualization, storage and subsequent download analysis of data collected by monitoring devices. To verify the effectiveness of the system, two monitoring nodes were deployed to conduct field tests on the maricultural enclosure platform in Laizhou Bay. The results show that the deployed monitoring nodes can effectively collect the three-axis acceleration data of the maricultural enclosure structure and transmit them to the monitoring software for visualization and storage in real-time. Meanwhile, the subsequent data analysis reveals that the vibration pattern of the maricultural enclosure platform in Laizhou Bay, the main frequency of vibration is about 4 Hz, and the vibration values show obvious spatial and temporal differences at different monitoring nodes. The effectiveness of the developed system is proved.

Key words: maricultural enclosure; vibration real-time monitoring; wireless transmission; spectrum analysis

虹吸式吸鱼泵的水动力学特性研究

田昌凤^{1,3}, 吴凡¹, 车轩^{1,2}, 刘兴国^{1,2}, 张俊³, 陈晓龙¹

(1 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室, 上海 200092;

3 上海海洋大学工程学院, 上海, 201306)

摘要: 针对国内吸鱼泵产品匮乏、研发周期长等问题, 以现有的一种虹吸式吸鱼泵为研究对象, 应用计算流体力学(CFD)数值计算模拟了3种不同进水速度下(1 m/s、1.5 m/s、2 m/s)吸鱼泵内的三维水流场, 得到了其内部流动特性, 包括速度分布、涡流黏度、压力分布等, 同时结合试验测试结果验证数值计算的有效性。结果显示: 随着进口速度的增加, 压强、流速都呈现增大的趋势, 且压强最大处主要集中在吸鱼泵出口侧上端, 该处会对鱼体产生一定的冲击, 此外来流撞到吸鱼泵壁面后形成回流, 回流落点处也容易对鱼体产生二次损伤; 当进口速度为1 m/s时, 吸鱼泵底部壁面的流速模拟值为0.13 m/s, 试验值为0.15 m/s, 吸鱼泵样机试验结果和数值模拟结果相差约为13.3%, 验证了计算结果的有效性。该研究为吸鱼泵后续的研发和设计提供了重要依据和参考。

关键词: 虹吸式; 吸鱼泵; 数值计算; 水动力学; 捕捞

中图分类号: S238

文献标志码: A

文章编号: 1007-9580(2022)06-0049-008

在全球渔业资源日益匮乏的形势下, 水产养殖业的高效发展关系到人类社会的可持续发展, 越来越受到研究人员的广泛关注^[1-2]。2021年, 世界水产品产量超过2亿t, 而中国淡水鱼类总产量约占全球的33%, 并且是世界上唯一养殖产量高于捕捞产量的国家, 而池塘养殖产品是中国水产品总产量的主要组成部分^[3-5]。2020年, 中国池塘水产养殖面积约262万hm², 养殖产量2200多万t^[6], 而池塘养殖的捕捞方式还相对原始, 基本靠人工完成^[7-8]。因此, 池塘养殖生产亟需机械化自动化捕捞系统装备, 吸鱼泵已成为渔业机械研究的重要方向。

20世纪四五十年代, 美国、挪威、法国、日本等渔业发达国家的网箱养殖蓬勃发展^[9-12], 与之相配套的吸鱼泵的研究取得了重要进展, 研发了离心式吸鱼泵、真空式吸鱼泵、空气扬升式吸鱼泵和射流式吸鱼泵^[13-18], 助推了网箱养殖产业的发展。为了研发适合池塘使用的吸鱼泵, 研究者们研发了真空式吸鱼泵和射流式吸鱼泵, 但仍存在能耗高, 输送效率等问题, 并对鱼有一定的损

伤^[19-22]。吸鱼泵内部复杂的水力因素和剪切层是造成鳞片脱落的主要原因^[23-24]。而吸鱼泵内部的撞击、低压环境以及吸鱼泵内部的压力梯度是鳃盖损伤、鱼鳔破裂、肝脏肾脏受损和鱼游动平衡破坏的主要原因^[25-26]。

此外, 降低能耗也是吸鱼泵研究的重点, 影响吸鱼泵能耗的因素主要有工作方式、鱼水比以及输送管道的阻力损失。研究显示, 射流式吸鱼泵的单位质量能耗为1.51 kW·h/t, 离心式吸鱼泵的单位质量能耗为0.5~0.93 kW·h/t, 真空式吸鱼泵为0.5~0.6 kW·h/t, 虹吸式吸鱼泵的单位质量能耗为0.3~0.4 kW·h/t可见虹吸式吸鱼泵单位质量能耗最小^[8, 31]。为了进一步提高吸鱼泵的性能, 研究者们利用高速摄影技术、图像处理技术等方法探索了速度梯度、压力梯度以及机械结构对吸鱼泵性能的影响, 相继攻克了众多技术难题, 有效解决了吸鱼泵的输送性能低和损伤大的问题^[15-18]。然而, 池塘养殖的养殖品种和运行工况有别于网箱养殖, 并且传统的试验研究周期长, 研究成本高, 针对研发适用于池塘养殖的鲜活

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 现代农业产业技术体系国家大宗淡水鱼产业技术体系(CARS-45)

作者简介: 田昌凤(1985—), 女, 副研究员, 研究方向: 渔业设施与装备。E-mail: tianchangfeng@fmiri.ac.cn

通信作者: 吴凡(1973—), 男, 研究员, 研究方向: 渔业设施与装备。E-mail: wufan@fmiri.ac.cn

鱼类的输送的吸鱼泵的迫切需求,利用 CFD 数值模拟技术能够有效缩短吸鱼泵的设计时间以及成本,实现了高效吸鱼泵的设计优化。

本研究运用数值模拟技术研究了一种虹吸式吸鱼泵内部的水动力学特性,系统分析了吸鱼泵轴向对称面以及轴向对称面上不同检测线和不同监测点上的速度分布,压强分布以及涡流黏度分布特性,寻找损伤鱼类的关键部位,以期降低吸鱼泵的能耗和对鲜活水产品的损伤。研究结果对吸鱼泵的开发和设计提供了重要的理论指导,具有重要的科学意义。

1 数值计算方法

1.1 计算模型

如图 1 所示,数值计算模型根据中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所研发的虹吸式吸鱼泵进行三维建模,吸鱼泵外腔直径为 0.6 m,内腔直径为 0.584 m,壁厚 0.008 m,长 1.6 m。其中吸鱼泵入口位于右侧顶端,入口直径为 0.2 m,出口位于左侧底端,出口直径为 0.16 m。

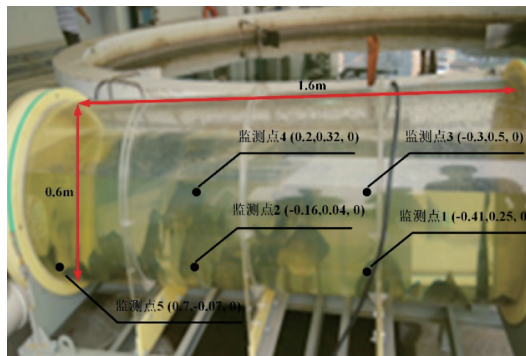


图 1 物理模型和试验布置

Fig. 1 Physical model and experiment layout

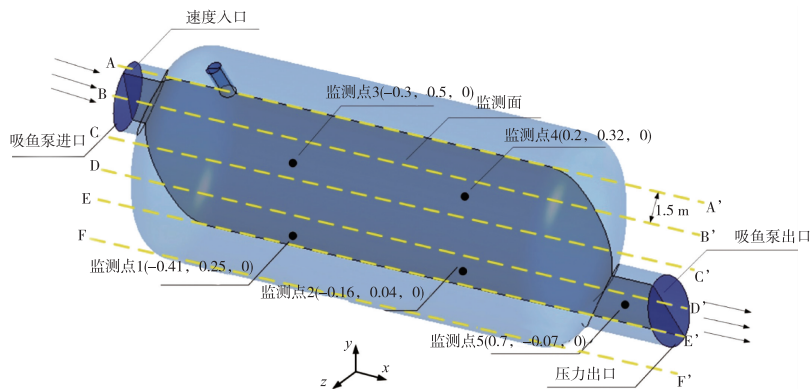


图 3 虹吸式吸鱼泵计算模型

Fig. 3 Calculation model of siphon fish pump

如图 2 所示,虹吸式吸鱼泵的工作原理是吸鱼泵内部注满水后,开始抽吸活鱼,直到吸鱼泵内部活鱼达到一定的密度后,排出鱼水混合物,排净后再次注满水后开始抽吸。这种工作方式和工作环境有两个优势,一是连续作业时间长,泵内鱼水混合的比例可以达到 2:1 甚至更高,有效提高了虹吸式吸鱼泵的输送能力;二是吸鱼泵内部注满水后再抽吸活鱼,有别于传统的无水抽吸,吸鱼泵内部的水体起到有效的缓冲作用,减少鱼体碰撞泵体,从而较少鱼体的损伤。

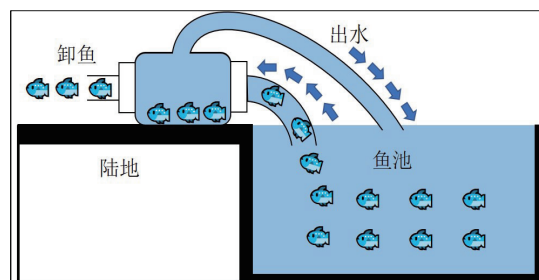


图 2 吸鱼泵的工作原理

Fig. 2 Working principle of fish pump

图 3 为虹吸式吸鱼泵的流场模型,选取虹吸式吸鱼泵轴向对称面建立直角坐标系,其中 x 方向为吸鱼泵轴向方向,向下为正, y 方向为 z 轴垂直的方向,重力加速度方向为 y 方向。为了研究吸鱼泵内部的流动特性,取吸鱼泵轴向对称面为监测面以及对称面上的 AA'、BB'、CC'、DD'、EE'、FF' 6 条线为监测线和点 1、点 2、点 3、点 4、点 5 为监测点。将吸鱼泵入口设为速度入口边界,吸鱼泵壁面设为无滑移固壁边界,吸鱼泵顶部出口和底部出口均设为压力出口边界。

1.2 数值计算方法

该流场连续性的和不可压缩的混合流体相,该流动过程满足连续性方程和动量守恒方程。充分考虑涡流和低雷诺数对湍流的影响,采用重整化群(RNG)k- ε 两方程模型为湍流模型,与之相关的连续性方程、动量方程、k- ε 输运方程分别为^[23-24]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + S_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + S_z \quad (4)$$

式中: p 为流体压力, F 为单位质量流体所受外力, F_x 、 F_y 、 F_z 是其在 x 、 y 、 z 方向上的分量, τ 为流体的黏性应力, τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 、 τ_{zz} 为其在对应 x 、 y 、 z 方向上的张量分量, S 为流体质量源, S_x 、 S_y 、 S_z 是其在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

标准k- ε 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = p - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中: x_i 是空间点上的坐标, u_i 为在时间 t 坐标下的速度分量, $i=1,2,3$ 。两方程的k- ε 湍流模型系数为: $c_\mu=0.09$ 、 $C_{\varepsilon 1}=1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, v 为流动速度矢量, u 、 v 、 w 是其在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

动量方程:

2 结果与分析

2.1 吸鱼泵监测面上流动特性分析

在输送过程中,压强分布是评估活鱼是否损伤的重要指标,不同进口速度下监测面上的压力分布如图3所示。从计算结果可以看出,随着进口速度的增大,压强呈现增大的趋势,不同进口速度下,压强在 $1.01 \times 10^5 \sim 1.09 \times 10^5$ Pa范围内变化,整体变化范围不大;不同进口速度下监测面上速度矢量图如图4所示,可以看出流体从吸鱼泵入口进入后,由于具有初速度以及自身惯性的作用下首先冲击至吸鱼泵腔体出口处的顶端壁面,然后由于壁面的反作用力形成了沿腔体轮廓方向的回流,最后在自身重力的作用下落至靠近出口处底端。

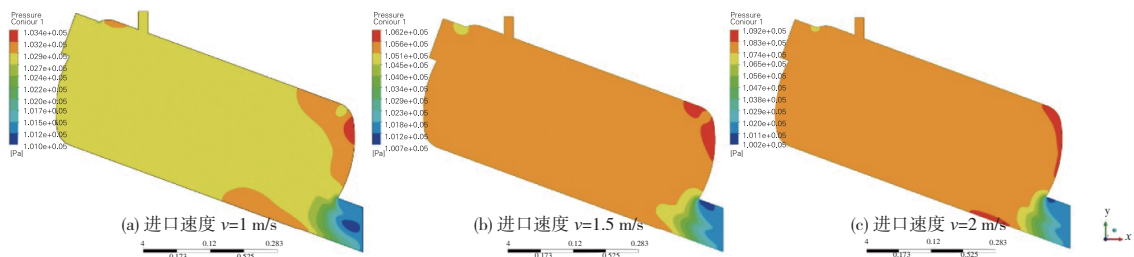


图4 监测面上的压力云图

Fig. 4 Pressure contour on monitoring surface

随着进口速度的增大,吸鱼泵出口侧顶端的回流现象越明显,且流速在 $0.5 \sim 1.98$ m/s范围内变化。压强最大处主要集中在吸鱼泵出口侧腔体顶端,该处对鱼体损伤最大,其次是来流撞到吸鱼泵壁面后形成回流,回流落点处容易对鱼体产生二次损伤。涡流黏度是表征湍流特性的一个重

要参数,与流动的紊动特性紧密相关。不同速度下吸鱼泵内部涡流黏度分布图如图5所示。结果表明随着来流速度的增加靠近吸鱼泵出口端的壁面涡流黏度增大,结合图4说明涡流黏度越大越容易形成涡流/回流,同时也说明该处湍流强度较大,流动紊乱,不利于活鱼运输。

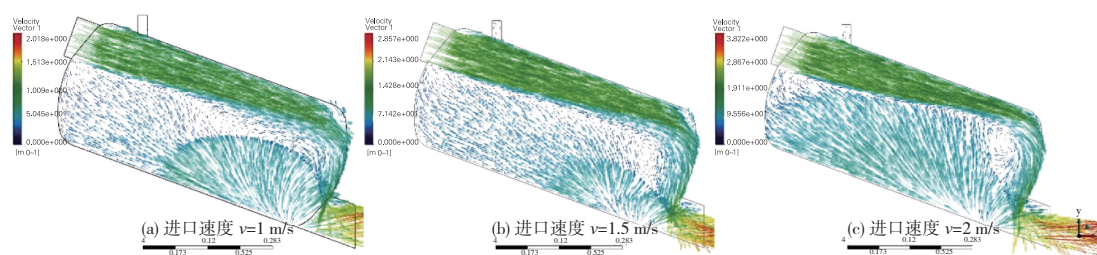


图 5 监测面上的速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector on monitoring surface

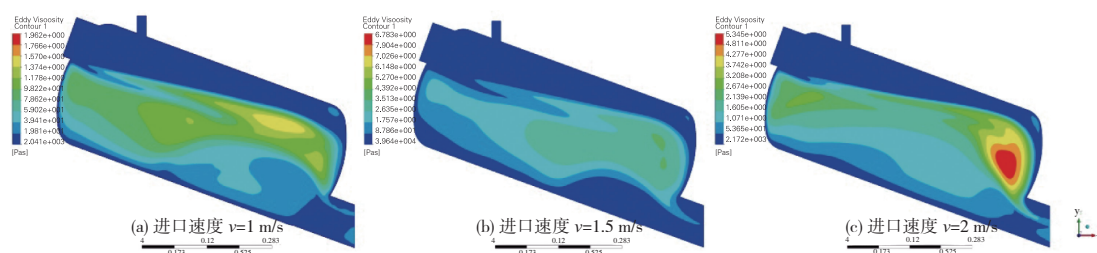


图 6 监测面上的涡流黏度分布图

Fig. 6 Eddy viscosity on monitoring surface

2.2 吸鱼泵内不同监测线的流动特性分析

为进一步研究吸鱼泵内部流动特性,对不同进口速度下,吸鱼泵内部 AA'、BB'、CC'、DD'、

EE'、FF' 6 条监测线上的速度、压力作为纵坐标得到该线上的速度特性、压力分布特性,具体结果如图 7 和图 8 所示。

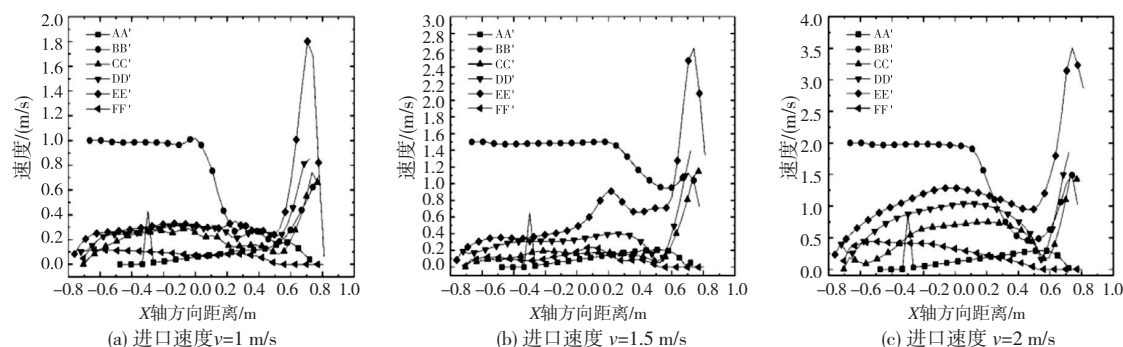


图 7 监测线上速度分布曲线

Fig. 7 Velocity distribution curve on monitoring line

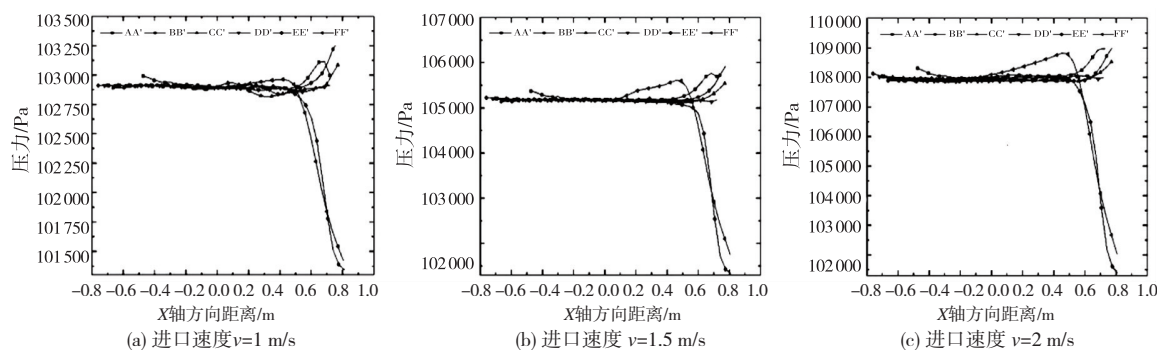


图 8 监测线上压力分布曲线

Fig. 8 Pressure distribution curve on monitoring line

计算结果显示:监测线 BB' 上速度相对较大,从进水口到监测线中部,速度基本稳定不变速度大小近似等于进水口速度,在中后段逐渐减少,到右端突然增加后又减少;当速度为 1 m/s 时,监测线 AA' 和 FF' 上从左端到右端,速度先增加后减小,监测线 CC'、DD'、EE' 上从左端到右端,速度先增大后减小,靠近右端又突然增加;当速度为 1.5 m/s 和 2 m/s 时,检测线 EE' 上的速度大小与 BB' 趋势一致;随着进口速度的增加,吸鱼泵顶部和底部的监测线 AA'、FF' 上的速度分布相对稳定,基本上不随着 X 距离变化发生改变,但吸鱼泵内部检测线 BB'、CC'、DD' 上的流速逐渐增加,监测线 EE' 上的流速线增加后又急速降低。

吸鱼泵内部压力分布是评估活鱼运输过程中鱼体损伤的一个重要标准。不同来流条件下监测线上压力分布曲线如图 8 所示。计算结果显示:不同进口速度下,AA'、BB'、CC'、DD'、EE'、FF' 6 条监测线上的压力变化趋势基本一致; $X = -0.8 \sim 0.5$ 范围内,检测线 AA'、BB'、CC'、DD'、EE'、FF' 上压强变化不明显;在 $X = 0.5 \sim 0.8$ 范围内,检测线 AA'、BB'、CC'、DD' 上的压强逐步增加,最大值约为 1.09×10^5 Pa,检测线 EE'、FF' 上的压强急剧降低,最小值约为 1.0×10^5 Pa;计算结果显示靠近出水口压力相对不大,而靠近吸鱼泵右端端面附近压力较大,可能与来流冲击形成回流,

流动紊乱,导致附近压力场局部变大,这为吸鱼泵后续的研发和设计提供了重要的依据。

2.3 吸鱼泵内监测点上的流动特性分析

为进一步研究吸鱼泵内部流动特性随时间变化的关系,在吸鱼泵内部取适当的点进行监测如图 3 所示,并提取该点上的相关流动特性参数,如速度、压力以及涡流黏度。以流动时间作为横坐标,将该曲线上的速度、压力、涡流黏度作为纵坐标得到该线上的速度特性、压力分布特性、涡流黏度特性。

在不同进水速度情况下,不同监测点上的速度分布如图 9 所示,从计算结果可以得出吸鱼泵出水口监测点 5 上的流速相对较大,其他测点上的速度大小差异不大;随着进口速度的增加,各个监测点上的速度随之增加;从流动趋势来看,各个监测点上的流速相对稳定,未出现较大的波动,速度随着时间的增加,基本是先增加,后减少,逐步趋于稳定。

在不同进水速度情况下,不同监测点上的压强计算结果如图 10 所示,计算结果显示吸鱼泵出口处监测点 5 压强相对较小,其他监测点处的压强相对较大;随着时间的推移,各个监测点上的压强先急剧增加,后趋于稳定;随着速度的增加,各个监测点上的压强随之增大,出口处压强基本维持在 $1.010 \times 10^5 \sim 1.035 \times 10^5$ Pa。

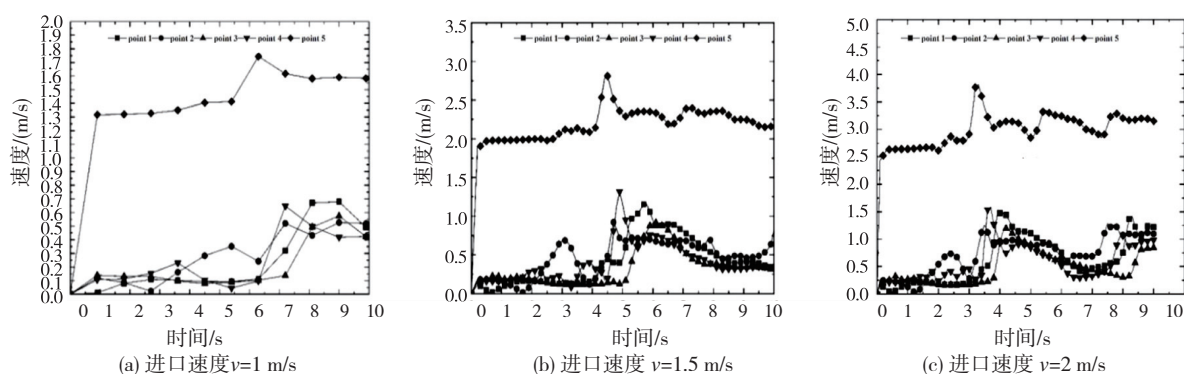


图9 监测点上速度分布曲线

Fig. 9 Velocity distribution curve at monitoring points

涡流黏度是表征湍流特性的一个重要参数,与流动的紊动特性紧密相关。涡流黏度的计算结果如图 11 所示,可以看出监测点 4 的涡流黏度相对较大,其次是监测点 3 和监测点 5,监测点 1 和监测

点 2 的涡流黏度最小。计算结果表明监测点 4 处的流动紊乱,这主要是该处存在明显的回流现象;监测点 1 和监测点 2 处流速分布较稳定,波动较小,说明吸鱼泵底部流动稳定,对鱼体损伤较小。

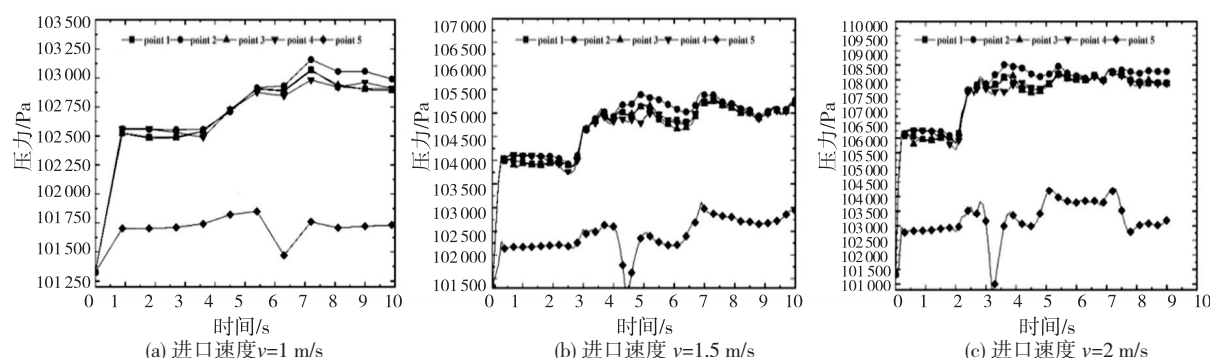


图 10 监测点上压强分布曲线

Fig. 10 Pressure distribution curve at monitoring points

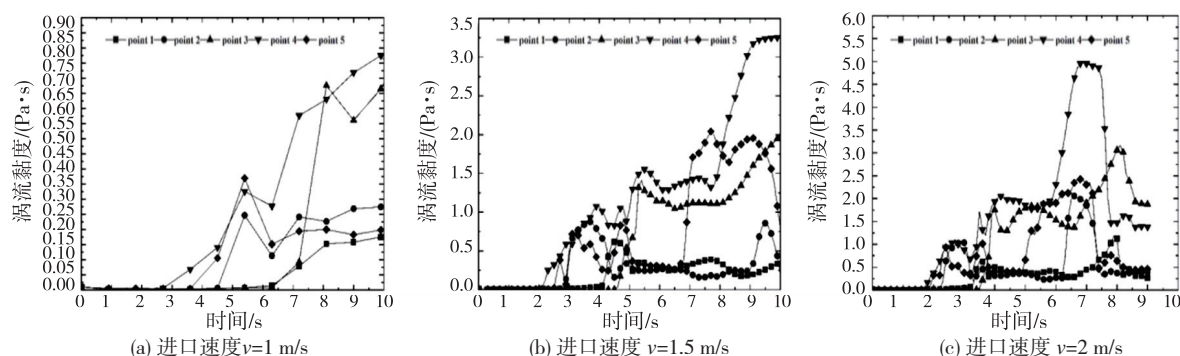


图 11 监测点上涡流黏度分布曲线

Fig. 11 Eddy viscosity curve at monitoring points

2.4 数值结果有效性验证

样机试验在中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所中试基地完成,试验模型如图 1 所示。为验证上述数值计算的有效性,设置图 3 中的监测平面上 5 个监测点(Point 1、Point 2、Point 3、Point 4、Point 5),其坐标分别 $(-0.41, 0.25, 0)$ 、 $(-0.16, 0.04, 0)$ 、 $(-0.3, 0.5, 0)$ 、 $(0.2, 0.32, 0)$ 、 $(0.7, -0.07, 0)$ 。在进口速度是 1 m/s 的情况下,虹吸式吸鱼泵稳定工作后,采用 LSH10-1M 型微型多普勒流速仪测定内部的点 1、点 2、点 3、点 4、点 5 处的流速。

表 1 分别为监测点 1、2、3、4、5 上的数值模拟与试验结果,可以看出监测点 1 处的试验结果与数值结果误差最大,误差为 13.3%,其次是监测点 2 和点 4 处的试验结果与数值结果,误差为 11.9%,而监测点 3 和 5 处的试验结果与数值结果误差较小,分别为 4.8% 和 3.7%。此外,可以发现点 5 处的流速最大,而靠近吸鱼泵壁面处的监测点处流速较低,即涡流区和出水口处流速较

大。试验结果表明数值计算结果准确有效。

表 1 平均流速数值模拟与试验数据

Tab. 1 Numerical simulation and test datum

测试点	模拟值/(m/s)	试验值/(m/s)	流速误差分析/%
点 1	0.13	0.15	13.3
点 2	0.32	0.35	9.38
点 3	0.20	0.21	4.8
点 4	0.37	0.42	11.9
点 5	1.56	1.62	3.7

3 结论

在不同进口速度下,虹吸式吸鱼泵内压强变化幅度不大,压强最大处主要集中在吸鱼泵右上方,该处对鱼体损伤最大;吸鱼泵内部出口侧顶端的涡流黏度最大,容易形成涡流,涡流落点处容易对鱼体产生二次损伤。随着进口速度的增加,压强、流速和涡流黏度都呈现增大的趋势;随着进口速度的增大,内部流场的流动紊乱程度也在增强;

出水口处压力相对不大,而靠近吸鱼泵右上端壁面附近压力较大。吸鱼泵试验结果和数值模结果最大误差为13.3%,最小误差为3.7%,验证了计算结果的有效性。本研究对吸鱼泵的开发和设计提供了参考,具有一定的科学意义。后续的研究中应考虑活鱼对吸鱼泵内流场的影响以及研究不同种类鱼类对输送性能的影响。□

参考文献

- [1] LU G Q, LUO M K. Genomes of major fishes in world fisheries and aquaculture: Status, application and perspective [J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2020(5):163-173.
- [2] 彭乐威, 闫周府, 杨正勇. 新发展理念视角下中国渔业现代化发展水平评价及障碍因素研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2022, 44(3):166-175.
- [3] GAO S R, TONG X, WU L H. Issues and development opportunities of aquatic product industry in China[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011(18):87-91.
- [4] 熊敏思, 缪圣赐, 李励年, 等. 全球渔业产量与海洋捕捞业概况[J]. *渔业信息与战略*, 2016, 31(3):218-226.
- [5] 岳东东, 吴仙方, 徐乐俊等. 中国淡水养殖业绿色发展评价研究[J]. *渔业信息与战略*, 2022, 37(2):79-87.
- [6] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022:21-4.
- [7] 郭喜庚, 谭细畅. 吸鱼泵的主要结构型式及应用前景分析[J]. *渔业信息与战略*, 2013, 28(3):214-218.
- [8] 刘健, 钱晨荣, 黄洪亮, 等. 国内外吸鱼泵研究进展[J]. *渔业现代化*, 2013, 40(1):57-62.
- [9] Inventive marine products limited of canada. canavac fish pumps [EB/OL]. (2012-11-20). <http://inventivemarine.com/canavac>.
- [10] Environmental technologies incorporated of america. fish transfer system [EB/OL]. (2012-11-20). <http://www.transvac.com>.
- [11] WINTEC POLSKA. Wintec Aqua has developed a new control system on dual-tank pumps [EB/OL]. (2014-2-15). <http://www.Wintec.dk/products/38>.
- [12] VAKI. Aquaculture systems limited of iceland: heathro fish pump [EB/OL]. (2012-10-23). <http://www.seaquest.ie>.
- [13] 陈晓龙, 田昌凤, 刘兴国, 等. 吸鱼泵的研究进展与发展建议[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(4):7-11.
- [14] 王伟. 大型远洋围拖网渔船吸鱼泵设计与研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学,
- [15] 徐茂森, 黄斌, 牟介刚, 等. 高速摄影技术分析射流式鱼泵流量对鱼运动规律影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17):74-78.
- [16] 刘世晶, 涂雪莹, 田昌凤, 等. 基于机器视觉的吸鱼泵过鱼量计数系统试验研究[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(17):74-78.
- [17] 刘平. 基于 ANSYS CFX 的吸鱼泵的内部流场分析[J]. *流体机械*, 2014, 42(11):43-46.
- [18] 楚树坡, 湛志新, 谭永明, 等. 基于 SolidWorks 的双流道吸鱼泵三维实体造型研究[J]. *渔业现代化*, 2018, 45(3):55-60.
- [19] 田昌凤, 陈晓龙, 车轩, 等. 养殖池塘单罐真空式吸鱼泵的设计和试验[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(5):39-44.
- [20] 徐茂森, 龙新平, 祝叶, 等. 射流式鱼泵输送草鱼的性能研究[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(1):117-123.
- [21] 单建军, 管崇武, 宋红桥, 等. 基于主成分分析的吸鱼泵对鱼类损伤评价方法[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(29):1-6.
- [22] 吴宁, 李莉, 侯杰, 等. 射流式鱼泵胁迫下草鱼的应激响应[J]. *华中农业大学学报*, 2016, 35(5):75-83.
- [23] DAI D, FANG H, LI S, et al. Numerical simulation of fish movement behavior for habitat assessment by Eulerian-Eulerian-Habitat-Selection (EEHS) method [J]. *Ecological Modeling*, 2016, 337:156-167.
- [24] DANESHVAR F, NEJADHASHEMI A P, WOZNICKI SA, et al. Applications of computational fluid dynamics in fish and habitat studies[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2017, 17(1):53-62.
- [25] 吴宁, 李莉, 侯杰, 等. 射流式鱼泵胁迫下草鱼的应激响应[J]. *华中农业大学学报*, 2016, 35(5):75-83.
- [26] LONG X P, XU M S, LI Y Q, et al. Impact of the internal flow in a jet fish pump on the fish[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 126:313-320.
- [27] LONG X P, ZENG Q L, YANG X L, et al. Structure optimization of an annular jet pump using design of experiment method and CFD [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 15(5):052020.
- [28] XIAO L Z, LONG X P, WU W, et al. Numerical investigation on the impact of the converging angle of the suction chamber on annular jet pumps [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2013, 52(7):072016.
- [29] YANG X L, LONG X P, KANG Y, et al. Application of constant rate of velocity or pressure change method to improve annular jet pump performance[J]. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2013, 6(3):137-143.
- [30] SRIVASTAVA A S, OOHARA I, SUZUKI T, et al. Purification and properties of cytosolic alanine aminotransferase from the liver of two freshwater fish, *Clarias batrachus* and *Labeo rohita* [J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part B Biochemistry & Molecular Biology*, 2004, 137(2):197-207.
- [31] 徐茂森, 龙新平, 牟介刚, 等. 喉管与喷嘴截面积比对射流式鱼泵输送性能及鱼损的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9):285-290.

Research on hydrodynamic characteristics of siphon fish pump

TIAN Changfeng^{1,3}, WU Fan¹, CHE Xuan^{1,2}, LIU Xingguo^{1,2}, ZHANG Jun³, CHEN Xiaolong¹

(1 *Fishery Machinery and Instrument Research Institute,*

Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2 Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China;

3 College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To solve the problems of lack of domestic fish pump products, long development cycle, and so on, taking the existing siphon fish pump as the research object, the CFD numerical calculation method was used to simulate the three-dimensional flow field in the fish pump under three different influent speeds (1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s), and the internal flow characteristics including velocity distribution, eddy viscosity, and pressure distribution were obtained. At the same time, the validity of the numerical calculation was verified by the experimental results. The results show that the pressure and flow velocity show an increasing trend with the increase of the inlet velocity, and the maximum pressure is mainly concentrated at the upper end of the outlet side of the fish suction pump, which will have a certain impact on the fish. In addition, the incoming flow collides with the wall of the fish suction pump to form reflux, and the reflux landing point is also prone to secondary damage to the fish. When the inlet velocity is 1 m/s, the velocity of the bottom wall of the suction pump is 0.13 m/s, and the experimental value is 0.15 m/s. The difference between the experimental results and the numerical simulation results is about 13.3%, which verifies the effectiveness of the calculation results. The research results provide an important basis and reference for the subsequent research and design of the fish suction pump.

Key words: siphon; fish pump; numerical computation; hydrodynamics

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.008

绿鳍马面鲀幼鱼游泳运动及能量代谢的初步研究

党保成^{1,2}, 陈四清¹, 李雪梅¹, 孙宇潇³, 李凤辉¹, 葛建龙¹, 孙以康¹,
李美帅¹, 常青¹, 边力¹

(1 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与

食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071;

2 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

3 浙江大学动物科学学院, 浙江 杭州 316022)

摘要:研究鱼类的游泳运动对于指导实际生产具有重要的参考价值。本试验通过自制游泳装置来研究在不同体质量(10、15、20和25 g)和不同温度(12、16、20、24和28℃)下幼鱼的游泳能力及行为,并探讨在0.12、0.24、0.36和0.48 m/s流速下的幼鱼随时长的代谢情况。结果显示:4个规格幼鱼的临界游泳速度(U_C)分别为 0.42 ± 0.03 、 0.47 ± 0.01 、 0.53 ± 0.03 和 0.62 ± 0.01 m/s,爆发游泳速度(U_B)分别为 0.53 ± 0.06 、 0.56 ± 0.02 、 0.60 ± 0.02 和 0.72 ± 0.01 m/s。幼鱼 U_C 和 U_B 随体质量增加游泳能力显著提高。5个温度组下25 g幼鱼的 U_C 和 U_B 随温度的升高呈上升后下降趋势,24℃时 U_C 和 U_B 达到最大值且与其他组差异显著($P < 0.05$)。随着流速的增加尾鳍、背鳍和臀鳍的摆动频率不断加快,摆尾频率的4个流速组之间差异显著($P < 0.05$),背鳍和臀鳍的摆动频率高于尾鳍,0.24~0.48 m/s组的背鳍和臀鳍相邻之间差异不显著。有流速的趋流率明显高于静水组,各流速组无显著差别。幼鱼长时间处于0.36 m/s和0.48 m/s流速下时,会加剧体内糖原和血糖的消耗并出现无氧代谢过程。研究表明绿鳍马面鲀幼鱼具有较强的游泳能力,养殖中要控制瞬间水流不要超过其 U_B 也不能长期处于其 U_C ,从代谢方面来看乳酸的积累会对鱼体内造成伤害,因此在养殖过程幼鱼不宜长期处于高于0.36 m/s的流速环境中,当然要参考水温和鱼规格来对水流速进行调整。

关键词:绿鳍马面鲀;游泳行为;游泳能力;能量代谢

中图分类号:S917.45

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0057-010

水流是影响鱼类游泳的一个重要因子,它能够刺激鱼类的感觉器官产生趋流性;游泳是鱼类重要的生命活动之一,鱼的迁徙、猎食、繁殖及躲避敌害等都离不开游泳^[1-2]。水流的变化会影响鱼类的游泳行为,让鱼产生顶流、趋流等行为^[3-4],海洋中潮汐和波浪等引起的水流变化影响鱼的摄食、发育和生长。鱼类游泳过程中,通过鱼鳍的摆动来提供动力和平行,克服水的阻力逆流而上。趋流性是指鱼因水流刺激而引起的趋性,鱼会出现逆流和顺流两种状态,一般把逆流方向的概率称之为趋流率^[5]。鱼类在运动中产生能量的代谢,依据鱼类对氧的需求可分为有氧运动和无氧运动两种类型,无氧运动的能量依靠无氧代谢提供,具有负荷强度高、很难长时间持续等

特点,无氧代谢短时间会产生大量乳酸,导致肌肉疲劳不能持久,如鱼爆发式运动产生爆发游泳速度(Burst swimming speed, U_B)和力竭性游泳(Exhaustive swimming)等运动方式等^[6-7]。有氧运动的能量依靠有氧代谢提供,最大持续有氧运动速度被称为临界游泳速度(Critical swimming speed, U_C),是最大有氧代谢能力评价的重要指标,也是最大持续游泳能力的生理指标之一^[8],有氧运动强度低、持续性长,如鱼长时间在低流速下游泳。运动能量来源于体内代谢,当氧气供应不足时体内代谢会产生乳酸,肌乳酸的水平是评估无氧代谢能力的一个重要指标^[9]。

绿鳍马面鲀(*Thamnaconus septentrionalis*)主要分布于中国、日本、朝鲜半岛沿海,生活水深可

收稿日期:2021-12-27

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GHY112073);十三五“蓝色粮仓科技创新”国家重点研发计划项目(2020YFD0900605)

作者简介:党保成(1993—),男,硕士研究生,研究方向:水产养殖、行为与生理。E-mail:dangbc0814@163.com

通信作者:边力(1988—),男,助理研究员,博士,研究方向:鱼类遗传育种。E-mail:bianli@ysfri.ac.cn

达 120 m,属外海暖温近底层洄游性鱼类,其肉质鲜美、营养价值高,市场需求量大,易于驯化养殖^[10-11]。绿鳍马面鲀作为一个新的养殖种类,已经进行网箱养殖试验^[12],海水网箱养殖中水域环境比较复杂,不同海域的流向、流速、水温变化都会影响鱼类的能量代谢,进而影响鱼类的生长^[13-14],因此本研究自制游泳测定装置,观察绿鳍马面鲀幼鱼的趋流率、摆尾频率、背鳍频率和臀鳍频率来解其游泳行为,采用“流速递增法”测定临界游泳速度和爆发游泳速度来研究幼鱼的游泳能力^[15],可补充绿鳍马面鲀的生物学特性,为绿鳍马面鲀养殖提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验基地为烟台开发区天源水产有限公司,样品来自公司 2020 年养殖的幼鱼。挑选健康的

4 个规格幼鱼各 300 尾,体质量分别为 10.90 ± 0.32 g、 14.90 ± 0.18 g、 20.28 ± 0.12 g、 25.49 ± 0.27 g,体长分别为 8.30 ± 0.10 cm、 9.07 ± 0.08 cm、 9.97 ± 0.40 cm、 11.00 ± 0.08 cm,各自暂养于直径 1 m、高 0.8 m 的中心管排水的玻璃钢水槽中。试验用水为自然沙滤海水,暂养期间常流水、充气养殖。水温 16 ± 0.5 °C,盐度 32, pH 8.0 ± 0.2 ,溶氧 6 mg/L 以上。暂养期间每天投喂 2 次配合饲料,以鱼接近饱食为准,投喂量约为鱼体质量的 2%,暂养一周,试验前均禁食 24 h。

1.2 游泳测定装置

如图 1 所示是一种鱼类行为学观察装置,其原理是通过水泵和溢流管保持水位高度、稳定水压,通过水阀和流量计调控游泳室水流速度,通过游泳室内部两端的卡槽固定筛板,筛板具有均匀水流和拦截试验鱼作用,通过游泳室上端的排气孔,排除游泳室内的气体,稳定游泳室水流。

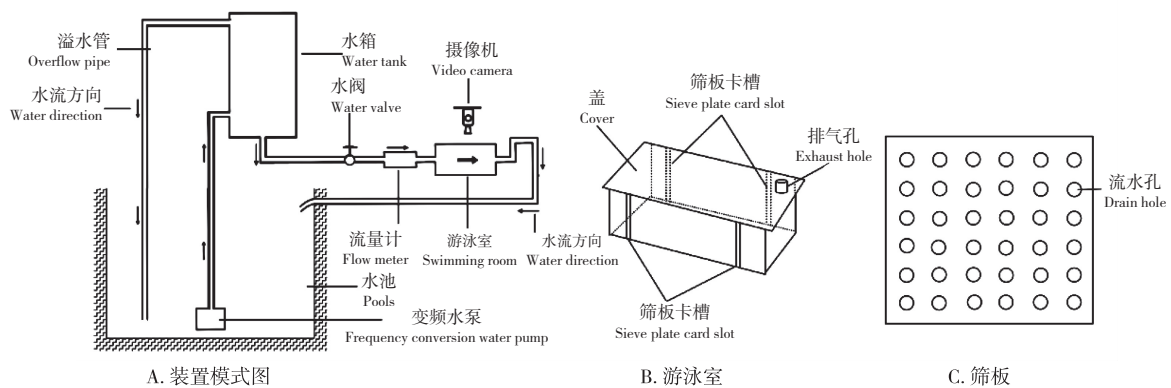


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

1.3 试验方法

1.3.1 流速调节方法

通过变频水泵让箱内水位达到溢出高度,使水箱产生稳定的水位高度,利用流量、截面积、流速关系,通过调节流量计开关控制游泳室的流速。当试验鱼的最大横截面积小于 10% 的游泳室横截面积时,鱼体对水流流速的影响可以忽略,不需另外校正^[16]。

$$v = Q/A \quad (1)$$

式中: Q 为流量, cm^3/s ; A 为横截面积, cm^2 ; v 为游泳室水流速度, cm/s 。

1.3.2 临界游泳速度和爆发游泳速度测定方法

试验时将单尾试验鱼放入游泳管中适应 1 h

以上来消除转移的胁迫影响^[16],适应期间水流速实测为 0.9 cm/s,通过微流水维持溶氧含量。根据试验鱼特点,采用“递增流速法”在 5 min 之内将流速提高至 24 cm/s,每隔 20 min 增加 0.5 BL/s 的流速(BL 为鱼体体长, Body Length),待鱼因疲劳冲至筛板上,减小流速敲击装置,刺激鱼继续游泳,如鱼停留筛板超过 20 s,则试验结束。爆发游泳速度按照临界游泳速度的测定方法,只需把流速递增的间隔 20 min 改为 20 s,其他方法相同^[17]。

1.3.3 临界游泳速度和爆发游泳速度的测定

从暂养水槽中挑选 50 尾规格为 25 g 幼鱼,分为 5 组,每组 10 尾。试验时自然海水水温

16 ℃,通过加冰袋来降低水温和调节加热棒来升高水温,自然海水温度逐渐变化至试验设定温度的过程中,每次水温逐渐变化 2 ℃,并让鱼适应 1 h,逐渐达到试验设定水温。后暂养于温度为 12 ℃、16 ℃、20 ℃、24 ℃和 28 ℃水温的 4 个直径 0.6 m、高 0.8 m 的玻璃钢水槽中,暂养周期为一周。试验前控制游泳测定装置为试验水温,按照上文方法来测定不同温度下的 U_C 和 U_B ,每次测试一条鱼,每组 4 个平行。

1.3.4 游泳行为和代谢的测定

设定 1 个静水组 (0 m/s) 及 0.12 m/s、0.24 m/s、0.36 m/s、0.48 m/s 共 4 个流速组,在 16 ℃水温下,以 25 g 幼鱼进行游泳行为和能量代谢的试验。鱼鳍摆动频率的测定:在 4 个流速组下分别录像 10 min,探究其尾鳍、背鳍和臀鳍的摆动频率随流速的变化情况。趋流率的测定:在 5 个试验组下,每组放 10 条鱼,探究趋流率随流速的变化情况。能量代谢的测定:4 个流速下游分别游 10 min、30 min 和 60 min,并作空白对照,试验时先让鱼适应 1 h,每次试验装置测试一条鱼,每个试验组 3 个平行,试验结束后立即进行麻醉,称重并测量体长,真空管取血,在 4 ℃静止 2 h 后低温离心 (4 ℃, 3 500 r/min, 2 mL 离心管离心 10 min),然后取上清液置于 -80 ℃保存待测,将取过血的鱼体立即放在冰块上,迅速取适量的尾部肌肉 (尾肌)、臀鳍和侧线之间的肌肉 (臀肌) 和背鳍和侧线之间的肌肉 (背肌) 及肝脏用来测定乳酸和糖原含量,血清用于测量乳酸和血糖含量,指标测量均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒。

1.4 数据的处理和计算

临界游泳速度和爆发游泳速度测定根据 Brett (1964) 的计算公式^[15]:

$$U_C = U + (t_1/T_1)\Delta U \quad (2)$$

$$U_B = U + (t_2/T_2)\Delta U \quad (3)$$

式中: U_C 为临界游泳速度, m/s; U_B 为爆发游泳速度, m/s; U 为能够完成设定时间的最大游泳速度, m/s; ΔU 为速度增量, 0.5 BL/s; T_1 为设定的持续游泳历时 ($T_1 = 20$ min), min; T_2 为设定的持续游泳历时 ($T_2 = 20$ s), s; t_1 为未能完成设定历时的实际持续游泳时长 ($t_1 < 20$ min), min; t_2 为未能完成设定历时的实际持续游泳时长 ($t_2 < 20$ s), s。

趋流率 (Rheotaxis frequency) 的计算公式:

$$R = \sum n_i/N_j \cdot 100\% \quad (4)$$

式中: R 为试验鱼逆流游泳次数占总观察次数的百分数, %; n_i 为第 i ($i = 1, \dots, n$) 尾试验鱼在观察期间逆流游泳的次数; N_j 为总的观察次数 (每 10 s 观察记录一次, 观察时间为 10 min), 测定微流水对照组试验鱼趋流率时, 设定第一次观察到的试验鱼的游泳方向即为“逆流方向”。

背鳍频率 (Dorsal fin frequency)、臀鳍频率 (Anal fin frequency) 和摆尾频率 (Tail beat frequency) 的计算公式^[18]:

$$D_f = D_N/t \quad (5)$$

$$A_f = A_N/t \quad (6)$$

$$T_f = T_N/t \quad (7)$$

式中: D_f 、 A_f 、 T_f 为每尾鱼在被观察期间背鳍、臀鳍、尾部摆动频率, Hz; D_N 、 A_N 、 T_N 为每尾鱼被观察期间背鳍、臀鳍、尾部的摆动次数, Hz; t 为观察时间, s。

1.5 数据处理

试验数据利用 SPSS20.0 软件进行分析, 每组数据用“平均值 ± 标准误” (Mean ± SE) 表示, 在单因素方差分析的基础上, 采用 Duncan 多重比较法检验组间差异 ($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 绿鳍马面鲈幼鱼的爆发游泳速度和临界游泳速度

16 ℃的水温下, 随着幼鱼体质量增加临界游泳速度 (U_C) 和爆发游泳速度 (U_B) 都呈升高趋势 (表 1), U_B 的 10 g 和 15 g 及 15 g 和 20 g 差异不明显 ($P > 0.05$), 其他组之间差异显著 ($P < 0.05$)。 U_C 的各规格之间差异性显著 ($P < 0.05$)。

表 1 不同体质量下幼鱼在 16 ℃温度下的爆发游泳速度和临界游泳速度测定结果

Tab. 1 Test results of burst swimming speed and critical swimming speed of juvenile fish under different body mass at 16 ℃

鱼体质量/g	爆发游泳速度 (U_B)/(m/s)	临界游泳速度 (U_C)/(m/s)
10.90±0.32	0.53±0.06 ^c	0.42±0.03 ^d
15.15±0.26	0.56±0.02 ^{bc}	0.47±0.01 ^e
20.12±0.66	0.60±0.02 ^b	0.53±0.03 ^b
25.34±0.75	0.72±0.01 ^a	0.62±0.01 ^a

注: 同列数据上标不同字母表示组间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

表 2 25 g 规格幼鱼在不同温度下的临界游泳速度和爆发游泳速度测定结果

Tab. 2 Test results of critical swimming speed and burst swimming speed of 25 g juvenile fish at different temperatures

温度/℃	爆发游泳速度 (U_B)/(m/s)	临界游泳速度 (U_C)/(m/s)
12	0.64±0.17 ^c	0.53±0.01 ^c
16	0.72±0.01 ^b	0.62±0.02 ^b
20	0.77±0.029 ^b	0.66±0.03 ^{ab}
24	0.85±0.015 ^a	0.72±0.02 ^a
28	0.76±0.03 ^b	0.65±0.04 ^b

U_B 随温度的升高呈先上升后下降趋势,在 24℃ 时流速达到最大值且与其他组差异显著 ($P<0.05$), 12℃ 组与其他组差异显著, 16℃、20℃、28℃ 组之间差异不显著 ($P>0.05$)。 U_C 随温度的升高呈先上升后下降趋势, 24℃、16℃ 和 12℃ 组之间差异显著 ($P<0.05$), 20℃ 组与 24℃ 和 16℃ 组差异不显著 ($P>0.05$), 20℃、24℃ 和 28℃ 之间差异不显著 ($P>0.05$), 温度低于 12℃

时或高于 28℃ 时, 鱼的游泳能力降, 鱼出现不游和反应迟缓等现象。

2.2 绿鳍马面鲀幼鱼在不同流速下的游泳行为

随着流速的增加幼鱼摆尾频率不断加快(表 3), 从静水组的 1.21 Hz 增加到 0.48 m/s 组的 6.86 Hz, 各组之间差异显著 ($P<0.05$), 背鳍摆动频率随着水流速的增加而加快, 0.12 m/s 和 0.24 m/s 组差异不显著 ($P>0.05$), 0.36 m/s 和 0.48 m/s 组差异也不显著 ($P>0.05$), 其他组之间差异显著 ($P<0.05$)。臀鳍的摆动频率也随流速的增加而加快, 0.24 m/s 和 0.36 m/s 及 0.36 m/s 和 0.48 m/s 之间差异不显著 ($P>0.05$), 静水组、0.12 m/s 组之间差异显著 ($P<0.05$)。在微流水中, 幼鱼游泳的方向随机, 随着流速增加, 趋流方向逐渐转为逆流, 趋流率由对照组的 (51.67±0.56)% 增加到 0.12 m/s 组的 (93.89±0.57)%, 0.24 m/s 组后趋流率接近 100%, 0.48 m/s 组达到 100%, 0.24 m/s、0.36 m/s 和 0.48 m/s 组差异不显著 ($P>0.05$)。

表 3 不同流速下幼鱼的摆尾频率、趋流率、背鳍频率和臀鳍频率测定结果

Tab. 3 The frequency of wagging tail, trend rate, dorsal fin and anal fin were measured at different flow rates

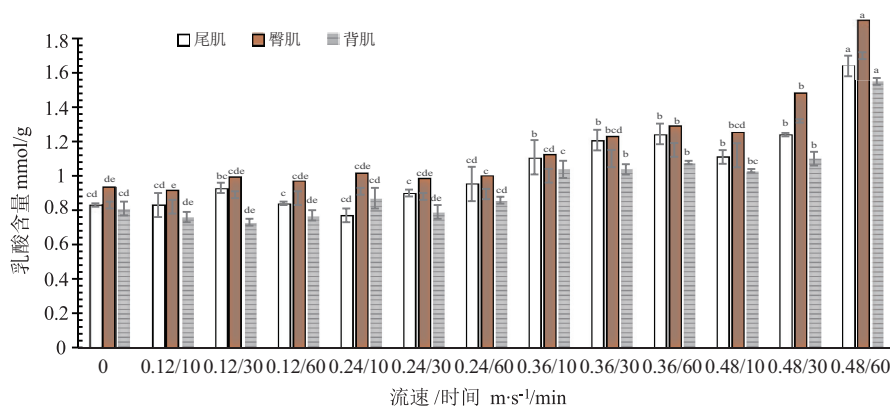
项目	流速				
	静水组	0.12 m/s	0.24 m/s	0.36 m/s	0.48 m/s
摆尾频率/Hz	1.21±0.03 ^c	3.81±0.08 ^d	4.20±0.09 ^c	5.46±0.27 ^b	6.86±0.14 ^a
趋流率/%	51.67±0.88 ^b	93.89±1.40 ^b	97.59±0.40 ^a	100±0.10 ^a	100.00±0.00 ^a
背鳍频率/Hz	5.03±0.20 ^c	8.89±0.21 ^b	9.13±0.19 ^b	10.70±0.19 ^a	11.11±0.24 ^a
臀鳍频率/Hz	5.09±0.21 ^d	8.02±0.43 ^c	10.17±0.19 ^b	10.47±0.64 ^{ab}	11.12±0.16 ^a

注: 不同字母表示同一指标的不同试验组间存在显著差异 ($P<0.05$)

2.3 绿鳍马面鲀幼鱼随流速、时长的代谢变化

肌乳酸含量从 0.36 m/s (10 min) 的组开始变化且与对照差异显著 ($P<0.05$) (图 2), 随着流

速、时间增加 3 个部位肌肉乳酸呈增加趋势, 0.48 m/s (60 min) 组 3 个部位的肌肉乳酸含量达到最大值。



注: 不同字母表示同一部位组织在不同试验组间存在显著差异 ($P<0.05$), 下同

图 2 不同流速下和时间下肌肉乳酸含量的变化

Fig. 2 Changes of muscle lactic acid content under different flow rates and time

背肌、臀肌和尾肌糖原随着流速和时间增加,糖原含量呈下降趋势(图3),0.36 m/s(60 min)和0.48 m/s(60 min)组肌肉糖原含量较低。肝脏乳酸含量从0.36 m/s组开始明显升高,

0.48 m/s(60 min)组乳酸含量最高(表4)。肝糖原从0.36 m/s(30 min)呈下降趋势,在0.48 m/s(60 min)组糖原含量最低。

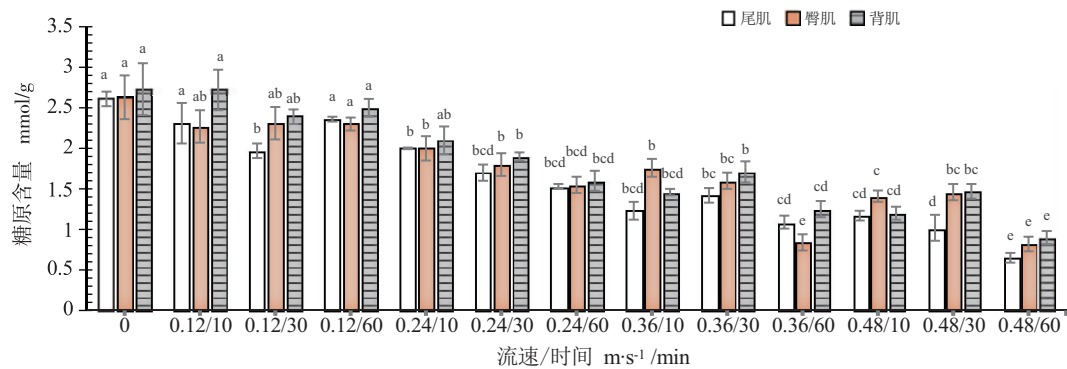


图3 不同流速下和时间下肌肉糖原含量的变化

Fig. 3 Changes of muscle glycogen content at different flow rates and time

血液乳酸含量0.36 m/s组呈上升趋势,从0.36 m/s(60 min)组开始,乳酸的含量与对照组差异显著($P<0.05$),其中0.48 m/s(60 min)组的

乳酸含量最高,血糖的含量从0.36 m/s(60 min)及0.48 m/s的30 min和60 min有明显的下降趋势,且在0.48 m/s(60 min)组最低。

表4 不同流速和时间下绿鳍马面鲈幼鱼组织的代谢物变化(平均值±标准误, $n=3$)

Tab. 4 Changes of metabolites in tissues of juvenile *Thamnaconus septentrionalis* under different swimming velocities and times (Mean±S. E. $n=3$)

组织代谢物		肝脏		血液		
		糖原/(mmol/g)	乳酸/(mmol/g)	血糖/(mmol/L)	乳酸/(mmol/L)	
流速和时间	静水组	8. 00±0. 50 ^a	0. 21±0. 01 ^{ef}	8. 22±0. 36 ^a	2. 41±0. 35 ^d	
	10 min	8. 15±0. 71 ^a	0. 20±0. 01 ^{ef}	7. 92±0. 52 ^a	2. 33±0. 13 ^d	
	0. 12 m/s	30 min	8. 30±0. 31 ^a	0. 21±0. 01 ^{ef}	7. 26±0. 16 ^{ab}	2. 26±0. 14 ^d
	60 min	8. 16±0. 26 ^a	0. 21±0. 02 ^{ef}	7. 92±1. 19 ^a	2. 37±0. 06 ^d	
	10 min	7. 42±0. 45 ^{ab}	0. 19±0. 03 ^f	6. 68±0. 23 ^{abc}	2. 70±0. 03 ^{cd}	
	0. 24 m/s	30min	7. 77±0. 60 ^{ab}	0. 23±0. 01 ^{def}	7. 84±0. 3 ^a	2. 40±0. 09 ^d
	60 min	7. 47±1. 07 ^{ab}	0. 22±0. 01 ^{def}	7. 62±0. 12 ^a	3. 01±0. 03 ^{cd}	
	10 min	7. 36±0. 28 ^{ab}	0. 25±0. 01 ^d	7. 23±0. 37 ^{abc}	2. 46±0. 23 ^d	
	0. 36 m/s	30min	6. 78±0. 31 ^{bc}	0. 30±0. 01 ^{bc}	5. 91±0. 60 ^{bced}	2. 55±0. 21 ^d
	60 min	5. 94±0. 66 ^d	0. 32±0. 01 ^{bc}	5. 22±0. 55 ^{cd}	4. 29±0. 34 ^c	
	10 min	6. 80±0. 77 ^{bc}	0. 30±0. 01 ^{bc}	6. 77±0. 31 ^{abc}	3. 28±0. 17 ^d	
	0. 48 m/s	30 min	6. 62±0. 19 ^{bc}	0. 34±0. 01 ^b	5. 30±0. 46 ^{cde}	4. 91±0. 16 ^b
	60 min	5. 65±0. 13 ^d	0. 43±0. 02 ^a	4. 65±0. 27 ^e	11. 25±0. 22 ^a	

注:同列数据上标字母不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)

3 讨论

3.1 体质量、温度对幼鱼游泳能力的影响

游泳能力对鱼类的生存起着至关重要,鱼类因捕食、躲避敌害等情况出现爆发式的运动现

象^[18-19],爆发游泳速度(U_B)是评价鱼游泳能力的重要指标^[20]。绿鳍马面鲈幼鱼随着体质量增加 U_B 呈上升趋势,这与史航等^[21]测定大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)的变化的趋势一致,绿鳍马面鲈幼鱼在10~25 g范围内,瞬间最大顶流能力

由 0.53 m/s 提升至 0.72 m/s, 随着体质量增加 U_c 也不断升高, 这与史航等^[21]和李会锋等^[22] U_c 的变化趋势相似, 幼鱼的 U_c 由 0.42 m/s 增至 0.62 m/s 左右且 4 个规格差异显著 ($P < 0.05$), 说明相差 5 g 幼鱼的游泳能力提升显著, 随着体质量的增加, 绿鳍马面鲈幼鱼的顶流能力不断提高, U_B 和 U_c 的快速提高为绿鳍马面鲈幼鱼捕食、逃避敌害、繁殖等提供支持, 作为洄游性鱼类^[23], 绿鳍马面鲈幼鱼能够在生长中快速提高游泳能力来适应迁徙活动。史航等^[21]研究得出 14 °C 时 10 cm 的许氏平鲈 (*Sebastes schlegelii*) U_c 和 U_B 约为 0.45 m/s 和 0.77 m/s, 10 cm 的大泷六线鱼 U_c 和 U_B 约为 0.42 m/s 和 0.82 m/s, 16 °C 时绿鳍马面鲈幼鱼 U_c 和 U_B 约为 0.62 m/s 和 0.72 m/s, 可以看出绿鳍马面鲈幼鱼 U_c 高于许氏平鲈和大泷六线鱼, 而爆发游泳速度低于两者, 主要原因是本试验 U_B 研究方法是鱼从初始流速一直到极限流速整个时段内累积的游泳能力, 而史航等^[21]研究的是鱼受到刺激的瞬间游泳速度, 因此顶流节省体力。资料显示, 43.9 g 的大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 的 U_c 约为 0.32 m/s^[24], 远低于绿鳍马面鲈幼鱼, 本试验递增周期为 20 min, 而测量大黄鱼的递增周期为 30 min, 通常时间间隔越短试验鱼在某一流速下的持续顶流时间就越短, 为下一流速水平顶流节省体力越多, 将有利于提高临界速度^[25], 相对于这些鱼类, 绿鳍马面鲈头、体较侧扁, 呈长椭圆形, 水的阻力较小, 总的来说绿鳍马面鲈幼鱼的游泳能力较强。

温度是影响鱼类游泳能力的重要因素, 鱼类作为变温性动物, 水温的变化直接影响鱼体温。温度的变化影响鱼体的酶活性和氧气的运输及传递, 进而鱼类的生理功能受到影响, 同时也影响鱼类的肌肉收缩率和游泳能力^[26-27]。温度对鱼类游泳能力的影响可以用来推测其适宜生长温度, 并在鱼最适合的温度时 U_B 和 U_c 达到最大值^[25], 本研究得出绿鳍马面鲈幼鱼的 U_B 和 U_c 在 12 ~ 28 °C 呈先上升后下降趋势, 顶流的速度随温度的变化趋势与徐革锋等的结果相似^[29], 在 24 °C 达到最大值, 这符合 24 °C 是绿鳍马面鲈幼鱼的最适生长温度^[30], 如黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 在适宜的温度 24.4 °C 时达到最大 U_c ^[31], 适宜温度下游泳能力显著提升为鱼类在海洋中快速生长提供

保障。研究过程中发现在低于 12 °C 和高于 28 °C 时, 绿鳍马面鲈幼鱼游泳能力急剧下降, 出现不游、侧身、贴壁等现象, 说明温度过高或过低降低绿鳍马面鲈幼鱼的游泳运动。

3.2 流速对绿鳍马面鲈幼鱼行为的影响

水流作为非生物因子能够刺激鱼类的感觉器官, 引起鱼的趋流行为, 鱼类会根据水流的大小和方向调节自身的游泳速度和方向^[32-33], 试验过程中为了满足静水组试验用鱼对溶氧需求, 静水组水流保持微水流状态, 实际为流速为 0.009 m/s, 微流状态的趋流率接近 50%, 说明微流水条件下近似静水下幼鱼的游泳状态, 趋流率由静水组的 52% 增加至流速组的 100%, 幼鱼由静水到流速组, 幼鱼逆流率增加的趋势与李丹的杂交鲟鱼 (*Huso duricus Georgi* ♂ × *Acipenser schrenckii Brandt* ♀)^[33] 和钟金鑫等的鳊白鱼 (*Anabarilius grahami*) 结果相似, 当流速 0.12 m/s 时绿鳍马面鲈幼鱼趋流率达到 94%, 远远高于静水组的 52%, 这说明流速较低时对幼鱼的刺激程度不够、敏感度不高, 一定的流速是保持较高趋流率的必要条件, 在工厂化养殖过程中, 绿鳍马面鲈幼鱼喜集群围绕养殖池逆流游泳。

鱼鳍是鱼类游泳的重要器官, 在游泳过程中为鱼类提供动力和平衡, 其中尾鳍为鱼类游动提供主要的动力^[35], 摆尾频率作为衡量运动强度的指标之一, 随着流速增加呈正相关, 各流速组之间差异显著 ($P < 0.05$), 说明随着流速的增大逆流游泳所需的动力也相应增加, 幼鱼通过加大摆尾的频率保持逆流状态, 这与钟金鑫等^[34] 的鳊白鱼 (*Anabarilius grahami*) 和袁喜等^[35] 的细鳞裂腹鱼 (*Schizothorax chongi*) 结果相似, 从静水组到 0.12 m/s 组尾鳍、背鳍和臀鳍的摆动频率增加的百分比分别为: 240.18%、76.74%、58.15%, 从 0.12 m/s 到 0.48 m/s 组的摆动频率增加的百分比分别为: 80.05%、24.97% 和 38.65%, 尾鳍频率增加的百分比大于背鳍和臀鳍, 但结果发现随着流速的增加, 鱼尾部的摆动转变为尾部和躯干部的共同摆动, 观察还发现尾部的摆动幅度比背鳍和臀鳍大得多, 闫东娟等^[36] 和杨晗等^[37] 通过切除尾鳍发现会导致鲫 (*Carassius auratus*) 和宽鳍鱮 (*Zacco platypus*) 的迅速启动能力, 这说明幼鱼主要通过尾鳍摆动提供主要动力, 来保障在一定流

速下趋流率接近 100%。有研究表明鱼类的背鳍和臀鳍起平衡作用^[38],背鳍的缺失对胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)幼鱼游泳能力没有显著的影响^[39],以上研究说明背鳍和臀鳍在幼鱼游泳过程中起辅助作用。

3.3 流速、时间对幼鱼代谢的影响

水流能够刺激鱼类的感觉器官,使其产生逆流和持续的游泳运动^[36],鱼在长时间处于剧烈的运动状态下会增加糖原、血糖的消耗和乳酸的产生^[40],乳酸作为评估无氧代谢能力的一个重要指标,可以依照乳酸的显著增加来判断鱼类的无氧代谢情况^[41]。本研究表明尾肌、臀肌和背肌的糖原含量分别从 2.61 mmol/g、2.30 mmol/g 和 2.73 mmol/g 降低至 0.65 mmol/g、0.82 mmol/g 和 0.90 mmol/g(图 2),在鱼类运动过程中,依靠鱼鳍肌肉的收缩摆动来提供动力,说明运动过程中肌糖原被消耗来为幼鱼肌肉的摆动提供能量,0.12 m/s 组糖原含量下降不明显,说明低流速下消耗糖原较少,低流速下糖原含量下降不明显与朱晏苹等^[9]研究的瓦氏黄颡(*Pelteobagrus vachelli*)幼鱼的结果相似。0.24 m/s 组开始幼鱼肌糖原下降量开始显著($P<0.05$),说明加剧消耗肌糖原为游泳提供能量,时间长、流速大都会加剧肌糖原的分解,并在 0.48 m/s(60 min)组时三个部位肌糖原含量最小。0.12 m/s(10 min)组~0.24 m/s(60 min)组肌肉的乳酸含量变化与静水组相差不显著($P>0.05$),鱼类适宜的游泳状态下肌糖原分解产物是 H_2O 和 CO_2 并为肌肉运动供能。0.36 m/s(10 min)组开始乳酸的含量开始增加,在最高组 0.48 m/s(60 min)乳酸含量达到最大值(图 3),此时尾肌、臀肌和背肌的乳酸含量分别约为 1.64 mmol/g、1.70 mmol/g 和 1.55 mmol/g,鱼类在剧烈运动后肌糖因分解供能而含量迅速下降,但由于氧气供给不足导致乳酸浓度迅速上升,此时肌糖原不能直接分解成葡萄糖,必须先分解生成乳酸^[43],说明在此流速开始无氧代谢增强,0.36 m/s(10 min)组开始随着流速增加幼鱼因受水流胁迫,体内进行能量消耗时因氧气供应不足导致无氧呼吸增强从而产生乳酸。三个部位的肌肉是相互联系存在物质和能量的交换,因此三个部位的糖原和乳酸含量无法比较,但可以看出,运动过程中不仅是鱼类尾部肌肉,其他部位肌肉

也参与进行物质分解及能量的代谢。

鱼类运动过程中肝糖原分解葡萄糖,后释放入血液中,主要作用是不断补充血糖的消耗,以维持血糖的正常水平,保证生命活动及运动能力^[44],本研究肝糖原从 0.24 m/s(10 min)组开始下降(表 4),在 0.36 m/s(30 min)时糖原的含量与对照组差异显著($P<0.05$),同流速,时间越长,糖原含量越低,肝糖原从对照组的 8.00 mmol/g 降低至 5.65 mmol/g。鱼类运动剧烈的状态下肝糖分解中因缺氧造成乳酸的积累,在 0.12 m/s 和 0.24 m/s 低流速下由于运动过程中幼鱼呼吸代谢的氧气充足组输送到肝脏,因此肝脏的代谢为有氧代谢。乳酸含量从 0.36 m/s 流速组开始变化且都与静水组差异显著($P<0.05$),说明无氧代谢产物与对照组差异显著。乳酸从静水组至 0.48 m/s(60 min)组上升了 0.22 mmol/g,低于肌肉乳酸的 0.9 mmol/g。

血糖在为鱼类运动供能起着重要的作用,研究发现 0.24 m/s 和 0.12 m/s 组血糖含量与对照组相差不显著($P>0.05$)(表 4),从 0.36 m/s 的 30 min 开始与对照组相差显著($P<0.05$),说明在较高流速和长时间下幼鱼运动消耗血糖加快肝糖原和血糖同步减少,这是因为试验鱼运动过程中,肝糖原不断分解减少,为血液提供葡萄糖,Richards 等^[43]和李黎等^[42]也有其相同规律,血糖从对照组的 8.22 mmol/L 下降至 0.48 m/s(60 min)组的 4.65 mmol/L,说明长时间且高速下会加大血液能量的消耗。血乳酸从对照组的 2.41 mmol/L 升至 11.25 mmol/L,运动过后血液乳酸的含量变化明显,0.12 m/s 和 0.24 m/s 流速组与对照组无差异($P<0.05$),说明此流速下幼鱼主要为有氧运动。0.36 m/s(30 min)组与对照组相差不异,而 60 min 时差异显著,乳酸的含量上升显著,说明同流速时间越长试验鱼容易出现力竭状态,同样对于 0.48 m/s 组也是,随着时间增加血液中积累的乳酸越多,说明幼鱼由于长期处于高于 0.36 m/s 的流速下血液中会积累乳酸。

在 16 °C 下 25 g 幼鱼的 U_c 为 0.62 m/s,0.36 m/s 和 0.48 m/s 流速分别接近 U_c 的 60% 和 80%,临界游泳速度是鱼类最大的有氧运动速度,从结果来看在接近临界游泳速度时存在无氧代谢,这也符合鱼类在到达 U_c 之前存在一定比例

的无氧代谢^[45]。

4 结论

本研究通过测定绿鳍马面鲈幼鱼在不同体质量和温度下的临界游泳速度及爆发游泳速度,并记录观察幼鱼的鱼鳍摆动频率和趋流性,来分析绿鳍马面鲈的游泳行为,结果表明,幼鱼具有较强的游泳能力,在工厂化养殖和网箱养殖中,要控制好养殖水环境的流速条件,瞬间水流不要超过其爆发游泳速度,也不能长期处于其临界游泳速度的水环境。从代谢方面来看,幼鱼长时间处于 0.36 m/s 和 0.48 m/s 流速下时,体内会出现无氧代谢过程并加剧糖原和血糖的消耗,因此在养殖水流速不要长期高于 0.36 m/s。□

参考文献

- [1] 何大仁,蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 厦门:厦门大学出版社, 1998:141-144.
- [2] MERINO G E, PIEDRAHITA R H, CONKLIN D E. Effect of water velocity on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles[J]. Aquaculture, 2007, 271:206-215.
- [3] 臧维玲,戴习林,徐嘉波. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报, 2008(5):749-757.
- [4] 王萍,陈凯琳,桂福坤,等. 不同规格凡纳滨对虾可持续游泳能力比较研究[J]. 渔业现代化, 2020, 47(5):8-14.
- [5] 宋波澜,林小涛,王伟军,等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化[J]. 动物学报, 2008(4):686-694.
- [6] BALDWIN J, SEYMOUR R S, WEBB G. Scaling of anaerobic metabolism during exercise in the estuarine crocodile (*Crocodylus porosus*) [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology, 1995, 112(2):285-293.
- [7] BOUTILIER R G, FERGUSON R A, HENRY R P, et al. Exhaustive exercise in the sea lamprey (*Petromyzon marinus*): relationship between anaerobic metabolism and intracellular acid-base balance[J]. Journal of Experimental Biology, 1993, 178:71-88.
- [8] 涂志英,李丽萍,袁喜,等. 圆口铜鱼幼鱼可持续游泳能力及活动代谢研究[J]. 淡水渔业, 2016, 46(1):33-38.
- [9] 朱晏萍,曹振东,付世建. 不同游泳速度条件下瓦氏黄颡幼鱼的有氧和无氧代谢反应[J]. 水生生物学报, 2010, 34(5):905-912.
- [10] 张鹏飞,常青,陈四清,等. 绿鳍马面鲈幼鱼昼夜摄食节律及胃排空模型研究[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(1):104-111.
- [11] 丁民权. 东海绿鳍马面鲈群体及其分布[J]. 水产学报, 1994(1):45-56.
- [12] 刘琨,刘刚,黄亮,等. 绿鳍马面鲈大规模苗种网箱培育试验[J]. 渔业现代化, 2019, 46(6):54-60.
- [13] 黄滨,关长涛,林德芳,等. 我国深海抗风浪网箱发展中存在的问题[J]. 渔业现代化, 2004(4):34-35.
- [14] 叶婷,张海,张天义,等. 深海养殖存在的问题及对策研究[J]. 农业技术与装备, 2020(11):134-135.
- [15] BRETT J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon [J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1964, 21:1183-1226.
- [16] JAIN K E, HAMILTON J C, FARRELL A P. Use of a ramp velocity test to measure critical swimming speed in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology, 1997, 117(4):441-444.
- [17] BRETT J R. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature [J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1967, 24(8):1731-1741.
- [18] 李丹,林小涛,李想,等. 水流对杂交鲟幼鱼游泳行为的影响[J]. 淡水渔业, 2008, 38(6):46-51.
- [19] DAY N. The effects of acclimation to reversed seasonal temperatures on the swimming performance of adult brown trout *Salmo trutta* [J]. Journal of Experimental Biology, 2005, 208(14):2683.
- [20] 袁喜,涂志英,韩京成,等. 流速对鲫游泳行为和能量消耗影响的研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(4):103-109.
- [21] 史航,陈勇,赵子仪,等. 许氏平鲈、大泷六线鱼临界游速与爆发游速及其生理指标的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(5):407-412.
- [22] 李会峰,蔡德所,杨培思. 鲢幼鱼游泳能力及游泳行为的试验研究[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(3):88-92.
- [23] 林新濯,甘金宝,郑元甲,等. 绿鳍马面鲈洄游分布的研究[J]. 海洋渔业, 1984(3):99-108.
- [24] 吴飞飞,王萍,桂福坤,等. 大黄鱼续航时间和临界游泳速度的初步研究[J]. 渔业现代化, 2014, 41(4):29-33.
- [25] IAN S, HARTWELL L. Critical swimming capacity of the Atlantic Silverside, *Menidia menidia* L. [J]. Estuaries, 1991, 14(2):218-221.
- [26] ZENG L Q, CAO Z D, FU S J, et al. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2009, 153(2):125-130.
- [27] 姚学良,蔡琰,张振奎,等. 温度对豹纹鳃棘鲈幼鱼呼吸代谢的影响[J]. 天津农学院学报, 2014, 21(1):23-27.
- [28] 段辛斌,俞立雄,罗宏伟. 两种温度条件下四种鱼类临界游泳速度的比较[J]. 动物学杂志, 2015, 50(4):529-536.
- [29] 徐革锋,牟振波,韩英,等. 温度和流速对细鳞鲈 (*Brachymystax lenok*) 幼鱼游泳能力的影响及其与呼吸代谢的关系[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(4):786-792.
- [30] 薛美岩. 绿鳍马面鲈早期发育及生长的研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2011.
- [31] KOUMOUNDOUROS G, SFAKIANAKIS D G, DIVANACH P, et

- al. Effect of temperature on swimming performance of sea bass juveniles[J]. Journal of Fish Biology, 2002, 60(4): 923-932.
- [32] 齐亮, 杨宇, 王悦, 等. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 438-445.
- [33] 李丹. 流速对杂交鲟和罗非鱼幼鱼游泳行为及活动代谢的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2009.
- [34] 钟金鑫, 张倩, 李小荣, 等. 不同流速对鳊(鱼良)白鱼游泳行为的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 655-660.
- [35] 袁喜, 涂志英, 韩京成, 等. 流速对细鳞裂腹鱼游泳行为及能量消耗影响的研究[J]. 水生生物学报, 2012, 36(2): 270-275.
- [36] 闫东娟, 曹振东, 付世建. 尾鳍缺失和恢复生长对不同生境的两种鲤科鱼类快速启动游泳能力的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1947-1954.
- [37] 杨晗, 曹振东, 付世建. 尾鳍缺失对鳊鱼幼鱼游泳能力、能量效率与行为的影响[J]. 水生生物学报, 2013, 37(1): 157-163.
- [38] MAIA A, LAUDERR G V, WILGA C D. Hydrodynamic function of dorsal fins in spiny dogfish and bamboo sharks during steady swimming[J]. Journal of Experimental Biology, 2017, 220(21): 3967-3975.
- [39] 周龙艳, 付世建, 付成, 等. 背鳍缺失对胭脂鱼幼鱼游泳能力与反捕食能力的影响[J]. 淡水渔业, 2019, 49(3): 47-51.
- [40] REIDY S P, KERR S R, NELSON J A. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic Cod[J]. Journal of Experimental Biology, 2000, 203(2): 347-357.
- [41] LEE C G, FARRELL A P, LOTTO A et al. . Excess post-exercise oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon following critical speed swimming. [J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(18): 3253-3260.
- [42] 李黎, 曹振东, 付世建. 力竭性运动后鲈鱼幼鱼乳酸、糖原和葡萄糖水平的变动[J]. 水生生物学报, 2007(6): 880-885.
- [43] RICHARDS J G, HEIGENHAUSER G J F, WOOD C M. Exercise and recovery metabolism in the Pacific spiny dogfish (*Squalus acanthias*) [J]. Journal of Comparative Physiology B Biochemical Systemic & Environmental Physiology, 2003, 173(6): 463.
- [44] 尉小强. 饥饿对牦牛糖异生和脂肪代谢的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [45] BURGETZ I J, ROJAS-VARGAS, HINCH S G, et al. Initial recruitment of anaerobic metabolism during submaximal swimming in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Journal of Experimental Biology, 1998, 201(19): 2711-2721.

Preliminary study on swimming exercise and energy metabolism of juvenile *Thamnaconus septentrionalis*

DANG Baocheng^{1,2}, CHEN Siqing¹, LI Xuemei¹, SUN Yuxiao³, LI Fenghui¹,
GE Jianlong¹, SUN Yikang¹, LI Meishuai¹, CHANG Qing¹, BIAN Li¹

(1 Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences Laboratory of Marine Fishery Science and Food Production Process, Qingdao National Laboratory of Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China;

2 College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3 College of Animal Science, Zhejiang University, Hangzhou 316022, Zhejiang, China)

Abstract: It is important to study the effect of flow rate on the swimming movement of juvenile *Thamnaconus septentrionalis*. In this experiment, a self-made swimming device was used to study the swimming ability and behavior of juvenile fishes at different body weights (10, 15, 20, and 25 g) and different temperatures (12, 16, 20, 24, and 28 °C), and to investigate the metabolism of juvenile fishes at the flow rates of 0.12, 0.24, 0.36 and 0.48 m/s at any time. The results show: The critical swimming speed (U_C) of the four sizes were 0.42 ± 0.03 , 0.47 ± 0.01 , 0.53 ± 0.03 , and 0.62 ± 0.01 m/s, respectively. Burst swimming velocity (U_B) was 0.53 ± 0.06 , 0.56 ± 0.02 , 0.60 ± 0.02 and 0.72 ± 0.01 m/s, respectively. The swimming ability of juvenile U_C and U_B was significantly improved with the increase in body mass. The U_C and U_B of juvenile fish at 25 g at five temperature groups increased and then decreased with the increase of temperature, and reached the maximum value at 24 °C, which was significantly different from that of other groups ($P < 0.05$). The oscillation frequency of the caudal fin, dorsal fin, and anal fin increased with the increase in flow velocity, and the oscillation frequency of the caudal fin was significantly different among the four flow velocity groups ($P < 0.05$). The oscillation frequency of the dorsal fin and anal fin was higher than that of the caudal fin, and there was no significant difference between the adjacent dorsal fin and anal fin in the 0.24–0.48 m/s group. The trend rate with flow velocity was significantly higher than that with static water, and there was no significant difference among flow velocity groups. Juvenile fish at a flow rate of 0.36 m/s and 0.48 m/s for a long time will increase the consumption of glycogen and blood sugar in vivo and show anaerobic metabolism. Studies show that juvenile *Thamnaconus septentrionalis* has strong swimming ability, and it is necessary to control the instantaneous current not to exceed U_B and not to be in U_C for a long time. From the perspective of metabolism, lactic acid accumulation will cause harm to fish. Thus, juvenile fish should not be in a flow rate higher than 0.36 m/s for a long time in the breeding process and the flow rate of the water should be adjusted regarding the water temperature and fish specifications

Key words: *Thamnaconus septentrionalis*; swimming behavior; swimming ability; energy metabolism

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.009

青岛近岸野生牡蛎及海滩沉积物中的微塑料季节性分布特征及其关联性

黄六一, 黄杰鸿, 尤鑫星, 盛化香, 王冲, 彭海

(中国海洋大学水产学院, 青岛 266000)

摘要:作为人类活动密集的城市近岸海洋环境中的微塑料污染日益突出,受到持续、广泛关注。为评估海洋微塑料污染带来的生态风险,在青岛近岸采集夏、秋、冬3个季节的牡蛎(*Ostrea gigas* tnumb)及海滩沉积物样品,分别采用碱性消解法、密度浮选法提取牡蛎体内和海滩沉积物中的微塑料,分析该区域内海洋微塑料的季节性分布特征以及牡蛎和沉积物中微塑料的关联性。结果显示:牡蛎体内与沉积物中微塑料丰度的季节性变化趋势具有一致性,表现为夏季>冬季>秋季;在3个季节中,牡蛎体内的微塑料丰度均显著高于沉积物中的丰度,是沉积物中的3~4倍;总体上,牡蛎体内和海滩沉积物中均以粒径<1 mm的纤维状微塑料为主,无明显的季节性变化;牡蛎体内与沉积物中微塑料的颜色总体上保持一致,以透明、蓝色为主;显微红外光谱显示,微塑料的聚合物种类有聚酯纤维、腈纶、人造丝、纤维素、聚丙烯-聚乙烯共聚物。基于牡蛎体内与沉积物中微塑料丰度随季节变化的一致性和微塑料物理特征上的相似性,建议将牡蛎作为青岛近岸海洋微塑料污染的指示生物。本研究可为青岛近岸海产品中微塑料的潜在风险评估及海洋微塑料污染的监测治理提供参考。

关键词:牡蛎;海洋污染;海洋监测;海洋微塑料;海滩沉积物;季节差异;青岛近岸

中图分类号:S931.3

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0067-010

塑料一般通过石油、天然气或者煤衍生的单体聚合产生,是一种高分子量的有机聚合物^[1]。塑料是人类生活中不可或缺的一种材料,由于其具有质量轻、多功能及耐用等良好的性能,被广泛用于日常生活及工农业产品和领域中,如日用品、服装、产品包装、渔用材料等。

随着塑料生产量的增加,由于处理不当和降解有限等原因,造成塑料垃圾急剧增加,塑料污染已成为严重的环境问题,尤其是对海洋环境的污染。海洋中大多数塑料碎片以微塑料(<5 mm的塑料颗粒)的形式存在,主要来源有两种:原始制造的塑料颗粒或微珠(称为初级微塑料),或由较大的塑料垃圾分解而成(称为次级微塑料)^[2]。Jambeck等^[3]估计,2010年192个沿海国家产生了2.75亿t塑料垃圾,其中480万t至1270万t最终进入海洋,在缺乏适当管理措施的情况下,到2025年,海洋塑料碎片将增加一个数量级。微塑料作为新兴海洋污染物,近年来研究其在海洋中的分布以及对海洋生物的危害已受到世界范围的

关注。目前微塑料已在各地海水^[4-6]、海洋沉积物^[7-9]和生物体^[10-12]中被发现。

人类活动频繁的近岸海域是微塑料污染尤为严重的区域,是目前微塑料研究的热点区域,而作为人类活动最为密集的沿海城市的海滩,受到国内外学者的重点关注^[9,13-14]。目前已有相关的研究调查了微塑料在青岛沿岸的分布,部分涉及栈桥海水浴场。如罗雅丹等^[15]研究了青岛近岸4个典型海水浴场海水和沉积物中微塑料的分布;尹诗琪等^[16]研究了青岛近岸4个不同海域(红岛水产养殖区、李村河口附近、团岛污水处理厂、麦岛沙滩附近)表层海水和潮滩沉积物中微塑料的分布;Gao等^[17]对夏、冬季青岛海水浴场海水和海滩的微塑料污染进行了调查研究。但整体而言,上述研究中对于海洋微塑料的季节变化关注较少,且未开展定居生物体内的微塑料研究。考虑到微塑料在环境中的广泛分布及其对生物的影响,因此有必要同时开展海洋环境和定居生物体内的微塑料污染研

收稿日期:2022-03-01

基金项目:国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0901003)

作者简介:黄六一(1970—),男,教授,博士,研究方向:海洋渔业。E-mail:huangly@ouc.edu.cn

究,从而分析微塑料在生物体内与海洋环境中的分布特征及其关联性。

生物摄入微塑料后可能产生各种不良反应。有研究发现,牡蛎的繁殖受到聚苯乙烯微塑料的影响;贻贝因摄入微塑料而产生明显的组织学变化和炎症反应;许氏平鲉摄食微塑料后捕猎行为、能量储备和营养质量均受影响^[18-20]。因此,海洋微塑料可能降低野生或养殖水产品的品质甚至影响经济效益。由于被人们大量食用,海产品中海洋微塑料的存在还可能对人类食品安全构成威胁。据统计,欧洲消费者每年通过食用贝类摄入达 1.1 万个微塑料^[21]。Setälä 等^[22] 和 Wesch 等^[23] 发现,双壳类动物比其他海洋无脊椎动物和不同食性的捕食者更容易摄入微塑料。牡蛎 (*Ostrea gigas* *tnunb*) 隶属软体动物门、双壳纲、珍珠贝目,是一种重要的海洋生物资源,广泛分布在潮间带和潮下带水深不超过 10 m 的范围内,是世界第一大养殖贝类。中国是世界上最大的牡蛎养殖国,据统计,2020 年中国牡蛎产量达 542 万 t^[24]。牡蛎以壳粘固于岩礁或其他物体上,通过鳃不断过滤大量海水来进食和呼吸,与自由移动的生物相比,这种固着栖息的生物更容易反映所在区域的环境污染状况,因此牡蛎可以作为海洋

微塑料污染的指示种^[22-23]。牡蛎除了作为海洋微塑料污染的指示种外,由于被人们大量食用,也可能成为评估人类通过海产品摄入微塑料的潜在健康风险的介质。有研究表明海滩上的微塑料可直接来源于渔业生产、旅游活动等^[13-14,25],且海滩环境有利于塑料的风化,产生微塑料的可能性更大。因海水具有流动性,只能反映采样点当时的微塑料污染状况,而牡蛎和沉积物能够更好地反映一个区域内微塑料污染的长期状态^[26]。

本研究选取青岛近岸礁石上大量分布的野生牡蛎和海滩沉积物作为研究对象,分别在夏、秋、冬季同时采集野生牡蛎及其附近的海滩沉积物样本,开展 3 个季度的海洋微塑料调查,分析和评估该区域内牡蛎体内和海滩沉积物中海洋微塑料污染水平、季节性变化及二者的关联性,研究结果可为青岛沿海岸产品中微塑料污染的风险评估以及海洋微塑料的监测治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

采样于 2021 年夏季的 8 月 16 日、秋季的 10 月 17 日、冬季的 12 月 12 日进行,采样区域如图 1 所示。

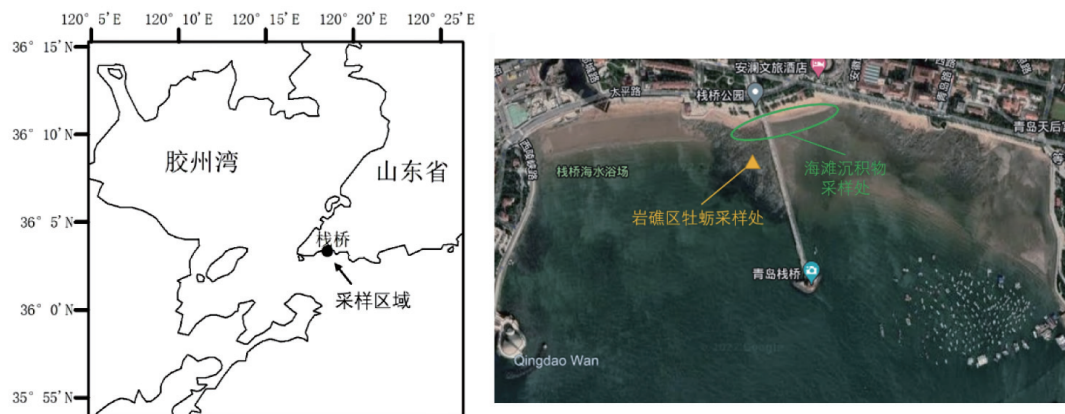


图 1 采样位置

Fig. 1 Sampling location

牡蛎样品采集于栈桥旅游区内退潮后的岩礁上,每次随机采集 35 个(壳长 3.2 ± 0.4 cm)。为避免其他因素对样品产生微塑料污染,样品用铝箔密封,带回实验室,在 -20°C 冰箱中保存。沉积物采样使用样方法^[27]。采集地点选择在栈桥旅

游区海滩高潮线和潮间带。每次在海滩高潮线和潮间带沿着海岸 100 m 范围内各随机选择 3 处 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的样方,用不锈钢勺采集上层 5 cm 以内的沉积物,每个样品重量 200 g 左右,每次采集 6 个样本,用铝箔纸密封带回实验室。

1.2 微塑料的提取

分析前先用电子游标卡尺(得力 DL91150)测量样本牡蛎的壳长,然后用蒸馏水冲洗所有样本,以去除样本外部的颗粒,再用解剖工具撬开外壳,分离其软组织。将5个样本的软组织加在一起置于烧杯中作为一个试验组,因此每个季节可获得7个试验组。用电子天平分别称量获得每个试验组的软组织重量,对每个季节35个牡蛎软组织重量进行季节间的方差分析,发现其重量差异不显著($P>0.05$)。每个试验组中加入200 mL 10%氢氧化钾溶液,进行组织消解。所有烧杯均用铝箔覆盖,在60℃水浴锅中加速消解3 h,然后在室温下消解24 h,再用真空抽滤机(予华 SHZ-DⅢ)进行抽滤。真空抽滤机滤膜采用0.45 μm 孔径的玻璃纤维素滤膜。为减少微塑料粘附造成的样品损失,用蒸馏水反复冲洗烧杯和漏斗的内壁。最后将滤膜放入有盖玻璃培养皿中避光保存,待下一步试验。

沉积物中微塑料的提取方法使用密度浮选法^[28]。在60℃烘箱内将沉积物样本干燥72 h至恒重;从每个样本称取50 g恒重的子样本,放置在玻璃烧杯中,加入200 mL饱和氯化钠溶液(1.2 g/cm³),用干净的玻璃棒手动搅拌1 min;用铝箔覆盖烧杯口,静置5 min之后,将沉淀物层以上的水溶液转移到另一个空置清洁玻璃烧杯中,获得含有微塑料的上清液体。为提高微塑料回收率,每个子样本重复浮选3次。3次收集的上清液置于同一烧杯,添加15 mL质量分数为30%的过氧化氢试剂在黑暗中消解24 h,以去除其中的生物有机质^[28]。随后的抽滤过程和滤膜保存与前述的操作一致。

1.3 微塑料的类别统计与计数

试验中依据如下标准判断是否为微塑料:1)用镊子不能将颗粒夹碎;2)颗粒颜色分布均匀;3)颗粒不含生物组织和细胞结构^[29-30]。本试验将微塑料分为碎片状、薄膜状和纤维状3种形状。采用目视识别法,用立体显微镜(Olympus, SZ51, 日本,放大倍数8~40倍)从左到右按Z字形观察滤膜上的微塑料的形状和颜色,并进行记录。微塑料的粒径以其最长边为准,用目镜上的显微刻度尺进行测量和计数^[26],按照<0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、2~3 mm、3~4 mm和4~5 mm六

大类进行分类和数量记录。

1.4 微塑料的成分鉴定

成分鉴定委托相关鉴定公司利用显微红外光谱仪(赛默飞 IN10)对颜色和形状最具代表性的9个夏季沉积物中的微塑料样品进行光谱分析。将样品光谱图与标准数据库进行比较,当与标准数据库匹配度超过80%时,可确定该微塑料的聚合物类型^[16]。

1.5 污染控制

本研究设置暴露于空气中的湿润滤膜(16组)、牡蛎消化过程用蒸馏水代替软组织(6组)二种空白试验,以校正试验过程中空气和操作过程可能带来的污染。参照前人研究排除与空白对照相似的污染物^[31-32]。在试验过程中,操作人员要求穿棉质实验服。试验中使用的玻璃器皿、解剖工具等器具在使用前均用蒸馏水清洗3次。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2016、SPSS 25.0 进行数据统计分析和作图。因讨论比较需要,牡蛎体内的微塑料丰度以平均每个个体所含的微塑料个数(items/individual)和每克软组织湿重对应的微塑料个数(items/g)表示;沉积物中的微塑料丰度以每克干重样本所含的微塑料个数(items/g)表示。当数据同时满足正态性及方差齐性时,采用独立样本T检验或ANOVA(单因素方差分析)进行差异性检验;否则用Mann-Whitney U检验或独立样本Kruskal-Wallis检验;当 $P<0.05$ 时,表示二者差异显著。

2 结果

2.1 检测出的微塑料数量

每个空气中的空白对照平均含0.4个污染物,每个消化过程空白试验平均含0.7个污染物,说明试验过程受轻微污染。夏、秋、冬季牡蛎体内检出的微塑料个数分别为53、26、37个;夏、秋、冬季沉积物中检出的微塑料个数分别为101、43、84个。

2.2 微塑料丰度

如图2所示,夏季牡蛎体内微塑料丰度为 1.51 ± 0.71 items/individual,秋季为 0.74 ± 0.43 items/individual,冬季为 1.06 ± 0.49 items/individual。按照由大到小的排列顺序为:夏季>

冬季>秋季。夏季显著高于秋季 ($P<0.05$, ANOVA), 夏季与冬季、秋季与冬季间均无显著性差异 ($P>0.05$, ANOVA)。3 个季节牡蛎体内的微塑料平均丰度为 1.10 ± 0.62 items/individual。

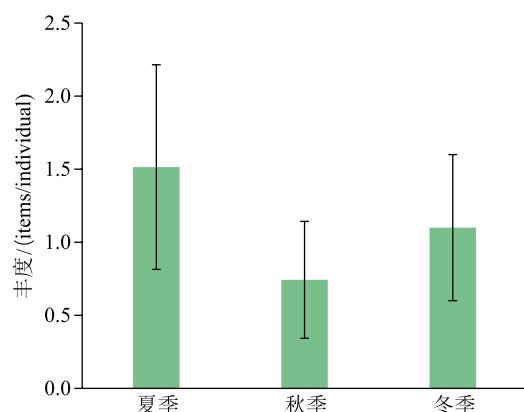


图2 不同季节牡蛎体内微塑料丰度变化

Fig. 2 Seasonal changes of microplastic abundance (items/individual) in oysters

如图3所示,当以 items/g 为单位时,夏季牡蛎体内微塑料丰度为 1.15 ± 0.55 items/g, 秋季为 0.63 ± 0.35 items/g, 冬季为 0.80 ± 0.56 items/g, 3 个季节间无显著性差异 ($P>0.05$, Kruskal-Wallis 检验)。

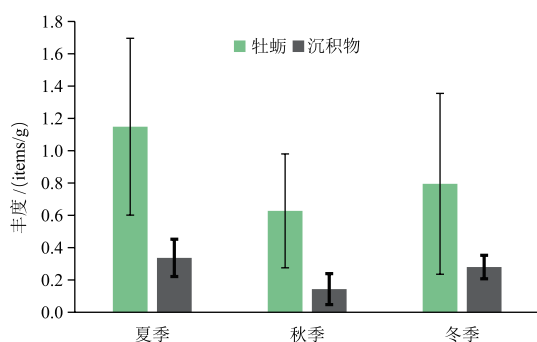


图3 不同季节牡蛎及沉积物中的微塑料丰度变化

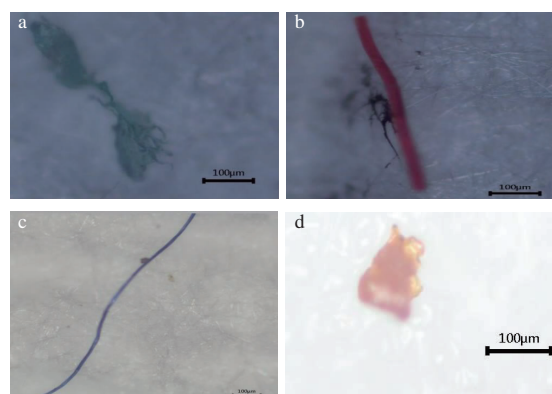
Fig. 3 Seasonal changes of microplastic abundance in oysters and sediments

3 个季节牡蛎体内的微塑料平均丰度为 0.86 ± 0.52 items/g。沉积物中微塑料丰度按照由大到小的排列顺序为: 夏季 (0.34 ± 0.12 items/g) > 冬季 (0.28 ± 0.07 items/g) > 秋季 (0.14 ± 0.10 items/g), 夏季显著高于秋季 ($P<0.05$, Kruskal-Wallis 检验), 夏季与冬季、秋季与冬季间均无显著性差异 ($P>0.05$, Kruskal-Wallis 检验)。3 个季节沉积

物中微塑料平均丰度为 0.25 ± 0.12 items/g。夏、秋、冬 3 个季节中牡蛎体内的微塑料丰度均极显著高于沉积物 ($P<0.01$, Mann-Whitney U 检验), 分别是沉积物中的 3.4 倍、4.5 倍和 2.9 倍。

2.3 微塑料形状

图4为牡蛎体内(a)和沉积物中(b、c、d)的微塑料样本形状图片,包括薄膜状、纤维状和碎片状。



注: a.薄膜状, b、c.纤维状, d.碎片状

图4 不同形状的微塑料

Fig. 4 Different shapes of microplastics

如图5所示,3 个季节牡蛎体内的微塑料均以纤维状为主,占比分别为 98.1%(夏季)、96.2%(秋季)和 100%(冬季),其中,夏季有少量薄膜状微塑料(占 1.9%),秋季有少量碎片状微塑料(占 3.8%)。沉积物中微塑料形状与牡蛎体内的类似,也是以纤维状为主,夏季纤维状占 98.0%,碎片状占 2.0%;秋季纤维状占 90.7%,碎片状占 9.3%;冬季纤维状占 98.8%,碎片状占 1.2%。

2.4 微塑料颜色

如图6所示,夏季牡蛎体内微塑料颜色以透明为主,占 79.2%,红色占 9.4%,其他颜色(蓝色、紫色和绿色)占 11.3%;秋季主要是透明色,占 61.5%,其次是蓝色占 30.8%,红色占 7.7%;冬季以透明和蓝色为主,分别占 48.6%、40.5%,黑色占 8.1%,红色占 2.7%。总体而言,牡蛎体内的微塑料颜色以透明为主,秋、冬季蓝色微塑料占比也处于较高的水平,其他颜色占比较少。

夏季沉积物中微塑料颜色以红色(52.5%)和透明(41.6%)为主,其他颜色(蓝色和紫色)占

5.9%;秋季以透明(46.5%)和蓝色(32.6%)为主,红色占16.3%,其他颜色(黑色和黄色)占4.6%;冬季以透明(36.9%)和蓝色(32.1%)为主,黑色占20.2%,其他颜色(红色和紫色)占

10.7%。总体而言,沉积物中微塑料颜色以透明、红色和蓝色为主,3个季节中透明微塑料占比较高且比例相当,红色微塑料比例在夏季较高,而蓝色微塑料在秋、冬季较高。

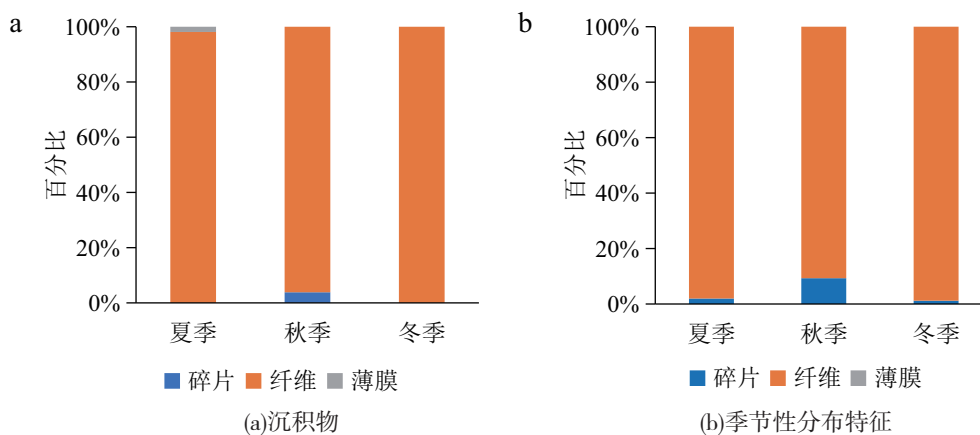


图5 不同形状的微塑料在牡蛎(a)和沉积物(b)中的季节性分布特征

Fig. 5 Seasonal changes of the shapes of microplastics in oysters (a) and sediments (b)

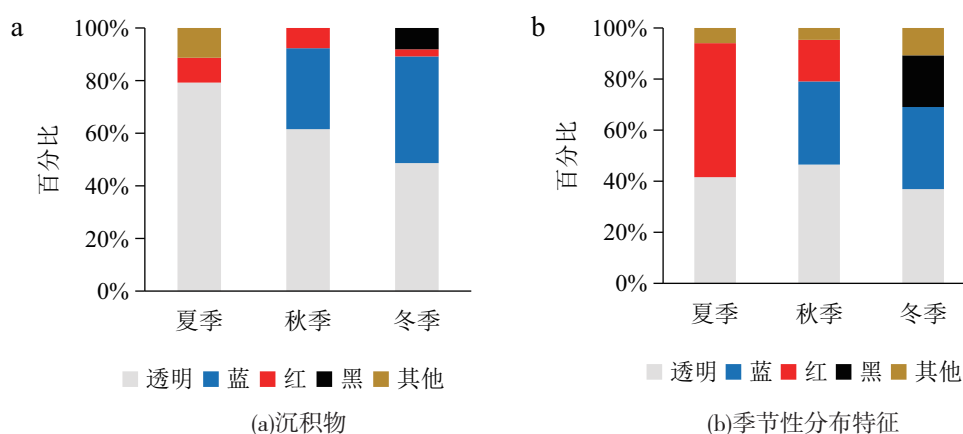


图6 不同颜色的微塑料在牡蛎(a)和沉积物(b)中的季节性分布特征

Fig. 6 Seasonal changes of the colors of microplastics in oysters (a) and sediments (b)

2.5 微塑料粒径

如图7所示,夏季牡蛎体内检出的微塑料粒径范围为0.15~1.575 mm,其中<0.5 mm的占47.2%,0.5~1 mm的占50.9%,1~2 mm的占1.9%;秋季的粒径范围为0.075~2.975 mm,<0.5 mm的占38.5%,0.5~1 mm的占46.2%,1~2 mm的分别占7.7%;冬季的粒径范围为0.075~1.575 mm,<0.5 mm的占62.2%,0.5~1 mm的占32.4%,1~2 mm的占5.4%。

夏季沉积物中检出的微塑料粒径范围为0.1~4.75 mm,最多为<0.5 mm,占37.6%,其

次是0.5~1 mm,占35.6%,1~2 mm的占16.8%,2~3 mm的占8.9%,4~5 mm的占1.0%;秋季的粒径范围为0.125~3.8 mm,最多为0.5~1 mm,占37.2%,其次是<0.5 mm的占27.9%,1~2 mm的占23.3%,2~3 mm的占9.3%,3~4 mm的占2.3%;冬季的粒径范围为0.15~3.475 mm,最多为0.5~1 mm,占44.0%,其次是<0.5 mm的占31.0%,1~2 mm的占23.8%,3~4 mm的占1.2%。牡蛎体内和沉积物中的微塑料粒径占比有一定差异,但均以粒径<1 mm为主,占比达65.1%以上。

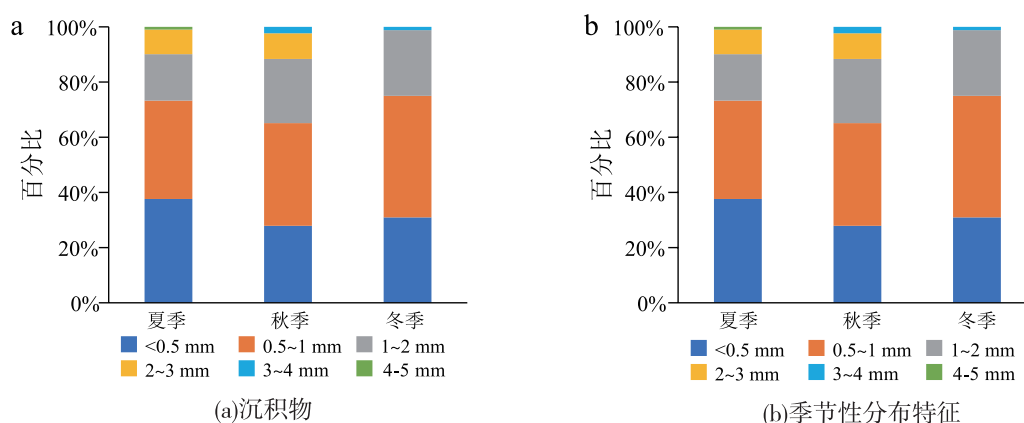


图 7 不同粒径的微塑料在牡蛎 (a) 和沉积物 (b) 中的季节性分布特征

Fig. 7 Seasonal changes of the sizes of microplastics in oysters (a) and sediments (b)

2.6 微塑料聚合物种类

夏季沉积物中的微塑料共检出 5 种聚合物类型,包括纤维素 (CE)、人造丝 (RY)、腈纶 (AC)、聚酯纤维 (PES) 和聚丙烯-聚乙烯共聚物 (PP-PE)。图 8 是 5 种微塑料样品的光谱图,与标准数据库中的匹配度均达 80% 以上。

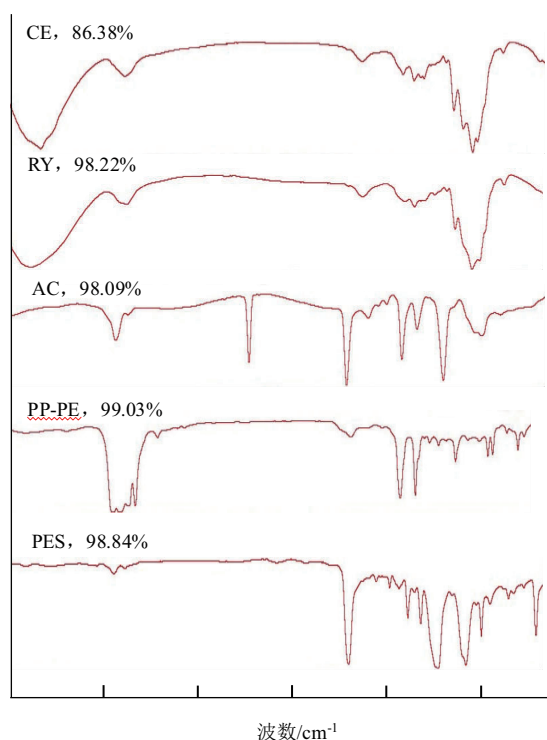


图 8 沉积物中 5 种微塑料样品的显微红外光谱图及其与标准数据库的匹配度

Fig. 8 The μ -FTIR spectra and match degrees compared with the standard database of five microplastics in sediments

3 讨论

3.1 微塑料丰度及其季节性变化

青岛近岸牡蛎体内 3 个季节的平均微塑料丰度 (1.10 ± 0.62 items/individual) 与青岛沙子口和黄岛地区养殖牡蛎四季的平均微塑料丰度 ($1.2 \sim 3.3$ items/individual) 相近^[33],表明青岛周边海域的微塑料对生物的污染水平接近。夏季牡蛎体内微塑料丰度 (1.51 ± 0.71 items/individual) 显著低于桑沟湾养殖牡蛎 (采集于夏季 7、8 月份) 体内的微塑料丰度 ($19 \sim 164$ items/individual)^[34],可能与桑沟湾海域大量的网箱、筏式养殖有关。青岛近岸牡蛎体内微塑料丰度随季节变化的趋势呈夏季>冬季>秋季。当以 items/individual 为单位时,夏季显著高于秋季 ($P < 0.05$)。温度的变化对滤食性贝类的摄食有显著的影响。Bayne 等^[35]研究表明,在适宜的温度范围内,摄食率随着温度的升高以幂函数的形式增加。夏季温度相对更高,导致牡蛎摄食量增加,使更多的微塑料进入牡蛎体内,这可能是夏季牡蛎体内丰度高于秋冬季的原因。

青岛近岸夏季沉积物中微塑料的丰度 (337 ± 116 items/kg) 比 Gao 等^[17]在 2019 年 8 月对栈桥海水浴场海滩沉积物中微塑料丰度的研究结果 (30.02 ± 2.49 items/kg) 高一个数量级。Gao 等^[17]以栈桥海水浴场单位面积海滩沉积物中微塑料个数为单位得出的研究结果 (279.63 ± 23.18 items/m²) 比罗雅丹等^[15]的研究结果 (4350 items/m²) 低一个数量级。青岛近岸沉积物中微

塑料丰度的季节变化趋势为夏季>冬季>秋季,与 Gao 等^[17]研究得到的青岛海水浴场内水体、海滩沉积物中夏季微塑料丰度大于冬季的结果一致。值得注意的是,相关研究结果表明旅游旺季的海滩上会出现高丰度的微塑料污染^[13-14],但本研究青岛近岸海滩沉积物中的微塑料丰度在秋季(10月份)最低,而10月份属于青岛旅游旺季。推测其原因,本试验秋季采样时间为2021年10月17日,而2021年10月9日青岛发生新型冠状病毒疫情,导致海滩上的旅游活动大量减少,可能是导致本试验结果与其他研究结果不一致的主要原因。

青岛近岸牡蛎体内与沉积物中的微塑料丰度季节性变化趋势一致。在夏、秋、冬3个季节中牡蛎体内的微塑料丰度都显著高于沉积物中的丰度,与 Jahan 等^[26]在澳大利亚新南威尔士州的研究结果类似,表明牡蛎体内可能出现了微塑料富集作用,需要引起重视。

3.2 微塑料形态

牡蛎体内和沉积物中微塑料的形状基本呈纤维状(占比大于90%),无明显季节性变化,高于沙子口和黄岛4种双壳类体内的纤维状微塑料占比(45%)^[33]以及珠江口野生牡蛎体内的占比(69.4%)^[36],与桑沟湾的养殖牡蛎中的纤维状微塑料占比相当(99%)^[34],这与相关研究中微塑料纤维在肠道的转运时间比微珠和碎片更长^[37]这一结果吻合,但造成不同区域间的差异可能与当地的微塑料来源有关,有待进一步探讨。3个季度青岛近岸沉积物中纤维状微塑料(占比90.0%以上)明显高于青岛近岸(红岛水产养殖区、李村河口附近、团岛污水处理厂、麦岛沙滩附近)潮滩沉积物中的占比(59.9%)^[16]。人类活动可以产生大量的纤维状微塑料,例如服饰、泳装等纺织品在使用过程中的纤维脱落,有研究表明墨西哥的旅游海滩沉积物中较高丰度的纤维状微塑料与泳衣和防紫外线服装有关^[13]。人类活动可能是造成上述结果的一个重要原因。其次,在研究区域西南方向距离不远的海域建设有一定规模的塑料网箱,推测本研究中出现的大量纤维状微塑料与渔用材料的磨损也有一定关系。本研究牡蛎体内与海滩沉积物中的纤维状微塑料在3个季度的占比均在90%以上,表现出高度的一致性。

青岛近岸牡蛎体内的微塑料颜色以透明和蓝色为主,与 Ding 等^[33]的研究中青岛四种养殖双壳类体内的透明和蓝色微塑料含量明显高于其他颜色以及 Fu 等^[38]统计的中国水生生物体内的微塑料最常见的颜色是蓝色和透明色的结果一致。青岛近岸沉积物中微塑料颜色以透明、红色、蓝色为主,其中,3个季节透明微塑料占比较高且比例相当,部分可能是有色纤维在强烈的太阳紫外线辐射影响下转化而来^[14];红色和蓝色纤维由于广泛应用于服装等编织物,可能与游客的服饰有关。牡蛎体内与沉积物中微塑料的颜色总体上保持一致,以透明、蓝色为主。

本研究中牡蛎体内的微塑料粒径范围在75~2975 μm ,与 Martinelli 等^[32]研究得到的美国萨利希海太平洋牡蛎体内的微塑料粒径范围102.45~2885.49 μm 相似,其中,以小于1 mm的微塑料为主(98.1%),这与其他研究结果相一致^[34,36],这是由于无脊椎动物更有可能摄入粒径较小(0.01~1 mm)的微塑料颗粒^[39]。青岛近岸海滩沉积物中的微塑料粒径以小于1 mm居多,与其他研究一致^[15-16]。牡蛎体内与沉积物中微塑料的粒径分布总体上保持一致,均以1 mm以下的为主。

3.3 微塑料聚合物种类

本研究共检测出夏季沉积物中有5种微塑料,包括聚酯纤维、人造丝、腈纶、纤维素和聚丙烯-聚乙烯共聚物,对比 Gao 等^[17]对2019年夏季栈桥海水浴场海滩沉积物中的微塑料种类的研究只检测出人造丝、聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚乙烯,其中以人造丝占比最高。由于本研究的微塑料成分鉴定仅检测了9个典型样品,因此没有对每种微塑料的占比进行分析,需要在今后的研究中补充检测样品量。从微塑料种类分析其来源,人造丝、聚酯纤维、腈纶可能来源于服装、洗衣废水等。

3.4 生物指示种的讨论

在丰度层面上,有研究表明牡蛎体内的微塑料丰度可以反映水体中的微塑料污染程度^[36]。本研究发现,沉积物中与牡蛎体内的微塑料丰度的季节性变化趋势一致,但3个季节中牡蛎体内的微塑料丰度都显著高于沉积物中的丰度,约为3~4倍,说明环境中微塑料丰度的动态变化可以

在牡蛎体内得到体现;在形状层面上,二者之间的形状保持了高度一致性,表明生物体内积累的微塑料形状与沉积物中微塑料形状密切相关;在颜色层面上,牡蛎体内与沉积物中微塑料的颜色总体上保持一致,可以反映环境中的微塑料颜色特征;在粒径层面上,二者的粒径分布总体上保持一致,均以 1 mm 以下的微塑料为主,可以反映环境中的微塑料粒径特征。综上所述,建议以礁石上的野生牡蛎作为青岛近岸海洋微塑料污染的生物指示种。本研究目前主要从定性的角度分析了牡蛎体内和海滩沉积物中微塑料之间的关联,未来还需要进一步开展更多的实验室和野外试验,以深入了解牡蛎摄取微塑料的机制,建立牡蛎体内与其周围海洋环境中微塑料特征之间的对应关系,为减少牡蛎体内的微塑料富集及其健康养殖提供理论指导。

4 结论

本研究探讨了夏、秋、冬季青岛近岸牡蛎体内及沉积物中的微塑料分布特征及其随季节的变化情况。结果显示,牡蛎体内和沉积物中微塑料丰度的季节性变化趋势具有一致性,均为夏季>冬季>秋季。总体上,牡蛎体内及海滩沉积物中均以粒径<1 mm 的纤维状微塑料为主,无明显的季节性变化;在颜色方面,牡蛎体内与沉积物中微塑料的颜色存在一定季节性差异,但总体上二者保持一致,以透明、蓝色为主。显微红外光谱显示,微塑料的化学成分有聚酯纤维、腈纶、人造丝、纤维素和聚丙烯-聚乙烯共聚物。基于牡蛎与沉积物中微塑料丰度随季节变化的一致性和微塑料物理特征上的相似性,建议把牡蛎作为青岛近岸海洋微塑料污染的指示生物。另一方面,在贝类等水产动物设施养殖区周围应控制微塑料来源,以确保生物的健康和水产品的安全性。□

参考文献

- [1] 王彤,胡献刚,周启星. 环境中微塑料的迁移分布、生物效应及分析方法的研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(4): 385-395.
- [2] AUTA H S, EMENIKE C U, FAUZIAH S H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment; a review of the sources, fate, effects, and potential solutions [J]. Environment international, 2017, 102: 165-176.
- [3] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. Science, 2015, 347(6223): 768-771.
- [4] LUSHER A L, TIRELLI V, O'CONNOR I, et al. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 1-9.
- [5] IMHOF H K, SIGL R, BRAUER E, et al. Spatial and temporal variation of macro-, meso- and microplastic abundance on a remote coral island of the Maldives, Indian Ocean [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 116(1/2): 340-347.
- [6] 黄磊,李芊,徐向荣,等. 西沙群岛海域表层海水中微塑料的组成与分布特征[J]. 科学通报, 2020, 65(24): 2627-2635.
- [7] VAN CAUWENBERGHE L, VANREUSEL A, MEES J, et al. Microplastic pollution in deep-sea sediments [J]. Environmental Pollution, 2013, 182: 495-499.
- [8] PENG G, ZHU B, YANG D, et al. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. Environmental Pollution, 2017, 225: 283-290.
- [9] 刘启明,梁海涛,锡桂莉,等. 厦门湾海滩微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1217-1221.
- [10] DESFORGES J P W, GALBRAITH M, ROSS P S. Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean [J]. Archives of environmental contamination and toxicology, 2015, 69(3): 320-330.
- [11] NEVES D, SOBRAL P, FERREIRA J L, et al. Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast [J]. Marine pollution bulletin, 2015, 101(1): 119-126.
- [12] WANG Q, ZHU X, HOU C, et al. Microplastic uptake in commercial fishes from the Bohai Sea, China [J]. Chemosphere, 2021, 263: 127962.
- [13] RETAMA I, JONATHAN M P, SHRUTI V C, et al. Microplastics in tourist beaches of Huatulco Bay, Pacific coast of southern Mexico [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 113(1/2): 530-535.
- [14] STOLTE A, FORSTER S, GERDTS G, et al. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 99(1/2): 216-229.
- [15] 罗雅丹,林千惠,贾芳丽,等. 青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2631-2638.
- [16] 尹诗琪,贾芳丽,刘筱因,等. 青岛近岸表层海水和海滩沉积物中微塑料的分布及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1410-1418.
- [17] GAO F, LI J, HU J, et al. The seasonal distribution characteristics of microplastics on bathing beaches along the coast of Qingdao, China [J]. Science of The Total Environment, 2021, 783: 146969.
- [18] SUSSARELLU R, SUQUET M, THOMAS Y, et al. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2016, 113

- (9):2430-2435.
- [19] VON MOOS N, BURKHARDT-HOLM P, KOHLER A. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure [J]. Environmental science & technology, 2012, 46 (20): 11327-11335.
- [20] YIN L, CHEN B, XIA B, et al. Polystyrene microplastics alter the behavior, energy reserve and nutritional composition of marine jacopecver (*Sebastes schlegelii*) [J]. Journal of hazardous materials, 2018, 360: 97-105.
- [21] VAN CAUWENBERGHE L, JANSSEN C R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption [J]. Environmental pollution, 2014, 193: 65-70.
- [22] SETÄLÄ O, NORKKO J, LEHTINIEMI M. Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community [J]. Marine pollution bulletin, 2016, 102(1): 95-101.
- [23] WESCH C, BREDIMUS K, PAULUS M, et al. Towards the suitable monitoring of ingestion of microplastics by marine biota; A review [J]. Environmental pollution, 2016, 218: 1200-1208.
- [24] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 23.
- [25] XUE B, ZHANG L, LI R, et al. Underestimated microplastic pollution derived from fishery activities and “hidden” in deep sediment [J]. Environmental science & technology, 2020, 54 (4): 2210-2217.
- [26] JAHAN S, STREZOV V, WELDEKIDAN H, et al. Interrelationship of microplastic pollution in sediments and oysters in a seaport environment of the eastern coast of Australia [J]. Science of the Total Environment, 2019, 695: 133924.
- [27] ASLAM H, ALI T, MORTULA M M, et al. Evaluation of microplastics in beach sediments along the coast of Dubai, UAE [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150: 110739.
- [28] ZHAO J, RAN W, TENG J, et al. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 640: 637-645.
- [29] COLE M, LINDEQUE P, HALSBAND C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment; a review [J]. Marine pollution bulletin, 2011, 62(12): 2588-2597.
- [30] HIDALGO-RUZ V, GUTOW L, THOMPSON R C, et al. Microplastics in the marine environment; a review of the methods used for identification and quantification [J]. Environmental science & technology, 2012, 46(6): 3060-3075.
- [31] TSANGARIS C, DIGKA N, VALENTE T, et al. Using Boops boops (osteichthyes) to assess microplastic ingestion in the Mediterranean Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 158: 111397.
- [32] MARTINELLI J C, PHAN S, LUSCOMBE C K, et al. Low incidence of microplastic contaminants in Pacific oysters (*Crassostrea gigas Thunberg*) from the Salish Sea, USA [J]. Science of the Total Environment, 2020, 715: 136826.
- [33] DING J, SUN C, HE C, et al. Microplastics in four bivalve species and basis for using bivalves as bioindicators of microplastic pollution [J]. Science of the Total Environment, 2021, 782: 146830.
- [34] WANG J, LU L, WANG M, et al. Typhoons increase the abundance of microplastics in the marine environment and cultured organisms; a case study in Sanggou Bay, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 667: 1-8.
- [35] 董波, 薛钦昭, 李军. 滤食性贝类摄食生理的研究进展 [J]. 海洋科学, 2000(7): 31-34.
- [36] LI H X, MA L S, LIN L, et al. Microplastics in oysters *Saccostrea cucullata* along the Pearl River estuary, China [J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 619-625.
- [37] QIAO R, DENG Y, ZHANG S, et al. Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish [J]. Chemosphere, 2019, 236: 124334.
- [38] FU Z, CHEN G, WANG W, et al. Microplastic pollution research methodologies, abundance, characteristics and risk assessments for aquatic biota in China [J]. Environmental Pollution, 2020, 266: 115098.
- [39] THUSHARI G G N, SENEVIRATHNA J D M, YAKUPITIYAGE A, et al. Effects of microplastics on sessile invertebrates in the eastern coast of Thailand; an approach to coastal zone conservation [J]. Marine pollution bulletin, 2017, 124 (1): 349-355.

Seasonal distribution characteristics and correlation of microplastics in coastal wild oysters and beach sediments in Qingdao

HUANG Liuyi, HUANG Jiehong, YOU Xinxing, SHENG Huaxiang, WANG Chong, PENG Hai

(*College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266000, China*)

Abstract: Marine microplastics in coastal regions, where human activity is intense, have attracted widespread attention. In this paper, the distribution, composition, and seasonal variation of marine microplastics in oysters and sediments of Zhanqiao Pier are studied. The results showed that the variation trend of microplastic abundance in oysters and sediments is consistent, with the tendency that summer > winter > autumn. In all three seasons, the abundance of microplastics in oysters was significantly higher than that in sediments, which was 3–4 times that in the sediment. Overall, Microplastics in oysters and sediments are mainly fibers, <1 mm, with no obvious seasonal change. In general, the color of microplastics in oysters and beach sediments is mainly transparent and blue. Micro-FTIR shows that the polymers of microplastics include polyester, acrylic, rayon, cellulose, and polypropylene-polyethylene copolymer. Based on the consistency of the abundance of microplastics in oysters and sediments with seasonal changes and the similarity of the physical characteristics of microplastics, it is suggested that oysters should be used as marine microplastics indicators in the Qingdao coast. This study can provide a reference for the risk assessment and monitoring of marine microplastics pollution in Qingdao inshore marine products.

Key words: oyster; marine pollution; marine monitoring; marine microplastics; beach sediments; seasonal differences; qingdao coast

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.010

一种赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长和水质影响

管立平¹, 谢晶晶¹, 李伟豪¹, 陈昊震¹, 温振中¹, 孙成波^{1,2,3}

(1 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524088;

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524025;

3 广东省水产经济动物病原生物学及流行病学重点实验室, 广东 湛江 524088)

摘要:为探讨一种赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长、存活和养殖水质的影响。设1个试验组和1个对照组, 每组3个平行, 125尾对虾/桶, 初始体质量(5.18±0.13)g、体长(9.40±0.18)cm、水温(26±2)℃、盐度30、试验时间10d。试验组定期添加浓度为0.463×10⁹ CFU/mL的赖氨酸芽孢杆菌菌液, 试验组和对照组NH₄⁺-N质量浓度变化范围分别为(0.05±0.01)~(5.51±0.09)mg/L、(0.05±0.01)~(6.07±0.22)mg/L。NO₂⁻-N质量浓度变化范围分别为(0.07±0.01)~(0.13±0.01)mg/L、(0.07±0.01)~(0.19±0.01)mg/L。NO₃⁻-N质量浓度变化范围分别为(0.07±0.01)~(0.81±0.07)mg/L、(0.07±0.01)~(1.26±0.07)mg/L。pH的变化范围分别为(7.10±0.01)~(7.74±0.01)、(7.03±0.01)~(7.74±0.01)。结果显示:赖氨酸芽孢杆菌对养殖水体中的NH₄⁺-N、NO₂⁻-N和NO₃⁻-N的控制及pH调控具有极显著效果(P<0.01);试验组和对照组终末体质量分别为(7.01±0.38)g、(6.78±0.23)g, 终末体长分别为(9.67±0.08)cm、(9.63±0.04)cm, 试验组相比于对照组有明显的提高但两者不存在显著性差异(P>0.05);试验组存活率(77.07%±1.22%)显著高于对照组(71.73%±2.81%)具有显著效果(P<0.05)。研究表明, 赖氨酸芽孢杆菌有助于促进凡纳滨对虾生长、存活和水质调控。

关键词:赖氨酸芽孢杆菌; 凡纳滨对虾; 水质净化; 生长指标

中图分类号:S966.1

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0077-007

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)原产于太平洋沿岸水域, 因其具有适应性强、生长速度快、产肉率高等优点, 在世界范围内被广泛养殖^[1]。随着凡纳滨对虾养殖业的迅猛发展, 经历了数年大规模高密度养殖, 养殖生产中用药量不断增加, 导致水环境污染负荷日益加重、病害频繁发生、养殖产品质量下降, 严重影响到了水产品安全和产业的可持续发展, 促使人们越来越关注通过运用微生物制剂净化养殖尾水及循环利用的研究及方法^[2-5]。

微生物制剂被广泛运用及微生物制剂的研究证实有利于增强养殖凡纳滨对虾的免疫能力和提升凡纳滨对虾养殖生产的综合效益, 但在凡纳滨对虾养殖的过程中, 需充分考虑具体的凡纳滨对虾养殖环境以及相关影响因子, 科学运用微生物调控技术, 制定有效的凡纳滨对虾养殖方案, 保障

养殖凡纳滨对虾的品质安全, 尽可能降低凡纳滨对虾养殖对环境的污染, 减少疾病的发生, 达到凡纳滨对虾养殖的可持续发展^[6]。在常用的微生态制剂中, 芽孢杆菌具有抗逆性强、稳定性好、耐氧化、耐酸碱等特点从而成为研究热点^[7]。同时芽孢杆菌具有促进生长和预防疾病的作用, 可作为抗生素的替代品、饲料添加剂和水质调节控制剂^[8-9]。目前国内水产养殖相关研究的芽孢杆菌主要为枯草芽孢杆菌^[10]、地衣芽孢杆菌^[11]、蜡样芽孢杆菌^[12]和凝结芽孢杆菌^[13], 而赖氨酸芽孢杆菌的相关研究主要还是处于分离筛选鉴定试验中^[14], 并未做相关的水产养殖验证试验。

本研究通过已筛选出的赖氨酸芽孢杆菌, 以持续泼洒的方式^[15], 探讨赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾的养殖水质净化效果和生长指标的影响。

收稿日期:2022-03-23

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(对接国家重大项目)“海水池塘生态工程化养殖技术与模式(2020B0202010009)”;冲一流省财政专项资金“南海经济虾类育种和养殖实验室(231419025)”

作者简介:管立平(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向:甲壳动物增养殖。E-mail:13682614536@163.com

通信作者:孙成波(1970—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向:甲壳动物增养殖。E-mail:sunchb@gdou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 赖氨酸芽孢杆菌

本实验室从广东省沿海对虾地膜精养池筛选的一株赖氨酸芽孢杆菌经过 PCR 扩增产物,再经过 1% 琼脂糖凝胶电泳检测,送至生物工程(上海)股份有限公司进行测序,将测序结果在 NCBI

上进行 BLAST 比对分析,以确定菌株的种类和分类地位。

利用 MEGA 7.0 软件中的基于 1 000 次 bootstrap 重复算法的 neighbor-joining 方法,构建系统进化树,如图 1 所示,可得试验菌株为赖氨酸芽孢杆菌属 (*Lysinibacillus*) 成员。配制浓度为 0.463×10^9 CFU/mL 的赖氨酸芽孢杆菌菌液。

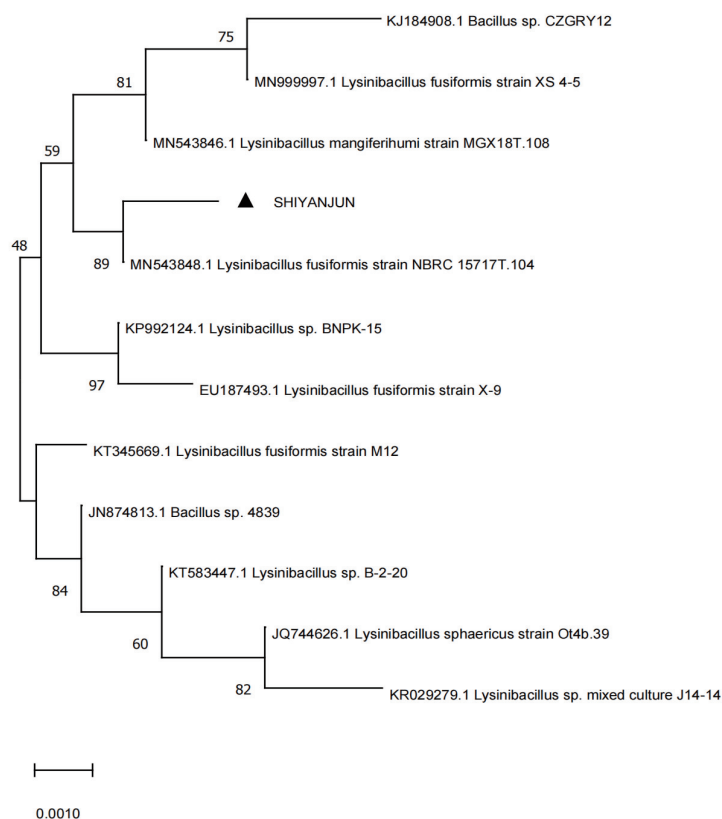


图 1 基于 16S rRNA 基因序列构建的赖氨酸芽孢杆菌系统发育进化树

Fig. 1 Phylogenetic tree of *Lysinibacillus* based on 16S rRNA gene sequence

1.2 试验对虾及饲养管理

试验在广东海洋大学东海岛海洋生物研究基地内进行,利用 300 L 试验桶装经过滤沉淀、含氯消毒剂消毒和曝气的天然海水 250 L,放养 125 尾凡纳滨对虾/桶,微管曝气增氧,自然光照,试验全程采用全封闭零交换水模式。凡纳滨对虾取自广东海洋大学东海岛海洋生物研究基地,平均体长为 (9.40 ± 0.18) cm,体质量 (5.18 ± 0.13) g,附肢完整、健康、活力好。试验设 1 个试验组和 1 个对照组,每组设 3 个平行,量取 25 mL 赖氨酸芽孢杆菌菌液,赖氨酸芽孢杆菌使用量为 0.463×10^4 CFU/mL,每隔 3 d 使用 1 次,试验 10 d。投喂

饵料 4 次/d,投喂 6.25 g/次,投喂时间为 07:00、11:00、15:00、19:00。

1.3 样品采集与处理

试验开始和结束时各测定一次凡纳滨对虾体长和体质量。每天 14:00 利用注射器抽吸法在水面下方 5.00 cm 处采集水样并测定对虾养殖水体温度、pH 和盐度。

1.4 试验参数的计算方法

$$L = L_t - L_0 \quad (1)$$

$$W = W_t - W_0 \quad (2)$$

$$S = (S_t/S_0) \times 100 \% \quad (3)$$

$$F = F_t/W \quad (4)$$

式中: L 为增体长量,cm; L_t 为终末体长,cm; L_0 为初始体长,cm; W 为增体质量,g; W_t 为终末体质量,g; W_0 为初始体质量,g; S 为存活率; S_t 为终末存活尾数; S_0 为初始存活尾数; F 为投饲系数; F_t 为投喂饲料总量。

1.5 水质指标测定方法

铵态氮含量按照(HJ 535—2009)标准采取靛酚蓝法测定^[16];亚硝酸盐氮含量按照(GB 7493—87)标准采用N-(1-萘基)-己二胺分光光度法测定^[16];硝酸盐氮含量按照按(GB 17378.4—1998—39)标准采用锌-镉还原法测定^[16]。

1.6 数据统计与分析

采用Excel软件处理数据列出变化趋势图和运用SPSS 19.0软件对数据单因素ANOVA方差分析,试验数据通过平均值+标准差表述^[17]。

2 结果

2.1 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长存活的影响

凡纳滨对虾饲养10 d后,凡纳滨对虾的体质量(体长)、存活率及投饲系数如表1所示,其中整体试验组存活率(77.07%±1.22%)与对照组存活率(71.73%±2.81%)存在显著性差异($P<0.05$),而试验组和对照组的体长(体质量)增长和投饲系数无显著性差异($P>0.05$),但试验组体长增长(0.37±0.17)cm、体质量增长(1.88±0.50)g高于对照组体长增长(0.23±0.10)cm、体质量增长(1.57±0.09)g且相比于对照组的投饲系数(1.78±0.12),添加赖氨酸芽孢杆菌的试验组(投饲系数:1.47±0.45)能有效降低0.31。

表1 凡纳滨对虾的体质量(体长)、存活率及投饲系数

Tab.1 Body weight (body length), survival rate and feed efficiency of *L. vannamei*

处理	平均体长/cm		平均体质量/g		投饲系数	存活率/%
	0 h	240 h	0 h	240 h		
A	9.40±0.08	9.76±0.67	5.12±0.09	7.17±0.50	1.27	78.40
B	9.30±0.09	9.51±0.46	5.26±0.23	6.58±0.44	1.99	76.00
C	9.20±0.08	9.74±0.52	5.03±0.12	7.28±0.72	1.16	76.80
D	9.20±0.08	9.54±0.47	5.08±0.34	6.55±0.89	1.89	72.00
E	9.60±0.09	9.75±0.58	5.38±0.35	7.01±0.81	1.65	74.40
F	9.50±0.09	9.69±0.59	5.18±0.26	6.79±0.48	1.81	68.80

注:添加赖氨酸芽孢杆菌试验组:A组、B组、C组,未添加赖氨酸芽孢杆菌对照组:D组、E组、F组

2.2 赖氨酸芽孢杆菌对水体理化因子的影响

2.2.1 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体 NH_4^+ -N含量的影响

赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体 NH_4^+ -N含量变化的影响如图2所示,试验组和对照组 NH_4^+ -N质量浓度分别从开始的(0.05±0.01)mg/L、(0.05±0.01)mg/L不断上升,在第10天时达到峰值质量浓度分别为(5.51±0.09)mg/L、(6.07±0.22)mg/L,通过添加赖氨酸芽孢杆菌浓度为 0.463×10^9 CFU/mL的试验组与对照组的 NH_4^+ -N含量在第二天开始存在显著差异($P<0.05$),但第3天时试验组 NH_4^+ -N质量浓度(1.68±0.16)mg/L与对照组 NH_4^+ -N质量浓度(1.98±0.19)mg/L无显著差异。而在第6天时,试验组与对照组 NH_4^+ -N质量浓度分别为(3.45±0.05)mg/L、(4.24±0.17)mg/L,此时差异性极其显著($P<0.01$)且相

对降低 NH_4^+ -N浓度18.85%。

2.2.2 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体 NO_2^- -N含量的影响

赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体 NO_2^- -N含量变化的影响如图3所示,试验组与对照组的 NO_2^- -N质量浓度分别从开始的(0.07±0.01)mg/L、(0.07±0.01)mg/L进行交叉升降至第5天 NO_2^- -N质量浓度(0.13±0.01)mg/L、(0.14±0.02)mg/L,而在第5天开始,试验组的 NO_2^- -N质量浓度均低于对照组 NO_2^- -N质量浓度,且在第7天时,试验组 NO_2^- -N质量浓度(0.11±0.01)mg/L与对照组 NO_2^- -N质量浓度(0.12±0.01)mg/L开始具有显著差异($P<0.05$),而后对照组 NO_2^- -N质量浓度在第8天达到峰值质量浓度为(0.19±0.01)mg/L与试验组 NO_2^- -N质量浓度

为 (0.13 ± 0.01) mg/L 相比,赖氨酸芽孢杆菌试验组去除 NO_2^- -N 效果显著极其显著 ($P < 0.01$) 且去除率达到 50.00%。

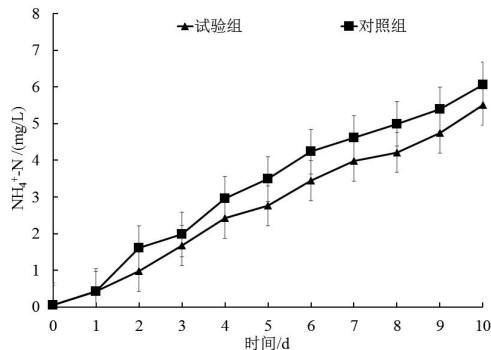


图2 芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水样的 NH_4^+ -N 含量的影响

Fig. 2 Effect of *Lysinibacillus* on the content of NH_4^+ -N in *L. vannamei* culture water

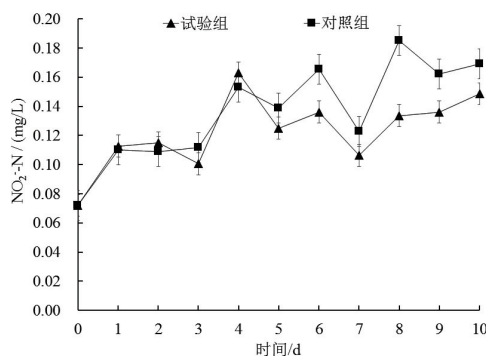


图3 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水样的 NO_2^- -N 含量的影响

Fig. 3 Effect of *Lysinibacillus* on the content of NO_2^- -N in *L. vannamei* culture water

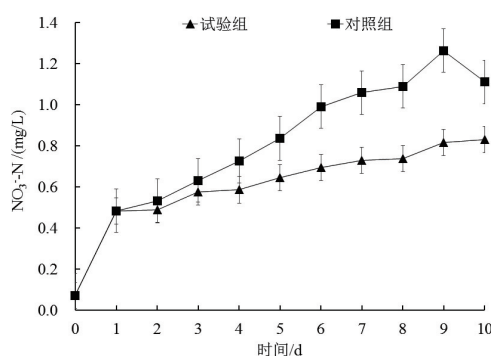


图4 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水样的 NO_3^- -N 含量的影响

Fig. 4 Effect of *Lysinibacillus* on the content of NO_3^- -N in *L. vannamei* culture water

2.2.3 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体 NO_3^- -N 含量的影响

赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体 NO_3^- -N 含量变化的影响如图4所示,对照组 NO_3^- -N 含量快速的上升而试验组 NO_3^- -N 含量平缓上升,在第4天时,试验组与对照组 NO_3^- -N 含量分别为 (0.59 ± 0.06) mg/L、 (0.73 ± 0.16) mg/L,此时具有显著性差异 ($P < 0.05$),随着试验时间增加,对照组 NO_3^- -N 浓度在第9天时达到峰值质量浓度为 (1.26 ± 0.07) mg/L,而试验组 NO_3^- -N 质量浓度为 (0.82 ± 0.07) mg/L,此时赖氨酸芽孢杆菌试验组相对净化 NO_3^- -N 含量达到 0.44 mg/L,净化效果极其显著 ($P < 0.01$)。

2.2.4 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水样的 pH 的影响

赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体 NO_3^- -N 含量变化的影响如图5所示,试验组在 0~72 h 的 pH 从 (7.74 ± 0.01) 下降至 (7.62 ± 0.03) ,而后略微上升至 (7.67 ± 0.04) ,而后下降至 (7.66 ± 0.04) ;而对照组在 0~72 h 的 pH 则是从 (7.74 ± 0.01) 缓慢下降 (7.63 ± 0.02) ,24 h 之后上升至 (7.71 ± 0.01) 。试验组与对照组的 pH 从第3天开始快速下降,在第5天时,试验组 pH (7.26 ± 0.04) 与对照组 pH (7.15 ± 0.02) 存在显著差异 ($P < 0.05$),而后从第6天开始,试验组 pH (7.15 ± 0.01) 与对照组 pH (7.05 ± 0.03) 存在极其显著差异 ($P < 0.01$)。

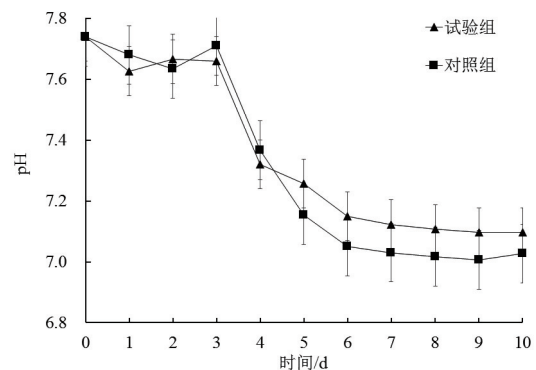


图5 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体的 pH 的影响

Fig. 5 Effect of *Lysinibacillus* on the content of pH in *L. vannamei* culture water

3 讨论

3.1 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长存活的影响

本试验中,添加赖氨酸芽孢杆菌试验组中凡纳滨对虾的体质量(体长)增长和投饲系数降低较对照组有差异不显著,其中试验组(A组、C组)投饲系数均低于对照组且试验组存活率显著高于对照组,这与李军亮等^[18]的研究结果中相似的是添加枯草芽孢杆菌可提高凡纳滨对虾的生长性能和降低饵料系数,与刘强强等^[15]的添加芽孢杆菌对凡纳滨对虾的增重率有不同程度上的提高但差异不显著以及饲料系数低于对照组的研究结果初步一致。这与芽孢杆菌的特性有关:1)芽孢杆菌能有效促进养殖对象肠道发育,增加肠黏膜的厚度、肠绒毛的高度及细胞密度,其表面抗原或代谢物担当免疫原不断刺激凡纳滨对虾的免疫防御系统,同时芽孢杆菌通过与有害细菌争夺营养和附着位点,保护机体免受病原菌的侵染,提高存活率^[19-22];2)芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体具有较好的净化的作用,给予养殖对象较好的生长环境条件^[23-24]。

3.2 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体的铵态氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮含量的影响

本试验验证浓度为 0.463×10^9 CFU/mL 的赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体铵态氮含量、亚硝酸盐氮含量、硝酸盐氮含量能分别有效降低 18.85%、50.00%、36.97%,相比于赵德炳等^[25]的自研净化剂、欧阳月等^[26]的聚合氯化铝净水剂,虽芽孢杆菌降氮能力较弱,但能直接分解氨氮物质,降低对养殖对象毒害作用和绿色养殖的效果^[25]。芽孢杆菌作为一种化能异养菌,其亚硝化作用方程式: $\text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^- + 1/2\text{O}_2 = \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$, 试验结果表明赖氨酸芽孢杆菌能达到较好的去除亚硝酸盐氮的效果,同时发现养殖水体中硝酸盐氮有显著性降低,这应该是赖氨酸芽孢杆菌的同化作用的影响,主要通过利用铵态氮和硝酸盐氮合成自身营养物质,满足自身的新陈代谢^[27]。此外铵态氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮仍有上升的趋势,可能投喂饵料和凡纳滨对虾代谢物增加所导致有机氮过剩的原因^[28]。此试验结果证实赖氨酸芽孢杆菌是一种有益微生物。

3.3 赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾养殖水体的 pH 的影响

在养殖凡纳滨对虾的过程,凡纳滨对虾的排泄物和未完全利用的饵料等有机氮硝化过程以及芽孢杆菌以养殖水体中的有机物质作为碳源进行有氧呼吸,产生 CO_2 ^[29],都会致使水体中的 pH 逐渐下降,但赖氨酸芽孢杆菌的同化作用通过结合铵态氮和硝酸盐氮合成自身所需的影响^[28],促使试验组的养殖水体的 pH 相对于对照组下降速度更缓慢且会进行调控 pH,试验组平均 pH 达到 7.35,最低值为 7.09,这与白利丹研究报告中结果相似^[30],若使 pH 维持在理想的范围,可以通过持续增加磷钙物或有益微生物浓度调节 pH^[31]。

3.4 赖氨酸芽孢杆菌的使用存在问题及解决方法

芽孢杆菌的代谢和生长容易受到环境等外界因素的变化而波动,此次试验中,赖氨酸芽孢杆菌菌液直接泼洒到养殖水体,而水体中的其他菌群可能对其代谢和生长有影响;再者养殖动物体质量大小不一,各个生长阶段的营养需求及适应条件不同^[10],水环境因素,在养殖过程中滋生大量细菌对试验的影响等等,无法控制使用最适菌液浓度,导致效果不理想。解决方法:在有限的条件下,尽量控制变量因素,挑选规格大小相同对虾,科学高效的养殖管理方式,进行多次检查试验桶,尽可能地将死虾捞出计数,避免污染水质,减小试验数据差异。在实际应用中,要想赖氨酸芽孢杆菌投入养殖水体后起到改善水质的作用,需确保水体中活菌体浓度,才会有较好的效果^[32]。

4 结论

通过持续添加赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾的生长和水质初步研究表明,赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾的生长和存活有一定的作用,同时对于养殖水质中的铵态氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、pH 具有显著性的调控。赖氨酸芽孢杆菌是一种有益菌,利于养殖行业的绿色可持续发展,可以推广使用。□

参考文献

- [1] 张倩,王全超,于洋,等. 凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 形态性状与净肉重和出肉率的关系[J]. 海洋与湖沼, 2018,

- 49(3):653-661.
- [2] 赵坤,田相利,李咏梅,等. 凡纳滨对虾养殖池塘高效脱氮芽孢杆菌的分离筛选及特性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(增刊1):17-29.
- [3] 孟睿,何连生,席北斗,等. 芽孢杆菌与硝化细菌净化水产养殖废水的试验研究[J]. 环境科学与技术,2009,32(11):28-31.
- [4] 黄学军. 海水养殖尾水处理技术及其应用[J]. 江西水产科技,2021(5):44-45.
- [5] 汤保贵,徐中文,张金燕,等. 枯草芽孢杆菌的培养条件及对水质的净化作用[J]. 淡水渔业,2007(3):45-48.
- [6] NEWAJ-FYZUL A, AL-HARBI A H, AUSTIN B. Review: Developments in the use of probiotics for disease control in aquaculture [J]. Aquaculture, 2014, 431: 1-11.
- [7] 雷爱莹,彭敏,曾地刚,等. 枯草芽孢杆菌的分离和净化水质的研究[J]. 广西农业科学,2005(3):248-250.
- [8] CAVAZZONI V, ADAMI A, CASTROVILLI C. Performance of broiler chickens supplemented with *Bacillus coagulans* as probiotic[J]. British Poultry Science, 1998, 39(4): 526-529.
- [9] SIRIRAT R, WANNIPA P, SOMKIAT P, et al. Effects of a probiotic bacterium on black tiger shrimp *Penaeus monodon* survival and growth [J]. Aquaculture, 1998, 167(3): 301-313.
- [10] 苏艳丽,孙盛明,朱健,等. 枯草芽孢杆菌在水产养殖中的研究进展[J]. 中国渔业质量与标准,2016,6(6):32-39.
- [11] 雷新雨,陈玉珂,王桂芹,等. 芽孢杆菌在水产养殖中的研究进展[J]. 饲料工业,2021,42(20):46-49.
- [12] 唐杨,刘文亮,宋晓玲,等. 饲料中补充蜡样芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长及其肠道微生物组成的影响[J]. 水产学报,2017,41(5):766-774.
- [13] 徐亚飞,胡浩,周计丹,等. 凝结芽孢杆菌的生物学特性及其在水产养殖中的应用[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2017,30(1):52-55+74.
- [14] 于珺妃,夏邦华,郝其睿,等. 一株鲤源降血糖赖氨酸芽孢杆菌的筛选鉴定及其培养基优化. 大连海洋大学学报,2022,37(4):611-619.
- [15] 刘强强,陈旭,谢家俊,等. 饲料或养殖水体中添加地衣芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长性能和免疫力的影响[J]. 动物营养学报,2017,29(8):2808-2816.
- [16] 雷衍之. 养殖水环境化学(水产养殖专业用)[M]. 北京:中国农业出版社,2004.
- [17] 赵小军,祁禄. SPSS 数据分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [18] 李军亮,杨奇慧,谭北平,等. 低鱼粉饲料添加枯草芽孢杆菌对凡纳滨对虾幼虾生长性能、非特异性免疫力及抗病力的影响[J]. 动物营养学报,2019,31(5):2212-2221.
- [19] PRANTERA C, SCRIBANO M L, FALASCO G, et al. Ineffectiveness of probiotics in preventing recurrence after curative resection for Crohn's disease: a randomised controlled trial with *Lactobacillus GG* [J]. Gut, 2002, 51(3): 405-409.
- [20] SIRIRAT R, SOMBAT R, SOMKIAT P, et al. Immunity enhancement in black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) by a probiont bacterium (*Bacillus S11*) [J]. Aquaculture, 2000, 191(4): 271-288.
- [21] JADE R, JOÃO C F, LAURA DA, et al. *Bacillus subtilis* expressing double-strand RNAs (dsRNAs) induces RNA interference mechanism (RNAi) and increases survival of WSSV-challenged *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2021, 541: 736834.
- [22] A L V, MARÍA E, MACÍAS-RODRÍGUEZ A, et al. Beneficial effects of four *Bacillus* strains on the larval cultivation of *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2011, 321(1/2): 136-144.
- [23] THURLOW C M, WILLIAMS M A, CARRIAS A, et al. *Bacillus velezensis* AP193 exerts probiotic effects in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and reduces aquaculture pond eutrophication [J]. Aquaculture, 2019, 503: 347-356.
- [24] KEWCHAROEN W, SRISAPOOME P. Probiotic effects of *Bacillus* spp. from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) on water quality and shrimp growth, immune responses, and resistance to *Vibrio parahaemolyticus* (AHPND strains) - ScienceDirect [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 94: 175-189.
- [25] 赵德炳,丁雷. 几种净水剂净化水质效果比较[J]. 现代农业科学,2008(7):46-48.
- [26] 欧阳月,姜蕾. 聚合氯化铝在水产养殖中的应用[J]. 渔业致富指南,2021(16):37-39.
- [27] 郝桂玉,黄民生,徐亚同. SBR 中芽孢杆菌脱氮作用的研究[J]. 环境科学与技术,2004,27(5):3.
- [28] 廖栩峥,陈金荣,秦海鹏,等. 凡纳滨对虾室外生物絮团养殖池水体理化因子和细菌的变化[J]. 水产养殖,2020,41(1):22-27,33.
- [29] 李海洁,董小林,郭国军,等. 自养殖池塘中分离出的一株枯草芽孢杆菌对养殖水质的影响[J]. 水产学杂志,2021,34(4):73-78.
- [30] 白利丹,王海. 复合芽孢杆菌对养鱼池塘水质因子影响的试验研究[J]. 渔业现代化,2015,42(3):8-11.
- [31] 刘加慧,傅学丽,刘建勇. 2 种养殖模式下凡纳滨对虾池塘水质理化因子的变化特征[J]. 广东海洋大学学报,2017,37(4):113-117.
- [32] 王凯,杨华,王路英,等. 芽孢杆菌在水产养殖中的应用研究进展[J]. 当代水产,2021,46(2):74-77.

Effects of a *Lysinibacillus* strain on the growth and water quality of *Litopenaeus vannamei*

GUAN Liping¹, XIE Jingjing¹, LI Weihao¹, CHEN Haozhen¹, WEN Zhenzhong¹, SUN Chengbo^{1,2,3}

(1 College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China;

2 Southern Ocean Science and Engineering of Guangdong Laboratory (Zhanjiang),

Zhanjiang 524025, Guangdong, China;

3 Guangdong Provincial Key Laboratory of Pathogenic Biology and Epidemiology of Aquatic Economic Animals, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract: Taking *Litopenaeus vannamei* as the research object, the effects of a *Lysinibacillus* strain on the growth, survival, and aquaculture water quality of *L. vannamei* were investigated. One experimental group and one control group were set up, with three parallels in each group, 125 shrimps/barrels, initial body mass (5.18 ± 0.13) g, body length (9.40 ± 0.18) cm, water temperature (26 ± 2) °C, salinity 30, and experimental time 10 d. The experimental group was continuously added with *Lysinibacillus* at a concentration of 0.463×10^9 CFU/mL. The concentrations of NH_4^+-N in test group and control group were (0.05 ± 0.01) – (5.51 ± 0.09) mg/L and (0.05 ± 0.01) – (6.07 ± 0.22) mg/L. The variation ranges of NO_2^--N concentration were (0.07 ± 0.01) – (0.13 ± 0.01) mg/L and (0.07 ± 0.01) – (0.19 ± 0.01) mg/L. The variation ranges of NO_3^--N concentration were (0.07 ± 0.01) – (0.81 ± 0.07) mg/L and (0.07 ± 0.01) – (1.26 ± 0.07) mg/L. The range of pH was (7.10 ± 0.01) – (7.74 ± 0.01) and (7.03 ± 0.01) – (7.74 ± 0.01) respectively. *Lysinibacillus* had significant effects on the control of NH_4^+-N , NO_2^--N , and NO_3^--N in aquaculture water and pH regulation ($P < 0.01$). The final body mass was (7.01 ± 0.38) g, (6.78 ± 0.23) g, and the final body length was (9.67 ± 0.08) cm, (9.63 ± 0.04) cm. The experimental group was significantly improved compared with the control group, but there was no significant difference between the two groups ($P > 0.05$). The survival rate of the experimental group ($77.07\% \pm 1.22\%$) was significantly higher than that of the control group ($71.73\% \pm 2.81\%$) ($P < 0.05$). The results showed that *Lysinibacillus* was helpful to promote the growth, survival, and water quality control of *L. vannamei*.

Key words: *Lysinibacillus*; *Litopenaeus vannamei*; water purification; growth index

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.011

pH 急性胁迫对方斑东风螺行为及免疫酶活性的影响

丁瑞霞^{1,2,3,4}, 黄星美^{2,3,4}, 赵旺^{2,3}, 邓正华^{2,3,4}, 陈恒大³,
温为庚^{2,3,4}, 马振华^{2,3,4}, 王江勇⁵, 郑忠明⁶

(1 天津农学院水产学院, 天津 300384;

2 三亚热带水产研究院, 海南 三亚 572426;

3 海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室, 海南三亚, 572426;

4 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300;

5 惠州学院生命科学院, 广东 惠州 516007;

6 宁波大学海洋学院, 浙江 宁波 315822)

摘要:为揭示方斑东风螺(*Babylonia areolata*) 在低 pH 和高 pH 胁迫时的急性毒性和生理变化, 以 pH=8.0 为对照组, pH=5.0、6.0、7.0 和 9.0 为试验组, 测定方斑东风螺体内 4 种免疫酶: 谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和酸性磷酸酶(ACP)活性。结果显示: 不同时间 pH 胁迫对免疫酶活性有显著影响($P<0.05$), 而不同 pH 胁迫对免疫酶的活力没有显著影响($P>0.05$); 方斑东风螺经过 pH 急性胁迫后, 在低 pH 和高 pH 的水体养殖 6 h 后都出现了活力下降、爬壁缓慢, 而在 48 h 后开始出现死亡; 各试验组 GSH-PX 活性均呈现“抑制-诱导”的变化趋势; 随着时间的不断延长, 各 pH 处理组 CAT 活力均呈现“诱导-抑制-诱导”的变化趋势; POD 活性总体表现出了“诱导-抑制”的趋势; 低 pH 处理组(pH=5.0、6.0) ACP 活性表现出“诱导-抑制”的趋势。该研究对于方斑东风螺的养殖具有参考意义, 同时丰富贝类免疫系统方面的基础资料。

关键词:方斑东风螺(*Babylonia areolata*); 免疫酶; 行为; pH 急性胁迫

中图分类号:S967.6

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0084-007

方斑东风螺(*Babylonia areolata*)俗称香螺、花螺, 属于腹足纲, 蛾螺科, 主要生长在中国东南亚和日本沿海, 是热带和亚热带的海洋物种, 也是中国东南沿海主要的养殖产品和经济贝类^[1]。其营养丰富、肉质鲜美, 是一种传统海味, 深受人们的喜爱, 市场容量较大。近年来, 随着苗种繁育及养殖技术的突破与升级, 方斑东风螺工业化养殖在中国东南沿海地区发展迅速^[2]。

水环境在水生生物的生长繁殖中起着重要作用, 而不适宜的环境则会抑制水生生物的发育、生长和繁殖。pH 是水产养殖水环境的重要指标, 过高、过低都会直接影响水产养殖生物的生长、摄食

和代谢^[3-4]。在贝类工业化的养殖过程中, 大量的贝类死亡、藻类的过度喂养甚至海水的红潮都会降低水体的 pH, 而且在养殖过程中, 为了净化水质, 栽植大量的水生植物, 由于光合作用, 水中的二氧化碳(CO_2)被大量消耗, 导致水体 pH 增加^[5], pH 的变化会对水生生物造成慢性或急性的应激, 影响其活动及免疫功能^[6-10]。方斑东风螺在中国南方沿海的养殖方式主要以露天陆地水泥池的流水养殖为主, 水产养殖池 pH 的变化会对其生理和生长过程产生不同影响。酸性和碱性环境会降低幼贝的附着力, 两壳紧密闭合、触手不伸出^[11]。

收稿日期:2022-04-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD0900201); 三亚市院地科技合作项目(2018YD19, 2019YD21); 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-49); 农业农村部财政专项(NHYYSWZZZYKZX2020); 农业行业标准制定和修订项目(20191818); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2022YJ10; 2020TD55); 国家(省)重点科技项目三亚市配套资金(2019PT61); 揭阳市科技计划重点项目(SKJCX020)

作者简介:丁瑞霞(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 海水贝类生理与生化。E-mail: 582750695@qq.com

通信作者:马振华(1981—), 男, 研究员, 从事海水鱼类繁育与发育研究。E-mail: zhenhua.ma@hotmail.com

本研究通过 pH 胁迫试验确定了方斑东风螺免疫活性的变化,更好地了解方斑东风螺的免疫反应,为深入研究方斑东风螺提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

中国水产科学研究院南海水产研究所热带水产研究开发中心(海南省陵水县)提供了试验用的方斑东风螺,并且在该实验基地进行试验。试验用的方斑东风螺的体长为 (2.80 ± 0.32) cm,平均质量为 (2.50 ± 0.13) g,先暂养 2 d 再进行试验。养殖过程的水质参数为:盐度 33.00 ± 0.80 ,温度 (26.00 ± 1.00) °C, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度小于 0.01 mg/L,亚硝酸盐质量浓度小于 0.04 mg/L,溶氧(DO)质量浓度大于 6.50 mg/L。试验海水经沉淀、沙滤。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

据试验要求放入健康、大小均匀且活力强的方斑东风螺,观察活动和生存情况,试验过程中观察 24 h 内百分百死亡 pH (LC100/24 h) 和 96 h 内百分百无死亡 pH (LC100/96 h),据试验结果确定试验液 pH 的上、下限,然后用等间距方法分别设置了 5.0~9.0 等 5 个 pH 浓度梯度,利用氢氧化钠(NaOH)或者氯化氢(HCl)来调节至相应 pH,使用 pH 分析仪测定相应的 pH,并将已经配置好的海水储存在单独的水箱中。以自然海水 pH=8.0 为基础,用 pH 分析仪对水体的 pH 每天早晚各矫正一次,控制 pH 日变化幅度不超 ± 0.2 。每组处理均为 3 个平衡,并将 30 只健康活跃的螺放在每个实验容器(40 L)中。试验用螺质量相近,来降低试验差异性,整个试验过程中螺不会重复使用,并在试验期间停止投喂。

试验开始后,从 6、12、24、48、72 和 96 h 内随机选择每组 3 只方斑东风螺,检测每种免疫酶的

活性。在这种情况下,每 6 h 从每个容器中取出水样,测量 pH 并及时调整到预定值。在试验中,对各试验组方斑东风螺的活动状况和死亡率进行持续观察和记录,评估死亡的标准是,螺肉向外翻,吻管向外突出,发白僵硬。

1.2.2 样品的处理

用 0.2 mol/L 的生理盐水以 1:2 的质量体积比研磨整个组织,将研磨液置于 5 000 r/min、4 °C 下离心 10 min,并将上清液置于洁净的 EP (eppendorf)管中,-80 °C 冰箱内保存、备用,POD、CAT、ACP 和 GSH-PX 活性的测定分别采用相关试剂盒(南京建成生物工程研究所)。

1.2.3 试验数据的处理分析

获得的数据以平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示,并使用 SPSS 21.0 对试验结果进行统计学分析。先对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),若处理间有显著性差异,再用 Duncan 法对均值进行比较,显著性水平为 $P < 0.05$,极显著性水平为 $P < 0.01$ 。

2 结果

2.1 pH 胁迫对方斑东风螺的行为及存活率的影响

在 pH 试验组中,随着 pH 的改变,方斑东风螺出现不同程度的应激反应。pH 胁迫后,方斑东风螺主要表现为对外部刺激反应迟钝,运动缓慢,爬壁运动减少,沉到桶底,无法正立,身体硬死。方斑东风螺的死亡状态为发白僵硬,螺肉外翻,吻管向外伸出。pH=5.0 的试验组在 6 h 时出现了行动缓慢、翻背,在 72 h 开始死亡,死亡率为 13%。pH=9.0 试验组在 12 h 出现翻背,其翻背率为 50%至 27 h 出现死亡。其他 pH 试验组的方斑东风螺生活状况良好,存活率 100%,仅有个别螺出现翻背的现象(见表 1)。随着时间的推移,对照组的方斑东风螺也从最初的行动活跃到最后的行动缓慢、翻背。

表 1 pH 胁迫下方斑东风螺的行为和存活率影响
Tab. 1 Effects of pH stress on the behavior and survival of *Babylonia areolata*

pH	死亡率/%						行为					
	6h	12h	24h	48h	72h	96h	6h	12h	24h	48h	72h	96h
5.0	0	0	0	0	13 \pm 0.6	16 \pm 1.1	翻背	翻背	翻背	迟缓	死亡	死亡
6.0	0	0	0	0	0	0	正常	正常	翻背	翻背	翻背	迟缓
7.0	0	0	0	0	0	0	正常	正常	正常	正常	翻背	迟缓
8.0	0	0	0	0	0	0	正常	正常	正常	正常	正常	翻背
9.0	0	0	0	0	13 \pm 0.9	23 \pm 2.7	正常	翻背	翻背	迟缓	死亡	死亡

注:翻背表示方斑东风螺腹面朝上,螺壳朝下的不健康状态

2.2 pH 胁迫对方斑东风螺 GSH-PX 活性的影响

pH 胁迫对方斑东风螺 GSH-PX 活性的影响如图 1a 所示。可以看出,不同 pH 的处理时间对方斑东风螺 GSH-PX 活力影响显著($P<0.05$),不同 pH 下 GSH-PX 活性短时间内无显著性差异($P>0.05$)。在 pH=5.0 时,GSH-PX 的活性先升高后又降低,并在 48 h 活性达到 7.48 U/mgprot 的峰值。同样的 pH=8.0 时,GSH-PX 活性在 6 h 也达到了最大值 9.44 U/mgprot。然而,GSH-PX 活性在其他各试验组中随着时间的推移, GSH-PX 显示出“诱导-抑制”的趋势。

2.3 pH 胁迫对方斑东风螺 CAT 活性的影响

pH 胁迫对方斑东风螺 CAT 活性的影响如图 1b 所示。可以看出,不同 pH 的处理时间对方斑东风螺 CAT 活力影响显著($P<0.05$),不同 pH 下 CAT 活性短时间内无显著性差异($P>0.05$)。在 pH=9.0 时,CAT 活性变化显著,在 12 h 试验组活性出现峰值,达到 58.26 U/mgprot,随着时间的推移,活性逐渐降低;在 pH=7.0 时,试验组在 6 h 活性达到最低值 15.23 U/mgprot。总体来看,随着时间的不断延长,各 pH 处理组 CAT 活性显示出“诱导-抑制-诱导”的变化趋势。

2.4 pH 胁迫对方斑东风螺 POD 活性的影响

pH 胁迫对方斑东风螺 POD 活性的影响如图

1c 所示。可以看出,不同 pH 的处理时间对方斑东风螺 POD 活力影响显著($P<0.05$),不同 pH 下 POD 的活性短时间内无显著性差异($P>0.05$)。当 pH=7.0、8.0 时,POD 活力呈现先降低后升高最后降低的趋势,其他实验组 POD 活力均呈现为先升高后降低的趋势。当 pH=9.0 时,POD 活力变化显著,在 24 h 活力出现峰值,达到 15.19 U/mgprot,当 pH=5.0 时,试验组 POD 活力在 96 h 达到最低值,活力为 5.03 U/mgprot。虽然各试验组 POD 活力的变化规律不同,总体看来,POD 活性显示出“诱导-抑制”的变化趋势。

2.5 pH 胁迫对方斑东风螺 ACP 活性的影响

pH 胁迫对方斑东风螺 ACP 活性水平的主要影响如图 1d 所示。可以看出,不同 pH 的处理时间对方斑东风螺 ACP 活力影响显著($P<0.05$),当 pH=5.0、8.0、9.0 时,ACP 的活性显著上升,并可在 12 h 达到最高,但随着时间的推移,ACP 的活性逐渐出现抑制。pH=7.0 时,ACP 活性由 6 h 的最高值 173.09 U/mgprot 逐渐降低,后虽然随着时间的变化有所提高,但总体 ACP 活性仍然是受到抑制。pH=6.0 时,ACP 活性受到轻微抑制后随时间显著升高,在 24 h 后又呈现抑制的现象。因此,低 pH 处理组(pH=5.0、6.0) ACP 活性显示出“诱导-抑制”的变化趋势。

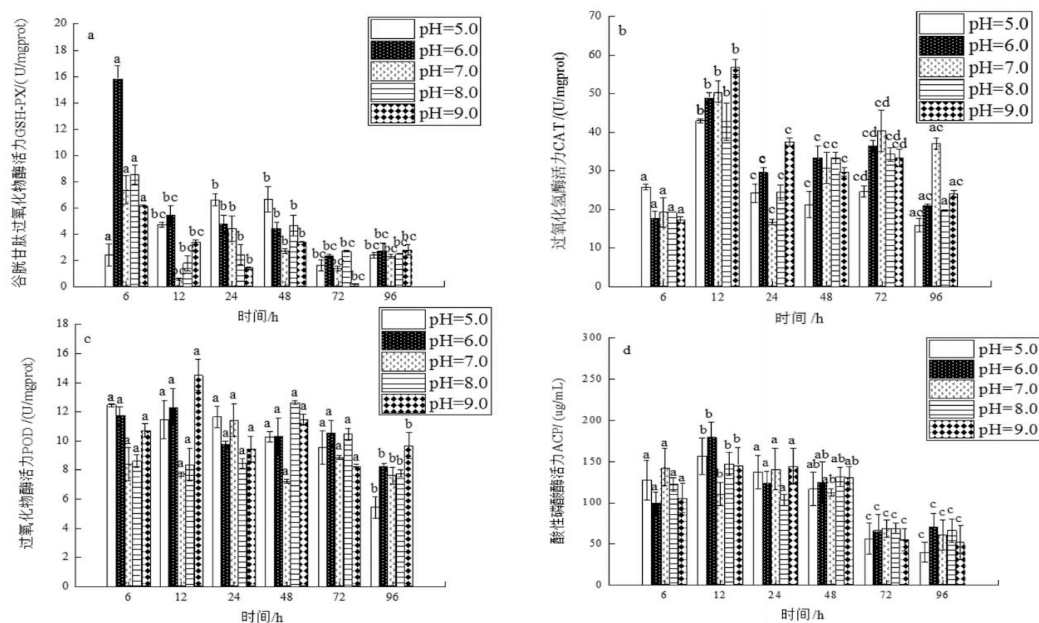


图1 pH 胁迫对方斑东风螺免疫酶活性水平的主要影响

Fig. 1 pH stress is the main effect of immunoenzyme activity levels on the *Babylonia areolata*

3 讨论

3.1 pH 对方斑东风螺行为和存活率的影响

在适宜的环境条件下,水生生物体内的代谢会加强,有利于其生长发育。反之,会对水生生物产生代谢压力进而影响其生长^[12-13]。pH 作为一个重要的环境因子,其变化可能会导致水生生物的免疫能力受损甚至死亡^[14]。本试验中,在 pH 为 5.0、9.0 处理 72 h 时的平均死亡率超过 10%,在 96 h 的死亡率达到 20%。试验发现,方斑东风螺的最适 pH 为 8.0,其最高和最低的临界 pH 分别为 9.0 和 5.0,超出这个临界范围,方斑东风螺的存活率会大大降低。这和刘洋等^[15]的研究结果相似,不同 pH 对海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) 胚胎发育的影响,随着 pH 的降低,存活率逐渐下降。水体 pH 会直接地影响水生生物代谢功能,造成其免疫系统受损、酸碱平衡紊乱、导致个体的死亡。覃玉莲等^[16]研究低 pH 对小龙虾 (*Procambarus clarkia*) 免疫功能影响时发现,在低 pH 水环境条件下,时间越长,死亡率也就越高,这是因为小龙虾长期的处于酸性条件下,破坏了小龙虾的免疫系统从而影响小龙虾自身的修复功能,使其无法有效抵御疾病。本研究中,随着时间的延长,方斑东风螺在过高、过低 pH 下,死亡率都逐渐上升,这可能因为 pH 破坏了方斑东风螺的免疫系统,使其失去抵御外来病原体入侵的能力而死亡。

有研究表明,水生生物可以通过体内缓冲系统调节渗透压,使体内 pH 接近中性,维持机体酸碱平衡,使其能适应一定范围内外界 pH 的变化,但是,如果超过缓冲限值,机体的 pH 会发生显著变化,破坏体液的酸碱平衡,影响机体正常生理活动^[17-18]。本研究结果表明,方斑东风螺对于 pH 有着一定程度的耐受性,因此在短时间内, pH 过高或者过低,方斑东风螺仅仅表现出翻背,运动迟缓,并没有立即死亡,并且这与李健等^[19]研究结果相似, pH 胁迫对中国对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 死亡率有一定的影响,高和低 pH 胁迫都会使 3 种对虾的存活率随时间的延长而逐渐降低。梁从飞等^[20]研究表明, pH 升高会导致罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) 血清渗透压发生显著变化,从而破坏鱼类体内的酸碱平衡,对罗非鱼

造成危害。本研究中方斑东风螺在高、低 pH 条件下均会出现翻背,这是因为在 pH 突变环境中方斑东风螺采取主动调节措施,维持体内离子和酸碱平衡,这既是机体的被动病理表现,也是主动的保护反应^[21],这跟荣小军等^[22]研究的不适 pH 下海参 (*Holothuria*) 会出现身体蜷曲、棘刺收缩,粪便变细变短相类似。

3.2 pH 对方斑东风螺个体免疫酶活性的影响

CAT 和 POD 是动物体内重要的抗氧化酶, GSH-PX 可以将过氧化氢 (H_2O_2) 分解成氢气 (H_2) 和氧气 (O_2), 来有效阻止体内膜脂质细胞的过氧化,进而有效减缓膜细胞因氧化和应激而引起细胞的破坏。正常的状态条件下, CAT 和 POD 可以与 GSH-PX 联合作用清除动物基体内存在的过氧反应性自由基,使得动物基细胞体内的自由基化合物的氧化形成过程和氧化消除过程达到一个动态的平衡,从而可以保证使其自身免遭有害自由基化合物的破坏^[23-25]。研究发现, CAT 和 POD 的活性越强,抗逆性也就越强,其消除自由基能力也越强。而当动物的生存环境发生变化,受到胁迫时,这两种酶的活性就会发生应激变化以适应新的环境^[26-27]。该研究中,方斑东风螺受到 pH 胁迫 CAT 和 POD 的酶活性在短时间内显著上升,随着时间的延长这两种酶的活性又逐渐降低。这可能是因为方斑东风螺体内的 CAT 和 POD 产生适应环境的诱导反应,因此提高了这两种酶的活性,使其达到新的动态平衡。然而,随着时间不断延长,由于方斑东风螺初始产生的活性氧超过了其抗氧化系统的捕获能力,抗氧化系统无法及时捕捉自由基,从而导致氧化损伤,使得 CAT 和 POD 活性均降低或者丧失。GSH-PX 具备单独去除过氧化物的能力,随时间延长, GSH-PX 逐渐适应新的 pH 环境,当生物受到胁迫,体内脂质过氧化时, GSH-PX 活性就会升高进而去清除体内的过氧化物。田立立^[5]在研究 pH 胁迫克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 时也发现, GSH-PX 活性受到 pH 胁迫在短时间内迅速下降,而后又随着适应新环境而升高。这也与刘鹏飞等^[28]研究凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) CAT 和 POD 基因表达的机理相似。

ACP 是参与动物免疫防御功能的主要水解酶,它也是吞噬细胞的主要成分^[29],主要来源于粒细胞颗粒,在细胞吞噬作用、钙磷代谢、体内蛋白质合成和磷酸基团转移等过程起重要作用^[30],它的活力变化是判断水产动物免疫力的重要指标^[31-34],因此在动物免疫学中 ACP 作为关键的免疫指标,长期以来一直被广泛研究。Suresh 等^[35]研究了铜离子(Cu^{2+})胁迫下贝类血细胞 ACP 活性变化,发现在低或者高 pH 胁迫下,ACP 活性明显升高。本研究中,较低和较高 pH 条件下,方斑东风螺的 ACP 酶活性的变化也趋于相同,均是呈先缓慢上升后逐渐下降的态势,这是由于方斑东风螺处于 pH 变化的环境中,为维持自身体内酸碱平衡而采取的主动调节措施,也是一种被动的病理表现。当环境因子存在胁迫时,方斑东风螺的免疫功能将出现暂时的增强。也就是说,ACP 活力提高是机体在病理条件下急性激活反应中免疫功能的体现,提高活性有助于保护机体并减少氧化损伤。这跟樊甄娇等^[36]研究结果一致,pH 对栉孔扇贝(*Azumapecten farreri*) ACP 活性都有明显的影响,随着 pH 急剧变化,ACP 活性明显升高。当贝类受到损伤时,为防止外来病原生物入侵,激活溶酶体中以 ACP 为主的一系列水解酶,使这些酶活力大大提高^[37-38]。由此看来,除了作为自身防御的反应外,ACP 活力升高也被认为是一种被动病理表现。

4 结论

研究表明,pH 对方斑东风螺免疫酶活性有显著影响,高 pH 和低 pH 水体养殖一段时间之后,都会表现出不能保持正立、腹面朝上、运动缓慢等状态,甚至还会导致方斑东风螺死亡。当受到重度 pH 胁迫时,方斑东风螺的 GSH-PX、CAT、POD、ACP 活性被抑制;当受到轻度 pH 胁迫时,免疫酶活性则被诱导。试验结果显示,在 pH 改变时,这些免疫酶活性变化得较特异,与方斑东风螺所处的发育阶段不同、抗逆能力较强、免疫能力强等生物习性有关。pH 处理组中方斑东风螺免疫酶活力变化规律,很好地指引了养殖水体 pH 调控范围。未来对东风螺的进一步研究将考虑方

斑东风螺对不同环境胁迫反应的种内变异性,以及种间差异性。□

参考文献

- [1] 翁文明,蔡岩,卢明辉等. 方斑东风螺工厂化半循环水养殖试验[J]. 科学养鱼,2021,39(3):64-65.
- [2] 谭春明,赵旺,吴开畅,等. 盐度胁迫对方斑东风螺免疫酶活性的影响[J]. 水产科学,2020,39(5):677-684.
- [3] DIONÍSIO R D, DANIEL F. ARENASET, et al. Effects of pH on salicylic acid toxicity in terms of biomarkers determined in the marine gastropod *Gibbula umbilicalis* [J]. Marine Environmental Research, 2020, 158: 1-10.
- [4] 姜人源,朱顺妮,王忠铭,等. 不同 pH 条件下小球藻氮处理及生物质生产能力[J]. 环境工程,2021,39(9):42-47.
- [5] 田立立,万金娟,孟祥龙,等. 高 pH 急性慢性胁迫对克氏原螯虾非特异性免疫和抗氧化能力的影响[J]. 淡水渔业,2021,51(4):101-107.
- [6] 蔡娟. pH 对青蛤胚胎发育、幼虫生长及相关酶活性的影响[D]. 上海:上海海洋大学 2016.
- [7] 彭建华,陈文祥,栾建国,等. 温度、pH 对二种淡水贝类滤水率的影响[J]. 动物学杂志,2004,39(6):2-6.
- [8] 王婷,郑佳慧,胡梦红,等. 海洋酸化对贝类的生理生态学影响研究进展[J]. 海洋科学,2022,46(1):192-202.
- [9] 郑惠娜,张晶晶,章超桦等. pH 调节法提取 4 种贝类蛋白及其氨基酸、蛋白组成分析[C]. 中国食品科学技术学会第十一届年会论文摘要集,杭州:中国食品科学技术学会,2014:359-360.
- [10] SINGH S K, TIWARI V K, CHADHAET NK, et al. Effect of dietary synbiotic supplementation on growth, immune and physiological status of *Labeo rohita* juveniles exposed to low pH stress[J]. Fish and Shellfish Immunology, 2019, 91:358-368.
- [11] 谭春明,赵旺,吴开畅,等. 氨氮胁迫对方斑东风螺六种免疫酶活性的影响[J]. 海洋科学,2019,43(4):8-15.
- [12] 朱坚真,杨锐. 我国南海海水养殖环境的集成管理研究[J]. 河北渔业,2016,266(2):47-52,68.
- [13] 巫旗生,祁剑飞,宁岳,等. 盐度、pH、氨氮对钝缙锦蛤稚贝生长及存活的影响[J]. 渔业研究,2021,43(6):621-627.
- [14] CHANGL E Q, XIAODAN W, FENGLUETH, et al. Dietary arginine alleviates the oxidative stress, inflammation and immunosuppression of juvenile Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* under high pH stress[J]. Aquaculture Reports, 2021, 19:2352-5134.
- [15] 刘洋,于瑞海,张哲,等. 不同 pH 对海湾扇贝胚胎发育及幼虫生长发育的影响[J]. 渔业科学进展,2020,41(6):108-114.
- [16] 覃玉莲,韩庆,黄强,等. 低 pH 值胁迫对小龙虾免疫功能及死亡率的影响[J]. 现代农业科技,2020(23):198-200,205.
- [17] 韩莎,赵斌,李成林,等. pH 急性胁迫对刺参非特异性免疫酶活性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2020,49

- (5):666-670.
- [18] 赵旺,谭春明,张玥,等. 盐度胁迫对方斑东风螺行为活动及消化酶活性的影响[J]. 渔业现代化,2019,46(5):41-45.
- [19] 赵先银,李健,陈萍,等. pH 胁迫对3种对虾存活率、离子转运酶和免疫酶活力的影响[J]. 上海海洋大学学报,2011,20(5):720-728.
- [20] 梁从飞,赵金良,甘远迪,等. 盐碱胁迫对尼罗罗非鱼鳃 $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ 共转运子、碳酸酐酶基因表达的影响[J]. 中国水产科学,2016,23(2):274-283.
- [21] 赵旺,杨蕊,吴开畅,等. “翻背症”对方斑东风螺主要消化酶及免疫相关酶的影响[J]. 水产学报,2020,44(9):1502-1512.
- [22] 荣小军,李彬,廖梅杰,等. 刺参“参优1号”苗种在不同 pH 条件下的代谢特征和适应性研究[J]. 渔业科学进展,2021,42(3):116-124.
- [23] 文春根,张丽红,胡宝庆,等. pH 对背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*) 5种免疫因子的影响[J]. 南昌大学学报(理科版),2009,33(2):172-176.
- [24] 陈丹群. 合浦珠母贝家系选育及免疫酶和消化酶活性研究[J]. 武汉:华中农业大学,2009.
- [25] 哈承旭,刘萍,何玉英,等. 高 pH 胁迫对“黄海1号”中国对虾免疫相关酶的影响[J]. 中国水产科学,2009,16(2):303-306.
- [26] 金建丽,李伟航,陆灏,等. 拟赤梢鱼消化酶和免疫酶的分布与活性[J]. 贵州农业科学,2019,47(7):75-79.
- [27] 姜燕,徐永江,于超勇,等. 大黄鱼消化道菌群结构、消化酶和非特异性免疫酶活力分析[J]. 渔业科学进展,2020,41(5):61-72.
- [28] 刘鹏飞,刘庆慧,吴垠,等. 白斑综合征病毒感染凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) TRx 、 LvP38 、 CAT 、 POD 基因的表达[J]. 渔业科学进展,2015,36(4):89-93.
- [29] ZHU Z H, YANG Q H, TAN BP, et al. Effects of replacing fishmeal with soybean protein concentrate (SPC) on growth, blood biochemical indexes, non-specific immune enzyme activity, and nutrient apparent digestibility for juvenile *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture International, 2021. 29(6):1-20.
- [30] 宋红利,董晓慧,谭北平,等. 蛋白酶和有机酸盐对凡纳滨对虾生长性能、免疫酶和消化酶的影响[J]. 广东饲料,2016,25(4):29-34.
- [31] KONG X D, YUAN S, LI L, et al. Engineering of an epoxide hydrolase for efficient bioresolution of bulky pharmino substrates [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(44):17-22.
- [32] 牟海津,江晓路,刘树青,等. 免疫多糖对栉孔扇贝酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版),1999(3):124-129.
- [33] 孙虎山,李光友. 硒化卡拉胶和酵母葡聚糖对栉孔扇贝血淋巴中两种水解酶活力的影响[J]. 海洋与湖沼,2002(3):245-249.
- [34] 魏炜,张洪渊,石安静. 育珠蚌酸性磷酸酶活力与免疫反应关系的研究[J]. 水生生物学报,2001,25(4):413-415.
- [35] SURESH P G, REJU M K, MOHANDAS A. et al. Haemolymph phosphatase activity levels in two fresh-water gastropods exposed to copper [J]. Science of The Total Environment, 1993, 134:1265-1277.
- [36] 樊甄姣,杨爱国,刘志鸿,等. pH 对栉孔扇贝体内几种免疫因子的影响[J]. 中国水产科学,2006,13(4):650-654.
- [37] 董小敬,赵孟杰,张志豪,等. 盐度对大口黑鲈生长、肌肉营养成分及肝脏免疫酶活性的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2021,42(6):106-110.
- [38] 江天琪,张扬,姜亚洲,等. 高温胁迫厚壳贻贝摄食、代谢和相关酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(9):3048-3056.

Effects of pH acute stress on the behavior and immune enzyme activity of *Babylonia Areolata*

DING Ruixia^{1,2,3,4}, HUANG Xingmei^{2,3,4}, ZHAO Wang^{2,3}, DENG Zhenghua^{2,3,4}, CHEN Hengda³,
WEN Weigeng^{2,3,4}, MA Zhenhua^{2,3,4}, WANG Jiangyong⁵, ZHENG Zhongming⁵

(1 Tianjin Agricultural College, College of Fisheries, Tianjin 300384, China;

2 Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572426, Hainan, China;

3 Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of
Hainan Province, Sanya 572426, Haian, China;

4 Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization by the Ministry of
Agriculture and Rural Affairs, South China Sea Fisheries Research Institute,
Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, Guangdong, China;

5 Huizhou College, College of Life Sciences, Huizhou 516007, Guangdong, China;

6 College of Oceanography, Ningbo University, Ningbo 315832, Zhejiang, China)

Abstract: To reveal the acute toxicity and physiological changes of *Babylonia areolata* in response to low pH and high pH stress, the pH = 8.0 control group and pH = 5.0, 6.0, 7.0, and 9.0 were used as the experimental group to investigate the activities of four immune enzymes glutathione peroxidase (GSH-PX), catalase (CAT), peroxidase (POD) and acid phosphatase (ACP) in the body of the *Babylonia areolata*. The results of the experiment show that pH stress has a significant effect on immune enzyme activity at different times ($P < 0.05$), while different pH stresses have no significant effect on immune enzyme activity ($P > 0.05$). After pH acute stress, 1) after 6h of low pH and high pH water culture, there is a decrease in vitality and slow climbing, and death begins to appear after 48h; 2) The activity of GSH-PX in each experimental group shows a trend of "inhibition-induction"; 3) with the continuous extension of time, the CAT activity of each pH treatment group shows a trend of "induction-inhibition-induction"; 4) the POD activity generally show a trend of "induction-inhibition"; 5) the ACP activity of the low pH treatment group (pH = 5.0, 6.0) show a trend of "induction-inhibition". This study has practical significance for the cultivation of *Babylonia areolata*, and also enriches the basic data on the immune performance of other shellfish.

Key words: babylonia areolata; immune enzymes; behavior; pH acute stress

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.012

池塘多营养级养殖水体的初级生产力及影响因子分析

赵宇曦^{1,2,3}, 刘兴国^{1,2}, 周润锋^{1,2,3}, 肖述文^{1,2,3}, 孙照云^{1,2,4}

(1 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海, 200092;

2 农业农村部水产养殖设施工程重点实验室, 上海, 200092;

3 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

4 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡, 214128)

摘要:为了解池塘多营养级养殖水体初级生产力的变化规律及关键影响因子,本研究构建了黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)多营养级养殖系统,于2020年9~11月和2021年3~8月,分别采用黑白瓶法、显微镜计数法、国标检测法,对养殖系统内养殖区、净水区两区的水体初级生产力、浮游植物生物量、水体理化指标进行了逐月调查。结果显示:养殖区、净水区初级生产力分别为 $1.90 \pm 0.77 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ 、 $3.05 \pm 1.43 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,浮游植物生物量分别为 $0.45 \pm 0.29 \text{ mg/L}$ 、 $0.81 \pm 0.53 \text{ mg/L}$,差异显著($P < 0.001$, $P = 0.002$),且季节波动明显,均在9~11月、3~4月降低,5~7月升高。养殖区、净水区浮游植物生物量主要受水温、光照、磷酸盐影响。养殖区水体初级生产力主要受水温、氨氮、溶氧影响;净水区初级生产力主要受水温、硝酸盐氮、浮游植物生物量影响。本研究旨在阐明黄颡鱼多营养级养殖池塘的基本生态特征,为黄颡鱼高效养殖提供理论参考。

关键词:黄颡鱼;多营养级养殖;初级生产力;浮游植物;水体理化因子

中图分类号:S964.7

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)00-0091-009

多营养层级养殖是通过合理搭配不同营养级养殖品种,提高池塘物质利用效率,降低养殖水体污染的生态养殖系统,是有效保证水产养殖业健康发展、提升经济价值的途径之一^[1]。Shpigel等^[2]构建的海胆(*Paracentrotus lividus*)-鲷(*Sparus aurata*)-石莼(*Ulva lactuca*)养殖模式、Gouranga等^[3]构建的微咸水多营养级养殖模式、熊莹槐^[4]构建的主养草鱼(*Cetnopharyngodon idellus*)多营养层级养殖模式都表明,多营养层级养殖模式有助于养殖品质、水体净化效率的提升。

养殖水体中,浮游植物初级生产力(Primary production, PP)是物质循环、能量流动的综合表征,反映了水体生产的潜力。它受养殖水质条件、营养状况等多种因素影响,对水体次级生产力及生化过程产生重要影响^[5-8]。目前针对养殖池塘初级生产力的研究较多,姜森颖等^[9]发现刺参(*Apostichopus japonicus* Selenka)池塘初级生产力

存在明显季节变化,水温、氨氮、亚硝酸盐氮对初级生产力影响明显;张磊等^[10]发现菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)养殖池中初级生产力夏秋季高于冬季,叶绿素a(Chl-a)浓度和溶氧、氨氮显著相关。然而,关于黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)多营养级养殖池塘水体初级生产力的研究未见报道。

黄颡鱼是中国重要的淡水养殖种类,具有较高的经济效益^[11],针对黄颡鱼养殖业存在的成鱼养殖不规范、污染严重等问题^[12],多营养级养殖系统借助其分级、集污、排污、净化等功能可有效解决^[13]。

本研究从基础生态学的角度出发,对黄颡鱼多营养级养殖系统中各级水体的初级生产力及影响因素进行研究,旨在进一步了解养殖系统内的水体环境,为黄颡鱼生态高效养殖提供参考。

收稿日期:2021-07-10

基金项目:财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-46);国家重点研发计划项目(2019YFD0900300)

作者简介:赵宇曦(1997—),男,硕士研究生,研究方向:水产养殖学与渔业生态学。E-mail:GeassC@126.com

通信作者:刘兴国(1965—),男,博士,研究员,研究方向:水生生物学与渔业生态工程。E-mail:liuxingguo@fmiri.ac.cn

瓶溶氧(mg/L); O_b 为黑瓶溶氧(mg/L); R 为水层呼吸耗氧量($\text{mg/L} \cdot \text{d}$); O_i 为原瓶溶氧(mg/L)。

随后,采用算术平均值累积法,计算水柱总初级生产力以及水柱总耗氧量,作为水体总初级生产力(Primary production, PP)及水体总耗氧量(Respiratory consumption, RC),公式如下^[18]:

$$P_p = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \times (D_{i+1} - D_i) \quad (3)$$

$$R_c = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_i + R_{i+1}}{2} \times (D_{i+1} - D_i) \quad (4)$$

式中: P_p 为水柱总初级生产力($\text{mg/L} \cdot \text{d}$); P_i 为*i*层的水层初级生产力($\text{mg/L} \cdot \text{d}$); D_i 为*i*层的水层深度(m); R_c 为水柱总耗氧量($\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$); R_i 为*i*层的水层耗氧量($\text{mg/L} \cdot \text{d}$)。

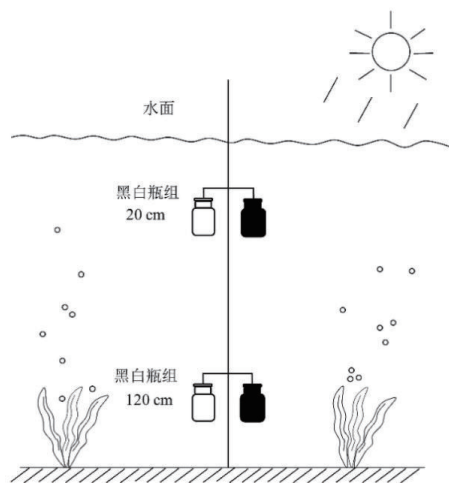


图2 黑白瓶试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of black and white bottle experiment

1.3 水体理化因子的测定

水体理化因子每月测量一次,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ池取样点设置在池中央处,Ⅳ池取样点设置在距进水口40 cm处。于采样点现场测定水温(T)及水体有效辐射(Effective Radiation, ER);根据《水和废水监测分析方法》^[19],使用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测量总氮(TN)质量浓度,纳氏试剂光度法测量氨氮(NH_4^+-N)质量浓度,N-(1-萘基)-乙二胺光度法测量亚硝酸盐氮(NO_2^--N)质量浓度,氨基磺酸紫外分光光度法测量硝酸盐氮(NO_3^--N)质量浓度,钼锑抗分光光度法测量总磷(TP)和磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)质量浓度,Winkler法测定溶氧(DO)。

1.4 浮游植物生物量的测定及计算

于黑白瓶试验采样点($n=7$)使用有机玻璃取水器于水深20 cm处取水1 000 mL,用鲁哥试剂室温($25\sim 28^\circ\text{C}$)固定沉淀24 h后,虹吸浓缩至15~25 mL,摇匀后吸取0.1 mL,滴于浮游植物计数框内,在显微镜下按视野法计数。计数时,若浮游植物数量特别少则全片计数,每个样品计数两次,两次计数的差值应小于15%,否则增加计数次数,最后数量取各次计数值的平均值。选择10~40个浮游植物个体测定体积,计算平均体积,用估算法测定浮游植物生物量(Phytoplankton biomass, PB)^[20],水体中浮游植物生物量计算公式如下:

$$p_b = \frac{S}{S_c} \times \frac{V}{V_c} \times n \times V_p \times 10^{-9} \quad (5)$$

式中: P_b 为1 L水样中浮游植物生物量(mg/L); S 为计数框的面积(cm^2); S_c 为计数视野面积(mm^2); V 为浓缩后水体体积(mL); V_c 为计数框容积(mL); n 为计数个数(ind); V_p 为浮游植物平均体积(μm^3)。

1.5 数据统计及分析

使用IBM SPSS Statistics 26软件对初级生产力、浮游植物生物量及水体理化因子之间进行双变量相关性分析(Bivariate Correlation)以及多元逐步回归分析(Multiple stepwise regression),对净水区 and 养殖区的初级生产力、浮游植物生物量、水体理化因子进行单因素方差分析(One Way ANOVA),以 $P<0.05$ 作为差异显著水平,以 $P<0.01$ 作为差异极显著水平。

2 结果

2.1 浮游植物生物量

试验期间,全池浮游植物生物量(PB)均值为 $0.65\pm 0.47 \text{ mg/L}$,范围为 $0.02\sim 2.37 \text{ mg/L}$ 。净水区(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ池)PB均值为 $0.81\pm 0.53 \text{ mg/L}$,养殖区(Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ池)PB均值为 $0.45\pm 0.29 \text{ mg/L}$,净水区PB极显著高于养殖区($P=0.002$) (表1)。如图3所示,各功能池PB于9~11月、3~4月降低,5~8月上升,至2021年8月达到峰值,其中9~11月、6~8月净水区、养殖区PB差异较大。结果表明各功能池PB变化趋势相同,季节波动明显。

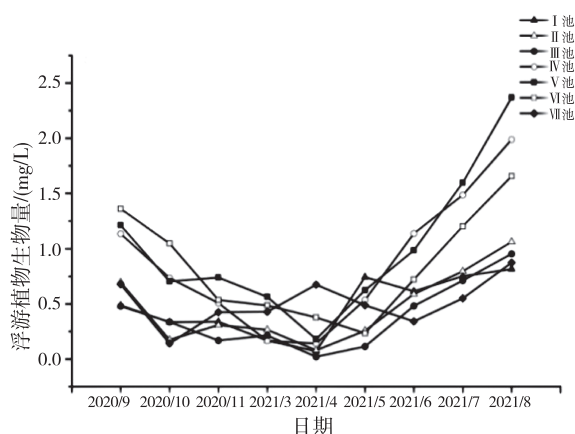
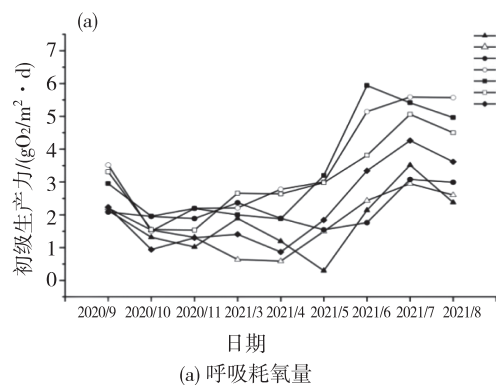
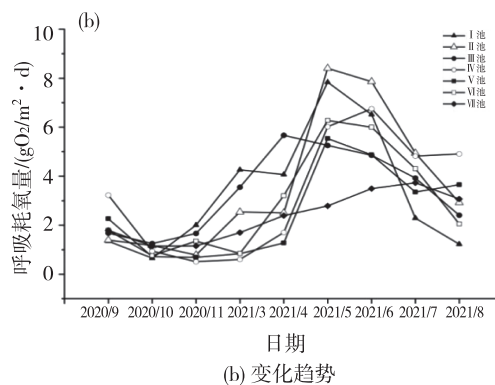


图3 浮游植物生物量变化趋势

Fig. 3 Change trend of phytoplankton biomass



(a) 呼吸耗氧量



(b) 变化趋势

图4 初级生产力(a)、呼吸耗氧量(b)变化趋势

Fig. 4 Change trends of primary production (a), respiratory oxygen consumption (b)

表1 养殖区和净水区 PB、PP、RC、P/R

Tab. 2 PB, PP, RC and P/R of farming area and purification area

组别	池号	PB/(mg/L)	PP/(g/m ² ·d)	RC/(g/m ² ·d)	P/R
养殖区 FA	I	0.48±0.25	1.76±0.88	3.36±2.36	0.96±0.74
	II	0.47±0.31	1.75±0.80	3.61±2.68	0.78±0.57
	III	0.39±0.29	2.17±0.51	3.36±1.58	0.85±0.44
	区均值	0.45±0.29 ^b	1.90±0.77 ^b	3.44±2.26	0.90±0.59 ^b
净水区 PA	IV	0.87±0.58	3.5±1.47	3.28±2.29	1.76±1.25
	V	1.00±0.62	3.39±1.53	2.58±1.75	1.76±0.79
	VI	0.85±0.46	3.12±1.14	2.95±2.01	1.50±0.82
	VII	0.51±0.20	2.20±1.18	2.36±0.92	0.92±0.27
	区均值	0.81±0.53 ^A	3.05±1.43 ^a	2.79±1.85	1.49±0.92 ^a
<i>P</i>		0.002	<0.001	0.221	0.004
全池均值		0.65±0.47	2.56±1.33	3.07±2.06	1.24±0.85
范围		0.02~2.37	0.30~5.94	0.51~8.41	0.18~4.30

注:各功能池数据为试验期间平均值,“区均值”表示试验期间养殖区、净水区平均值,“全池均值”表示试验期间全池平均值,“范围”表示试验期间全池变化范围,同列不同小写字母表示差异极显著($P<0.01$)

2.2 初级生产力和呼吸耗氧量

全池初级生产力(PP)均值为 $2.56 \pm 1.33 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,范围为 $0.30 \sim 5.94 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,根据PP判定水体营养类型^[14],试验池塘为中营养型水体。试验期间,净水区(I、II、III池)、养殖区(IV、V、VI、VII池)PP均值分别为 3.05 ± 1.43 、 $1.90 \pm 0.77 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,净水区极显著高于养殖区($P<0.001$)(表1)。如图4a所示,各功能池PP于9~11月、8月降低,5~7月上升,其中9月、5~8月差异较大。

结果表明,各功能池PP变化趋势相同,季节波动明显。

在呼吸耗氧(RC)方面,全池RC均值为 $3.07 \pm 2.06 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,范围为 $0.51 \sim 8.41 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ 。养殖区、净水区RC均值分别为 3.44 ± 2.26 、 $2.79 \pm 1.85 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,两者差异不显著($P=0.221$);全池初级生产力与呼吸耗氧量的比值(P/R)平均为 1.24 ± 0.85 ,养殖区P/R均值(0.90 ± 0.59)接近1,水体较为稳定,净水区P/R均值为 1.49 ± 0.92 ,极显著高于养殖区($P=0.004$)(表1)。如图4b所示,各功能池RC季节波动明显,于9~11月降低,3~6月升高,7~8月下降,升高、降低均早于PP,变化趋势和PP不同。

2.3 水体理化因子变化特征

试验期间,全池TN、TP均值分别为 1.72 ± 0.70 、 $0.12 \pm 0.06 \text{ mg/L}$,养殖区(I、II、III池)氮磷比均值显著低于净水区(IV、V、VI、VII池)($P=0.012$),DO、氮磷营养盐浓度均值(除TN)高于净水区,其中TP浓度均值显著高于净水区($P=0.036$)(表2)。池塘日有效辐射(ER)如图5所示,均值为 $12.45 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$,变化范围为 $7.72 \sim 15.76 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$,最低出现在11月,最高出现在5月,季节波动明显。

结果显示,养殖区和净水区间水体理化因子存在差异。

表2 水体理化因子变化
Tab.2 Changes of physicochemical factors

项目	FA	PA	P	全池均值	范围
T/℃	21.70 ± 7.21	21.70 ± 7.21	0.989	21.70 ± 7.20	$11.40 \sim 31.30$
DO/(mg/L)	11.42 ± 2.94	10.90 ± 2.84	0.488	11.12 ± 2.89	$5.54 \sim 17.17$
$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg/L})$	0.41 ± 0.34	0.28 ± 0.21	0.071	0.34 ± 0.28	$0.03 \sim 1.19$
$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg/L})$	0.45 ± 0.24	0.42 ± 0.18	0.537	0.43 ± 0.21	$0.26 \sim 1.21$
$\text{NO}_2^--\text{N}/(\text{mg/L})$	0.10 ± 0.09	0.08 ± 0.08	0.485	0.08 ± 0.08	$0.005 \sim 0.43$
TN/(mg/L)	1.79 ± 0.66	1.80 ± 0.66	0.982	1.72 ± 0.70	$0.96 \sim 4.69$
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/(\text{mg/L})$	0.01 ± 0.009	0.01 ± 0.01	0.855	0.01 ± 0.01	$0.001 \sim 0.05$
TP/(mg/L)	0.13 ± 0.07^a	0.10 ± 0.04^b	0.036	0.12 ± 0.06	$0.01 \sim 0.31$
N:P	14.53 ± 5.85^b	19.98 ± 9.43^a	0.012	17.64 ± 8.53	$8.72 \sim 44.17$

注:各功能池数据为试验期间平均值,“全池均值”表示试验期间全池平均值,“范围”表示试验期间全池变化范围,同行不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)

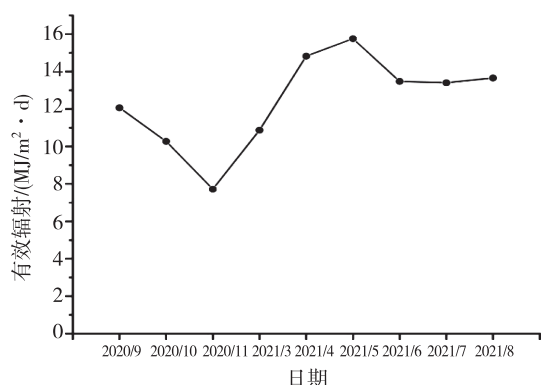


图5 池塘有效辐射变化

Fig.5 Changes of effective radiation

2.4 初级生产力、浮游植物生物量、水体理化因子间的相关性关系

采用双变量相关性分析得知(表3),养殖区PB与T极显著正相关($P<0.01$),与DO、 NH_4^+-N

显著负相关($P<0.05$);净水区PB与T极显著正相关($P<0.01$),与DO显著负相关($P<0.05$)。PP方面,养殖区PP与T、PB极显著正相关($P<0.01$),与DO极显著负相关($P<0.01$),与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 显著负相关($P<0.05$);净水区PP与PB、T、ER极显著正相关($P<0.01$),与TP显著正相关($P<0.05$),与 NO_3^--N 极显著负相关($P<0.01$)。结果表明,净水区和养殖区的PP、PB与水体理化因子的相关性不同。

为检验影响PB、PP的主要因素,对PP、PB与水体理化因子进行多元逐步回归分析(表4)。结果显示,养殖区PB可通过T、ER、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 进行估算;PP可通过T、 NH_4^+-N 、DO进行估算。净水区PB可通过T、ER、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 进行估算;PP可通过T、PB、 NO_3^--N 进行估算。

表 3 PP、PB 和水体理化因子间的相关性系数
Tab. 3 Correlation coefficient between PP, PB and physicochemical factors

项目	FA		PA	
	PP/(g/m ² ·d)	PB/(mg/L)	PP/(g/m ² ·d)	PB/(mg/L)
PB/(mg/L)	0.580**	1	0.688**	1
T/℃	0.593**	0.746**	0.733**	0.629**
DO/(mg/L)	-0.561**	-0.389*	-0.113	-0.342*
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	-0.468*	-0.385*	-0.290	-0.136
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	-0.460*	-0.298	-0.530**	-0.233
NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.033	-0.002	-0.139	-0.063
TN/(mg/L)	-0.137	-0.308	-0.094	-0.269
PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	0.171	0.110	-0.146	-0.016
TP/(mg/L)	0.076	0.023	0.361*	0.182
ER/(MJ/m ² ·d)	0.090	0.219	0.426**	0.118

注:**代表与该因素极显著相关($P<0.01$),*代表与该因素显著相关($P<0.05$)

表 4 PP、PB 和水体理化因子的多元逐步回归分析
Tab. 4 Multiple stepwise regression between PP, PB and physicochemical factors

项目	多元逐步回归公式	R ²	F	P
养殖区	PB = 0.047 (T) - 0.067 (ER) - 8.949 (PO ₄ ³⁻ -P) + 0.355	0.727	20.457	<0.001
	PP = 0.030 (T) - 1.046 (NH ₄ ⁺ -N) - 0.117 (DO) + 3.020	0.631	13.085	<0.001
净水区	PB = 0.074 (T) - 0.128 (ER) - 12.070 (PO ₄ ³⁻ -P) + 0.924	0.578	14.640	<0.001
	PP = 0.077 (T) + 1.025 (PB) - 2.379 (NO ₃ ⁻ -N) + 1.559	0.700	24.915	<0.001

注:“PB”代表浮游植物生物量;“PP”代表水体初级生产力

3 讨论

3.1 水质、浮游植物生物量、初级生产力时空变化特征

黄颡鱼多营养级养殖池养殖区、净水区水体理化因子存在差异。养殖过程中,鱼类排泄物和残饵分解会使水体中氮磷营养盐浓度上升,导致水体污染、养殖品质下降^[21]。试验期间,全池总氮(TN, 1.72±0.70 mg/L)、总磷(TP, 0.12±0.06 mg/L)质量浓度低于刺参传统养殖池塘(TN = 26.89 mg/L、TP = 3.03 mg/L)^[10],达到淡水池塘养殖水体排放一级标准(SC/T 9101—2007)(TN≤3.0 mg/L, TP≤0.5 mg/L),表明多营养级养殖能够为黄颡鱼提供良好的水质环境,减少水体污染。净水区氮磷营养盐浓度低于养殖区,原因可能是净水区种植水生植物,可有效吸收氮、磷营养盐,降低水体氮磷负荷^[22],且植物的磷营养盐消耗率较高,导致净水区氮磷比较低。

池塘初级生产力(PP)在池塘生态系统的能

量流动及物质循环中至关重要^[9]。浮游植物生物作为初级生产力的基础,对初级生产力具有重要影响^[23]。黄颡鱼多营养级池塘浮游植物生物量(PB, 0.65±0.47 mg/L)低于吉林镇赉鱼池(40.6~95.6 mg/L)^[24]等中国传统鱼池。表明多营养级养殖能够避免浮游植物过量增殖,从而导致的水华现象。原因可能是池塘水体氮磷营养盐浓度较低,放养生物对浮游植物产生摄食压力,抑制了浮游植物的增殖。由于PB较低,导致多营养级池塘内,PP低于四川达氏鲟(*Acipenser dabryanus*)池塘(4.08 g/m²·d)^[25]、江苏青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)池塘(9.79 g/m²·d)^[26]、无锡高产池塘(9.39 g/m²·d)^[27]等传统池塘。应适当施用氮肥、磷肥,增加浮游植物生物量,提升水体初级生产力,增强水体生产性能。此外,池塘RC升高(3~6月)早于PB(5~8月)、PP(5~7月),原因可能是RC受浮游动植物呼吸、微生物硝化等多因素影响^[28],变化趋势于PB、PP不同,应在RC升高时进行人工增氧,避免水体出现负

氧现象,导致水体恶化。

本研究结果表明,养殖区、净水区的 PB、PP 差异显著。养殖区中投饲以及鱼类活动导致水体颗粒物增加,遮蔽光照,吸附浮游植物沉降^[21],导致净水区 PB (0.81 ± 0.53 mg/L) 高于养殖区 (0.45 ± 0.29 mg/L) ($P=0.002$),并进一步导致净水区 PP (3.05 ± 1.43 g/m² · d) 高于养殖区 (1.90 ± 0.77 g/m² · d) ($P<0.001$)。为增加养殖区 PP,应增设集污、清污装置,降低养殖活动对 PB 的抑制。P/R 值(初级生产力/呼吸耗氧量)是反映生产力的重要指标,自然水体接近 1,过高表明初级生产力利用率低,过低导致溶氧不足^[29]。试验期间,多营养级池塘 P/R 值为 1.24 ± 0.85 ,低于辽宁鲢鳙鱼池 (3.91)^[30],表明池塘初级生产力利用效率较高,水体稳定。净水区 P/R (1.49 ± 0.92) 高于养殖区 (0.90 ± 0.59) ($P=0.004$),表明相较于养殖区,净水区 PP 未被充分利用,可增加净水区其他生物放养量,提升 PP 利用效率。

3.2 影响初级生产力、浮游植物生物量的关键因素

水体理化因子对养殖区和净水区的 PP、PB 影响不同。相关研究表明,T、DO、pH 等多种水质因子共同影响 PB^[31]。黄颡鱼多营养级养殖池养殖区、净水区 PB 均在水温充足时(5~8月)升高,原因可能是适宜的水温促进浮游植物增殖。相关性分析结果显示,PB 与水温极显著正相关($P<0.01$),这和刘艳等^[32]的研究结果相符,表明水温对水体初级生产力具有重要的影响作用。两区 PB 和溶氧显著负相关($P<0.05$),原因可能是养殖区中设置增氧系统,虽然 PB 低于净水区,但 DO 高于净水区,导致出现负相关性。养殖区 PB 和 NH_4^+-N 显著负相关($P<0.05$),这和李瑞娇^[33]的结果不符,原因可能是试验池塘中氮磷比较高(14.53:1),抑制了部分浮游植物的生长^[34]。

在 PP 方面,作为水域生态系统中能量流动与物质循环的重要表征,T、ER、营养盐等水质因子^[5,35]以及 PB^[9]均对其产生影响。养殖区、净水区 PP 于 5~7 月上升,水温与 PP 极显著正相关($P<0.01$),此结果与盐碱池塘^[8]、主养鲢、鳙和罗非高产池塘^[36]的结果一致,同时,PP 和 PB 极显著正相关($P<0.01$),表明 T、PB 对池塘 PP 有重要影响。氮磷营养盐是 PP 重要的限制因子^[37-38],养殖区、净水区 PP 均和 NO_3^--N 显著负

相关($P<0.05$), NO_3^--N 对两区 PP 有限制作用。

根据多元回归分析结果显示,养殖区、净水区 PB 均与 T 极显著正相关($P<0.001$),与 ER、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 极显著负相关($P<0.001$),可知 T 是浮游植物生长的促进因子,水温变化对浮游植物的增殖具有重要作用。上海地区 6~8 月,常出现阴雨天气,池塘有效辐射降低,但由于 T 较高,浮游植物大量增殖,可能是导致 PB 与光照呈负相关的原因。PP 方面,T 升高促进浮游植物增殖,从而促进净水区、养殖区 PP 升高,PP 和 T 极显著正相关($P<0.001$)。除水温外,养殖区 PP 与 DO、 NH_4^+-N 极显著负相关($P<0.001$);净水区 PP 与 PB 极显著正相关($P<0.001$),与 NO_3^--N 极显著负相关($P<0.001$)。两区 PP 均不由单一环境因子制约,受多种环境因子协同作用。本研究根据养殖区、净水区 PP、PB 及其相关的影响因子的多元逐步回归分析结果,构建了简单 PB 和 PP 估算模型,在实际生产过程中需进一步简化,达到快速评估的目的。

4 结论

黄颡鱼多营养级养殖系统氮磷营养盐浓度较低,能够为黄颡鱼养殖提供良好的水质环境,减少污染。池塘水体中,浮游植物生物量较低,虽可抑制浮游植物过量增殖,避免水华现象,但同时导致池塘初级生产力不足。应适当施用氮、磷肥,增加浮游植物生物量与初级生产力。养殖区、净水区初级生产力、浮游植物生物量差异显著,季节变化明显,均在 9~11 月、3~4 月降低,5~7 月升高。两区浮游植物生物量、初级生产力受环境因子影响不同,其中,水温是最主要的环境因素,对浮游植物生物量、初级生产力均产生重要影响。除水温外,养殖区初级生产力受氨氮、溶氧影响显著,净水区初级生产力主要受浮游植物生物量、硝酸盐氮影响显著。□

参考文献

- [1] 方建光,唐启升. 实施多营养层次综合养殖 构建海洋生态安全屏障[J]. 中国农学通报,2008,24(增刊):9.
- [2] SHPIGEL M, SHAULI L, ODINTSOV V, et al. The sea urchin, *Paracentrotus lividus*, in an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) system with fish (*Sparus aurata*) and seaweed (*Ulva lactuca*): Nitrogen partitioning and proportional configurations

- [J]. Aquaculture, 2018, 490(1): 260-269.
- [3] BISWAS G, KUMAR P, GHOSHAL T K, et al. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) outperforms conventional polyculture with respect to environmental remediation, productivity and economic return in brackishwater ponds [J]. Aquaculture, 2020, 516: 734626.
- [4] 熊莹槐. 草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 不同混养模式沉积物—水界面各形态碳的动态变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [5] 洪妍, 杨平, 全川, 等. 亚热带河口区对虾养殖池塘浮游植物初级生产力变化[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 881-893
- [6] HAN M S. Size and species-specific primary productivity and community structure of phytoplankton in Tokyo Bay [J]. Journal of Plankton Research, 2000, 22(7): 1221-1235.
- [7] LIETH H, WHITTAKER R H. Primary productivity of the biosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1975: 22-26.
- [8] 赵文, 董双林, 张兆琪, 等. 盐碱池塘浮游植物初级生产力日变化的研究[J]. 应用生态学报, 2003(2): 234-236.
- [9] 姜森颖, 周一兵, 唐伯平, 等. 刺参养殖池塘初级生产力及其颗粒结构周年变化[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1698-1706.
- [10] 张磊, 杨淑芳, 阎希柱. 菲律宾蛤仔养殖池塘初级生产力的变化及其影响因素研究[J]. 渔业现代化, 2015, 42(5): 18-23.
- [11] 李修峰, 黄道明, 杨汉运. 光照对大眼鳊鱼幼鱼摄食强度的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005(2): 187-190.
- [12] 代云云, 袁永明, 袁媛, 等. 我国黄颡鱼产业生产现状与发展趋势分析[J]. 现代商贸工业, 2019, 40(23): 23-24.
- [13] 刘兴国, 顾兆俊, 曾宪磊, 等. 池塘生态高效养殖新方式—分级序批式养殖实验[J]. 科学养鱼, 2018(3): 79-80.
- [14] 贾佩峤. 漏湖 ecopath 模型构建及围网放养鲢鳙的生态效应[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- [15] 赵旭昊, 徐东坡, 任浣, 等. 基于 Ecopath 模型的太湖鲢鳙生态容量评估[J]. 中国水产科学, 2021, 28(6): 785-795.
- [16] 李云凯, 刘恩生, 王辉, 等. 基于 Ecopath 模型的太湖生态系统结构与功能分析[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2033-2040.
- [17] 汪倩, 胡庚东, 宋超, 等. 基于 Ecopath 评估蟹-稻复合生态系统营养结构和能量流动[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4852-4862.
- [18] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 上海: 农业出版社, 1991: 45-60.
- [19] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版, 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 200-279.
- [20] 周慙, 何亮, 黄建美, 等. 鄱阳湖-珠湖浮游植物群落结构时空变化特征与环境因子的关系[J]. 生态科学, 2021, 40(4): 36-46.
- [21] 张晓蕾, 王强, 张国奇, 等. 池塘循环流水养殖模式中浮游植物群落结构的时空变化研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(3): 36-45.
- [22] 张弘杰, 过梓栩, 赵大勇, 等. 基于稻田湿地的循环水养殖系统水质变化[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(增刊1): 159-164.
- [23] RYTHÉR J H. Photosynthesis and fish production in the sea [J]. Science, 1969, 166(3901): 72-76.
- [24] 何志辉. 吉林镇赉养鱼场鱼池生态系的分析[J]. 水产学报, 1993(1): 24-35.
- [25] 周波, 龚全, 卢华, 等. 达氏鲢亲鱼培育池浮游植物初级生产力的研究[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(1): 39-45.
- [26] 姚宏禄, 吴乃薇, 顾月兰, 等. 主养青鱼高产池塘的初级生产力及其能量转化为鲢、鳙产量的效率[J]. 水生生物学报, 1990(2): 114-128.
- [27] 雷衍之, 于淑敏, 徐捷. 无锡市河埭口高产鱼池水质研究 I. 水化学和初级生产力[J]. 水产学报, 1983(3): 185-199.
- [28] 张楠楠. 人工湿地系统内氮转化对溶氧变化和恢复过程的动态响应[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- [29] 阎喜武, 何志辉. 虾池浮游植物初级生产力的研究[J]. 水产学报, 1997(3): 288-295.
- [30] 郭赣林, 赵文, 曹欢, 等. 淡水鱼池浮游植物和浮游细菌数量动态及超微藻类对初级生产力的贡献[J]. 大连水产学院学报, 2006(4): 350-356.
- [31] 徐华珊. 兴化湾环境因子与叶绿素 a 之间的相关性分析[J]. 现代农业科技, 2012(1): 268-270.
- [32] 刘艳. 额尔齐斯河及邻近内陆河流域浮游植物生态学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- [33] 李瑞娇. 草鱼池塘浮游植物群落结构及初级生产力、能量转换的初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [34] 王璐. 复合养殖系统中浮游生物群落结构及其与水环境因子的关系[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [35] FALKOWSKI P G, WOODHEAD A D. Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea[M]. New York: Plenum Press, 1992: 52-61.
- [36] 姚宏禄. 主养鲢鳙非鲫高产鱼塘的初级生产力与能量转化效率的研究[J]. 生态学报, 1993(3): 272-279.
- [37] CONLEY D J, MALONE T C. Annual cycle of dissolved silicate in Chesapeake Bay: implications for the production and fate of phytoplankton biomass[J]. Marine Ecology Progress, 1992, 81(2): 121-128.
- [38] TREGUER P, NELSON D M, BENNEKOM A J V, et al. The silica balance in the world ocean: A reestimate[J]. Science, 1995, 268(5209): 375-379.

Primary productivity and influencing factors of water body in integrated multi-trophic aquaculture pond

ZHAO Yuxi^{1,2,3}, LIU Xingguo^{1,2}, ZHOU Runfeng^{1,2,3}, XIAO Shuwen^{1,2,3}, SUN Zhaoyun^{1,2,4}

(1 Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2 Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China;

3 College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4 Wuxi Fisheries College, Nanjing Agriculture University, Wuxi 214128, Jiangsu, China)

Abstract: This dissertation has constructed an integrated multi-trophic aquaculture system of *Pelteobagrus fulvidraco* and investigated the change law of primary productivity, key influencing factors of it. From September to November 2020 and March to August 2021, the black and white bottle method, microscope counting method and national standard detection method were used monthly to measure the primary productivity, phytoplankton biomass, water physicochemical factors of the farming and purification area respectively, which were the functional areas of the pond. Results indicated that the primary productivities of the farming area (FA) and purification area (PA) were $1.90 \pm 0.77 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$, $3.05 \pm 1.43 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ respectively and the phytoplankton biomass was $0.45 \pm 0.29 \text{ mg/L}$, $0.81 \pm 0.53 \text{ mg/L}$ respectively, showing the significant difference ($P < 0.001$, $P = 0.002$). Primary productivity and phytoplankton biomass in FA and PA all decreased in September-November, March-April and increased in May-July, with obvious seasonal fluctuation. Moreover, phytoplankton biomass in FA and PA was mainly affected by water temperature, light and phosphate. The primary productivity of FA was mainly affected by water temperature, ammonia nitrogen and dissolved oxygen, while the primary productivity of PA was mainly affected by water temperature, nitrate nitrogen and phytoplankton biomass. This dissertation is aiming to clarify the basic ecological characteristics of *Pelteobagrus fulvidraco* integrated multi-trophic aquaculture pond, which provides theories for efficient aquaculture.

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; integrated multi-trophic aquaculture; primary productivity; phytoplankton; water quality factor

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.013

盐度胁迫对曼氏无针乌贼胚胎发育和生长性能的影响

黄伟卿^{1,2,3}, 陈宇光¹, 张艺⁴, 乔莹⁵, 马笑晚⁵, 周逢芳^{1,2}, 阮少江^{1,2}, 丁建发^{1,2}

(1 宁德师范学院生命科学学院, 福建 宁德 352100;

2 闽东水产品精深加工福建省高校工程研究中心, 福建 宁德 352100;

3 宁德市鼎诚水产有限公司, 福建 宁德 352100;

4 福建省闽东水产研究所, 福建 宁德 352100;

5 自然资源部第四海洋研究所“中国-东盟国家海洋科技联合研发中心”, 广西 北海 536000)

摘要:为了探究曼氏无针乌贼胚胎发育和生长的适宜盐度,在水温(22.5±1.5)℃条件下,将曼氏无针乌贼受精卵置于试验组,盐度分别为5(S₅)、10(S₁₀)、20(S₂₀)、30(S₃₀)和40(S₄₀),并以本地海区盐度24(S₂₄)为对照组,分析不同盐度对胚胎发育和子代的生长性能的影响。结果显示:曼氏无针乌贼胚胎发育时序分为17个阶段,试验组S₃₀完成整个胚胎发育的时间最短为19 d 3 h,且孵化率为(90.5±4.4)%,显著高于其他组($P < 0.05$),试验组S₅、S₁₀和S₄₀分别在胚胎发育至2细胞期、16细胞期和原肠晚期后停止发育;在盐度20~30区间,采用keys氏公式 $y = ax^b$ 拟合1~30日龄的曼氏无针乌贼子代胴长(x)与体质量(y)的生长式型, $b \approx 3$ 呈等式生长;养殖30 d,试验组S₃₀的体质量绝对增加率、绝对增长率和体质量特定生长率分别为(0.33±0.12)g/d、(0.12±0.02)cm/d和(0.35±0.24)%/d,均显著大于对照组($P < 0.05$)。研究表明,盐度30较适宜曼氏无针乌贼胚胎生长发育。

关键词:曼氏无针乌贼;盐度胁迫;胚胎发育;生长性能

中图分类号:S967.9

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0100-008

曼氏无针乌贼(*Sepiella maindroni* de Rochebrune)属无针乌贼属,俗称墨鱼,在中国广泛地分布于黄海、东海等海域,浙江舟山是其主要原产区,与大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、小黄鱼(*L. polyactis*)和带鱼(*Trichiurus lepturus*)统称为中国的四大经济捕捞水产品^[1-2]。曼氏无针乌贼浑身是宝:乌贼墨和海螵蛸是用于止血的中药材;内脏富含不饱和脂肪酸、脂溶性维生素和丰富的未知生长因子,常被用作动物饲料和添加剂,具有良好诱食和助消化作用;肌肉富含氨基酸、蛋白质等,具有较高的食用营养价值^[3]。因其生长速度较快、养殖周期短和营养价值丰富等特点,21世纪初曼氏无针乌贼人工育苗技术被突破后,在浙江和福建等地已经进行规模化人工育苗和增殖放流,现已广受人民喜爱和青睐的养殖品种之一。

盐度作为水产养殖的重要理化因子,主要通

过影响胚胎的渗透压平衡进而影响发育时长,当渗透压适宜时,胚胎内的渗透压会保持平衡,发育的速度较快,孵化率也较高,但当胚胎处在高渗透压的环境中时,胚胎发育时间将会大大缩短,但胚胎发育畸形的概率将会大幅度提高^[4-8]。但经盐度胁迫也提高了鱼类^[9]、虾类^[10-12]、蟹类^[13-14]、贝类^[15-17]等水生动物的生长速度。目前,关于曼氏无针乌贼胚胎发育的研究主要集中在发育时序^[18]和水温^[19-21]的影响上,盐度胁迫对曼氏无针乌贼的生长发育的影响,仅见雷舒涵等^[22]的研究,其结果表明盐度30有助于提高曼氏无针乌贼的孵化率,但关于曼氏无针乌贼胚胎发育能耐受的盐度范围和养成最适盐度,至今未见报道。曼氏无针乌贼主要养殖区域福建省宁德市在养殖过程中常受台风、暴雨等恶劣天气的影响,在室内水泥池进行曼氏无针乌贼育苗和养成生产过程中,因大暴雨导致养殖水体盐度突变,造成大量死亡

收稿日期:2021-10-06

基金项目:宁德师范学院“闽东特色生物遗传育种协同创新中心(2018Z01)”

作者简介:黄伟卿(1988—),男,副教授,研究方向:水产增养殖。E-mail:393634584@qq.com

通信作者:张艺(1980—),男,高级工程师,研究方向:海水经济动物增养殖。E-mail:13635219159@139.com

现象。

本研究旨在探明盐度胁迫对曼氏无针乌贼的胚胎发育和生长的影响,为开展曼氏无针乌贼人工繁育、工厂化养殖和良种培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 受精卵来源

曼氏无针乌贼受精卵由宁德市南海水产科技有限公司提供,取同一时间产出的受精卵,从中挑选完成受精的黑色受精卵、剔除白色未受精的坏卵,平均卵径(0.8 ± 0.15) cm,卵质量(0.21 ± 0.05) g,受精卵采用活水车运输至宁德市鼎诚水产有限公司进行相关试验。

1.2 试验设计

在水温(22.5 ± 1.5) °C,将曼氏无针乌贼的受精卵分别置于试验组,盐度分别为5(S_5)、10(S_{10})、20(S_{20})、30(S_{30})和40(S_{40}),并以宁德地区野生曼氏无针乌贼生活海区水环境中盐度24(S_{24})为对照组,设置方式每组设置3个重复。盐度的调节以对照组盐度24为基础,采用经48 h曝气的自来水调制盐度为5、10和20,采用海水晶调制盐度为30和40。

将不同盐度组别的曼氏无针乌贼繁育子代进行人工养殖,研究盐度胁迫对其生长性能的影响,养殖技术与管理参考常抗美等^[20]。试验期间,分别在5 d、10 d、15 d和30 d时,每组取30尾曼氏无针乌贼,分别采用游标卡尺(精度0.01 mm)测量胴体长和电子天平(精度0.001 g)称量体质量。

1.3 胚胎发育的观察

因曼氏无针乌贼的受精卵呈现出黑色不透明的形态,无法直接在体视显微镜下进行观察,因此观察前先将受精卵用镊子沿突出处小心的剥开,去除表层黑色的三级卵膜和乳白色的次级卵膜后,将胚胎放置于Leica DMS1000体视显微镜下进行观察并拍照,记录每个时期的发育

进程,并描述形态变化。每次每组均随机取10个受精卵,观察时间和发育时序参考蒋敏霞等^[18]的方法进行。

1.4 生物学统计

采用keys氏公式 $y = ax^b$ (a 、 b 是拟合出来的系数)拟合胴长(x)与体质量(y)的生长式型^[23]。

生长性能统计公式:

$$X_{AGR} = (L_2 - L_1) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$X_{AGRW} = (m_2 - m_1) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$X_{SGRW} = (\ln m_2 - \ln m_1) / t \times 100\% \quad (3)$$

式中: X_{AGR} —绝对增长率(cm/d); X_{AGRW} —体质量绝对增加率(g/d); X_{SGRW} —体质量特定生长率(%/d); m —体质量(g); L —胴体长(cm); t_1 、 t_2 —试验初始、试验结束的时间,d; m_1 、 m_2 和 L_1 、 L_2 分别为 t_1 、 t_2 时的体质量(g)和胴长(cm)。

1.5 数据分析

试验数据用(平均值±标准差)表示,采用SPSS 23.0处理软件中用单因素方差分析和Duncan's多重比较进行显著性差异检验分析。

2 结果

2.1 胚胎发育的观察

曼氏无针乌贼的胚胎发育共分为受精卵期、卵裂期、囊胚期、原肠期、胚孔封闭期、原基出现期、外器官形成期、肌肉效应期、眼窝形成期、晶体形成期、心跳出现期、卵黄膜内的胚胎、体色素出现期、内骨骼形成期、尾腺出现期、缘膜出现期、刚出膜幼体17个阶段(表1,图1)。在水温(22.5 ± 1.5 °C)的范围内,曼氏无针乌贼完成整个胚胎发育过程需要时长19~20 d(表1)。

2.2 盐度对曼氏无针乌贼胚胎发育的影响

水温(22.5 ± 1.5) °C,盐度20~30范围时,胚胎发育时间随盐度的升高而缩短,试验组 S_{30} 完成整个胚胎发育的时间最短为19 d 3 h,且孵化率为(90.5 ± 4.4)%,显著高于其他组($P < 0.05$),试验组 S_5 、 S_{10} 和 S_{40} 分别在胚胎发育至2细胞期、16细胞期和原肠晚期后停止发育(表2)。

表 1 曼氏无针乌贼的胚胎发育的时间以及各个时期的形态特征

Tab. 1 Embryonic development time and morphological characteristics of *S. maindroni*

	发育时期	时间	特征	图例/备注
卵裂期	受精卵期	1 h	卵黄膜举起,形成受精膜	1-2,4
	2 细胞期	3 h	第 1 次卵裂为盘状卵裂,分成两个细胞	常抗美等 ^[20]
	4 细胞期	4 h 30 min	第 2 次卵裂,与第 1 次卵裂沟垂直,分成 4 个细胞	常抗美等 ^[20]
	8 细胞期	6 h 30 min	第 3 次卵裂,与第 1 次平行,有两条卵裂沟在第 1 次裂沟的两侧,分成 8 个细胞	常抗美等 ^[20]
	16 细胞期	9 h 30 min	第 4 次卵裂,分成 16 个细胞,每个大小都呈现不一样的规则,分裂沟较多,呈辐射状	常抗美等 ^[20]
	多细胞	11~13 h	中央细胞小,边缘细胞大,边缘分裂沟呈辐射状	常抗美等 ^[20]
囊胚期	囊胚早期	1 d	囊胚呈盘状,表面可见分裂球很小的中央细胞(明区)和分裂球较大的边缘细胞(暗区),切开囊胚可见双细胞层,胚盘边缘细胞分裂不规则	1-5
	囊胚晚期	2 d	囊胚表面细胞向卵黄延伸下包 1/3,已看不清细胞界线	1-6
原肠胚期	原肠早期	3 d 18 h	外胚层继续分裂,并继续朝着植物极延伸下包 2/3,胚盘边缘细胞排列整齐,形成直线	1-7
	原肠晚期	4 d 7 h	外胚层继续分裂,逐渐将卵黄盖在内部,最后胚孔封闭,此时胚胎呈正椭圆形	1-8
	胚孔封闭期	5 d 8 h	此时的胚胎会在卵黄膜内转动,平均每 1~3 min 转 1 圈	1-9
	原基出现期	5 d 15 h	这时的胚体原基已经出现	1-10
	外器官形成期	6 d 21 h	出现腕突起、水管突起、触腕突起、眼柄突起和胚外体腔,胴部原基基本形成	1-11
	肌肉效应期	7 d 17 h	胚体、卵黄囊出现伸缩的现象,平均 60 次/min 左右	1-12
	眼窝形成期	8 d 5 h	眼柄和眼窝形成,触腕、胴部开始生长	1-13
	晶体形成期	8 d 20 h	眼晶体形成,卵黄膜内胚胎,胚体继续生长	1-14
	心跳出现期	9 d 8 h	出现心跳时最明显的特征,平均心脏跳动 63~72 次/min,头部基本成形,胴部继续生长,内部器官开始生长	1-15
卵黄膜内的胚胎	卵黄膜内的胚胎	10 d 6 h	胚胎可在胚外体腔中转动或伸缩,腔中充满羊水	1-16
	人为破膜后胚胎	10 d 8 h	胚体形状基本与成体相似	1-17
	体色素出现期	12 d	胚体形状大致上与成体相似,胴部背面开始出现部分金黄色色素,海螵蛸开始生长	1-18
	内骨骼形成期	12~14 d	开始出现内骨骼,卵黄囊收缩时可见稍许卵黄流入胚体。色素斑逐渐增多,并且向整个胴背部扩散、颜色加深。	1-19
	尾腺出现期	15~16 d	开始出现了橘黄色的尾腺,位于胴部的末端,背部布满了带有色素的斑点。	1-20
	缘膜形成期	17~18 d	缘膜出现,生长在胴体的近后端,卵黄囊变得更小,背部色斑变大,呈现出不规则的多边形,棕红色,背部中间斑点较小,近缘膜处较大,腕上也出现了色斑,	1-21
	刚出膜幼体	19~20 d	卵囊已脱落,形态与成体相似	1-22



注:1 产卵;2 收集的受精卵;3 未受精的卵;4 受精卵,a 卵黄,b 卵黄膜;5 囊胚早期,a. 暗区,b. 明区;6 囊胚晚期;7 原肠早期;8 原肠晚期,a 胚孔;9 胚孔封闭期;10 原基出现期;11 外器官形成期;12 肌肉效应期;13 眼泡形成期,a 卵胎间隙,b 胴部原基形成,c 触腕突起,d 眼柄及眼窝形成;14 晶体形成期,a 眼晶体;15 心跳出现期,a 心脏,b 鳃叶;16 卵黄膜中的胚胎;17 人为破膜后的胚胎;18 体色素出现期,a 海螵蛸,b 色素斑点;19 内骨骼形成期,a 海螵蛸,b 色素斑点;20 尾腺出现期,a 色素斑点;21 缘膜形成期,a 尾腺橘黄色,b 色素斑点;22 刚出膜的幼体

图1 曼氏无针乌贼的胚胎发育

Fig. 1 Embryonic development of *S. maindroni*

表 2 盐度对曼氏无针乌贼胚胎发育的影响

Tab. 2 Effects of salinity on embryonic development of *S. maindroni*

发育时期	S ₅	S ₁₀	S ₂₀	S ₃₀	S ₄₀	S ₂₄
2 细胞期	停止发育	4 h 27 min	3 h	3 h	2 h 15 min	2 h 36 min
4 细胞期		6 h 51 min	5 h 15 min	4 h 30 min	3 h 40 min	4 h 43 min
8 细胞期		10 h 14 min	7 h 20 min	6 h 30 min	5 h 30 min	6 h 50 min
16 细胞期		停止发育	10 h 12 min	9 h 30 min	8 h 15 min	9 h 47 min
多细胞			12~15 h	11~13 h	10~12 h	12~15 h
囊胚早期			1 d	1 d	1 d	1 d
囊胚晚期			2 d	2 d	2 d	2 d
原肠早期			3 d 20 h	3 d 18 h	3 d 15 h	3 d 19 h
原肠晚期			4 d 10 h	4 d 7 h	4 d 5 h	4 d 8 h
胚孔封闭期			5 d 10 h	5 d 8 h	停止发育	5 d 9 h
原基出现期			5 d 18 h	5 d 15 h		5 d 16 h
外器官形成期			7 d 2 h	6 d 21 h		6 d 22 h
肌肉效应期			7 d 20 h	7 d 17 h		7 d 19 h
眼泡形成期			8 d 9 h	8 d 5 h		8 d 7 h
晶体形成期			9 d 1 h	8 d 20 h		8 d 22 h
心跳出现期			9 d 13 h	9 d 8 h		9 d 11 h
卵黄膜内的胚胎			10 d 12 h	10 d 6 h		10 d 9 h
人为破膜后胚胎			10 d 14 h	10 d 8 h		10 d 11 h
体色素出现期			12 d	12 d		12 d
内骨骼形成期			12~14 d	12~14 d		12~14 d
尾腺出现期			15~16 d	15~16 d		15~16 d
缘膜形成期			17~19 d	17~18 d		17~19 d
刚出膜幼体			20~22 d	19~20 d		20~21 d
孵化率/%	0 ^A	0 ^A	80.7±3.2 ^b	90.5±4.4 ^c	0 ^A	84.1±3.5 ^b

注:不同字母表示显著性差异显著($P<0.05$)

2.3 盐度对曼氏无针乌贼生长性能的影响

分别拟合了 1~30 日龄试验组 S₂₀、S₃₀ 和对照组 S₂₄ 的曼氏无针乌贼胴体长(x)与体质量(y)的生长式型,结果如下:

试验组 S₂₀: $y=0.1452x^{2.8568}$ ($R^2=0.9508$);

试验组 S₃₀: $y=0.1317x^{3.2712}$ ($R^2=0.9438$);

对照组 S₂₄: $y=0.1258x^{3.4505}$ ($R^2=0.9458$)。

三者 $b\approx 3$,即在此生长环境下曼氏无针乌贼表现为等速生长(图 2)。

经 30 d 养殖后,试验组 S₃₀AGR、AGR_W 和 SGR_W 分别为 (0.12 ± 0.02) cm/d、 (0.33 ± 0.12) g/d 和 (0.36 ± 0.24) %/d,均显著高于其他组($P<$

0.05) (表 3)。

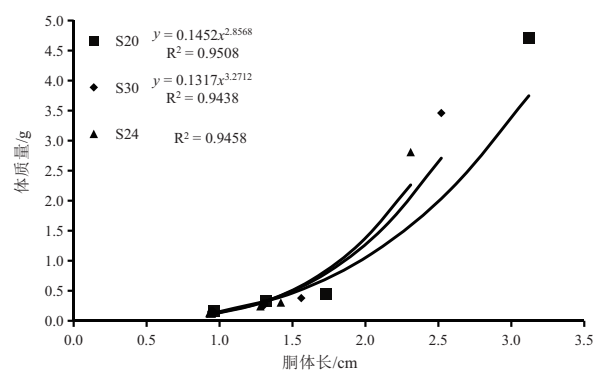


图 2 不同盐度曼氏无针乌贼生长式型

Fig. 2 Growth type of *S. maindroni* at different salinities

表3 盐度对曼氏无针乌贼生长性能的影响

Tab. 3 Effects of salinity on the growth performance of *S. maindroni*

日龄	绝对增长率/(cm/d)			体质量绝对增加率/(g/d)			体质量特点生长率/(%/d)		
	S ₂₀	S ₃₀	S ₂₄	S ₂₀	S ₃₀	S ₂₄	S ₂₀	S ₃₀	S ₂₄
5	0.06±0.01 ^A	0.07±0.01 ^b	0.06±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.04±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A
10	0.06±0.01 ^A	0.10±0.02 ^b	0.07±0.01 ^A	0.02±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.02±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A
15	0.03±0.01 ^A	0.08±0.02 ^c	0.05±0.02 ^b	0.01±0.01 ^A	0.02±0.02 ^A	0.01±0.02 ^A	0.02±0.01 ^A	0.03±0.01 ^A	0.02±0.01 ^A
30	0.07±0.01 ^A	0.12±0.02 ^b	0.07±0.01 ^A	0.19±0.06 ^A	0.33±0.12 ^c	0.24±0.09 ^b	0.21±0.06 ^A	0.36±0.24 ^b	0.29±0.01 ^A

注:每行中不同字母表示显著性差异显著($P<0.05$)

3 讨论

3.1 盐度对曼氏无针乌贼胚胎发育的影响分析

盐度的高低变化会影响海洋生物的渗透压,而绝大部分的海洋生物对外界的盐度变化都有调节机体本身渗透压的能力^[24],有研究发现,在一些贝类^[25]和鱼类^[9]的胚胎发育受盐度变化影响显著,盐度越高,完成胚胎发育的时间越快。本次试验结果同样表明,在盐度 20~30 时曼氏无针乌贼胚胎发育速度与盐度呈正比关系,这一结果与雷舒涵等^[22]和陈四清等^[26]的结果一致。但同时试验结果还发现当盐度达到 40 或盐度小于 10 时无法完成整个胚胎发育时序,主要原因可能是卵膜难以调节卵内外的物质平衡而导致受精卵损伤或代谢失调。

刘振勇等^[19]研究结果发现,曼氏无针乌贼受精卵的孵化率在盐度 22~30 范围内随着盐度的升高而升高,孵化率在 50%~90%之间,在盐度 21 时存活率极低。雷舒涵等^[22]研究结果表明,在盐度 15~30 曼氏无针乌贼受精卵的孵化率随着盐度的升高而升高,在盐度 30~36 曼氏无针乌贼受精卵的孵化率随着盐度的升高而降低,孵化率在盐度 30 时达到最高,为 77.8%,而其他盐度孵化率均低于 50%。本研究同样证实,曼氏无针乌贼受精卵的孵化率在盐度 30 时达到最高值,低于或高于盐度 30 孵化率均出现下降趋势,这与陈四清等^[26]研究一致,盐度突变对曼氏无针乌贼受精卵卵液渗透压的影响均极显著($P<0.01$)。盐度由 30 向低盐处理突变时,受精卵卵液渗透压均显著降低,而向高盐处理组突变时,卵液渗透压则显著升高($P<0.01$)。而渗透压的升高或降低均能导致卵膜难以调节细胞与周围介质之间的物质平衡

而导致受精卵损伤或代谢失调所致,从而导致孵化率的降低。

3.2 盐度对曼氏无针乌贼生长性能的影响分析

养殖水体盐度变化是影响鱼类生存和生长的重要环境因子。郑伟刚等^[27]研究表明,适宜的盐度有利于促进鱼类摄食、生长和饵料利用,但超过适宜范围时就会明显影响鱼类生长,这与盐度影响鱼类体内消化酶活性和能量分配等原因有关^[28-29]。对于头足类动物,不同的种类对盐度的适应范围均有所差异,拟目乌贼(*Sepia lycidas*)生长适宜的盐度是 21~33,最适盐度为 27~30^[30];长蛸(*Octopus variabilis*)生长的适宜盐度范围为 16.3~27.3,最适盐度在 18.3~24.3^[31];金乌贼(*Sepia esculent*)生长的适宜盐度范围 24~37^[26];虎斑乌贼(*Sepiapharaonis*)幼体生长的适宜盐度范围 18~33,最适盐度 24~27^[32]。本研究曼氏无针乌贼在盐度 20~30 范围内生长适宜,最适盐度为 30,较尹飞等^[33]研究指出曼氏无针乌贼盐度的适应范围 11.73~31.43,最适盐度 19.61~26.18,盐度有所差别,原因主要是曼氏无针乌贼为了适应养殖区域环境,长期经驯化所产生了差异。

3.3 关于曼氏无针乌贼的生长型式

目前关于曼氏无针乌贼的生长型式拟合较少,本次试验拟合了不同盐度下 1~30 日龄的胴体长(x)与体质量(y)的生长试型,结果与黄伟卿等^[23]、蒋敏霞等^[18]和张建设等^[21]的拟合结果一致,回归方程中 b 值均接近 3,且 R^2 值较高,拟合度较好,均表现出等式生长的情况。焦海峰等^[34]、姬广闻^[35]研究表明,盐度与水产动物的各种生理活动关系密切,水生生物对盐度都有一定的适宜范围,超出适宜范围可导致其自身与外界水体的渗透压出现差异,需要消耗更多能量来维

持渗透压平衡,以至于用于其他方面的能量减少,会影响其生长性能,超过其自身调节能力时可导致死亡。而曼氏无针乌贼同其他无针乌贼一样,幼体对盐度的耐盐性随着日龄的增长而增强,这与其生理机能日渐完善,对渗透压的调节能力逐渐加强有关^[36]。因此随着曼氏无针乌贼的生长,曼氏无针乌贼长时间对当地养殖盐度的适应,从而导致不同区域养殖的盐度变化所拟合生长模型均存在差异。

4 结论

本研究将曼氏无针乌贼的胚胎发育时序分为 17 个阶段,在水体盐度 30 中完成整个胚胎发育的时间最短、且孵化率为最高,养殖周期 30 d 其体质量绝对增加率、绝对增长率和体质量特定生长率分别为 $(0.33 \pm 0.12) \text{ g/d}$ 、 $(0.12 \pm 0.02) \text{ cm/d}$ 和 $(0.35 \pm 0.24) \text{ %/d}$, 显著大于对照组 ($P < 0.05$), 且生长模式表现为等式生长的规律,结果证明在养殖水体盐度 30 更适宜曼氏无针乌贼生长发育。这一结构将对今后开展曼氏无针乌贼室内苗种培育和进行可控的循环水养成技术具有重要的指导意义。□

参考文献

- [1] 吴常文,赵淑江,徐蝶娜. 舟山渔场针乌贼 (*Sepia andreana*) 的生物学特性及其渔场分布变迁[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(3): 231-237.
- [2] 唐逸民,郑佩玉,李永明,等. 中街山曼氏无针乌贼产卵场生态环境及其资源保护[J]. 浙江水产学院学报, 1984, 3(2): 131-140.
- [3] 唐逸民,吴常文,周江华. 影响曼氏无针乌贼卵孵化的因子及其保护[J]. 浙江水产学院学报, 1986, 5(2): 147-154.
- [4] 刘文斌. 中国鲂属 4 种鱼的生化和形态比较及其系统发育的研究[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 558-564.
- [5] 李嘉泳. 金乌贼 (*Sepia esculenta* Hoyle) 在黄渤海的结群生殖和洄游[J]. 山东海洋学院学报, 1963, 5(2): 69-108.
- [6] PAULIJ W P, BOGAARDS R H, DENUCE J M. Influence of salinity on embryonic development and the distribution of *Sepia officinalis* in the Delta Area (South Western part of The Netherlands)[J]. Marine Biology, 1990, 107(1): 17-23.
- [7] 肖枫,康怀彬. 环境胁迫对水产动物胚胎及幼苗发育影响的研究概况[J]. 生物学通报, 2007, 42(2): 15-16.
- [8] 王杰,李冰,张成峰,等. 盐度对鱼类胚胎及仔鱼发育影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(5): 187-192.
- [9] 黄伟卿,林培华,张艺,等. 大黄鱼胚胎发育受盐度的影响及早期苗种耐低盐研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2018, 17(5): 35-39.
- [10] 杜学芳,孔杰,罗坤,等. 利用低盐度养殖的凡纳滨对虾培育亲虾初探[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 982-989.
- [11] 刘泓宇,张新节,谭北平,等. 饲料钾水平对低盐井水养殖凡纳滨对虾生长及生理特性的影响[J]. 中国水产科学, 2014, 21(2): 320-329.
- [12] 耿隆坤,王建钢,张东. 上海地区低盐海水中斑节对虾养殖试验[J]. 水产科技情报, 1991, 18(1): 2-4.
- [13] 鲍雪宁. 低盐胁迫对三疣梭子蟹“宁象 1 号”相关特性的影响研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- [14] 丁理法,竺俊全,叶荣华,等. 锯缘青蟹低盐度养殖试验[J]. 齐鲁渔业, 2002, 19(12): 3-4.
- [15] 栗志民,刘志刚,韩伟贤. 织锦巴非蛤稚贝盐度适应性研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(10): 96-102.
- [16] 范超. 盐度和温度对菲律宾蛤仔生长和存活的影响及抗高温配套系选育[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016.
- [17] 孔宁. 温度、盐度对皱纹盘鲍“97”选群生长发育的影响[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- [18] 蒋霞敏,葛晨泓,童奇烈,等. 曼氏无针乌贼胚胎发育形态及发育时序的研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2011, 24(2): 1-7.
- [19] 刘振勇,苏跃中,谢友佳,等. 曼氏无针乌贼胚胎发育的初步观察[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(5): 13-19.
- [20] 常抗美,吴常文,吕振明,等. 曼氏无针乌贼胚胎发育与人工育苗技术的研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2009, 28(3): 257-263.
- [21] 张建设,迟长风,吴常文. 曼氏无针乌贼胚胎发育生物学零度和有效积温的研究[J]. 南方水产科学, 2011, 7(3): 45-49.
- [22] 雷舒涵,吴常文,高天翔,等. 金乌贼和曼氏无针乌贼胚胎发育及其盐度耐受能力的比较研究[J]. 中国水产科学, 2011, 18(2): 350-359.
- [23] 黄伟卿,周绍锋,单秀娟,等. 海捕野生曼氏无针乌贼选育 F1 的生长[J]. 水产科学, 2017, 36(6): 799-803.
- [24] 张鑫磊,陈四清,刘寿堂,等. 温度、盐度对半滑舌鳎胚胎发育的影响[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 342-348.
- [25] 梁玉波,张福绥. 温度、盐度对栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 胚胎和幼虫的影响[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(4): 334-340.
- [26] 陈四清,刘长琳,庄志猛,等. 饵料、盐度对金乌贼幼体生长的影响[J]. 渔业现代化, 2008, 35(6): 23-25+32.
- [27] 郑伟刚,张兆琪,张美昭,等. 盐度与碱度对花鲈幼鱼的毒性研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 116-118.
- [28] 吕富,黄金田,王爱民. 碱度对异育银鲫摄食、生长和存活的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(22): 6789-6790.
- [29] 黄伟卿,阮少江,张艺,等. 盐度对大黄鱼成活、生长和耳石金属元素的影响[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(6): 100-105.
- [30] 彭瑞冰. 几种生态因子对拟目乌贼胚胎发育及幼体的影响[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- [31] 张玉玉,王春琳,李来国. 长蛸的盐度耐受性及盐度胁迫对

- 其血细胞和体内酶活力的影响[J]. 台湾海峡, 2010, 29(4): 452-459.
- [32] 乐可鑫, 蒋霞敏, 汪元, 等. 盐度对虎斑乌贼幼体生长与酶活的影响[J]. 热带海洋学报, 2015, 34(6): 64-72.
- [33] 尹飞, 王春琳, 宋微微. 曼氏无针乌贼幼体生态因子耐受性的研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2005, 25(4): 39-43.
- [34] 焦海峰, 尤仲杰, 竺俊全, 等. 嘉庚蛸对温度、盐度的耐受性试验[J]. 水产科学, 2004, 23(9): 7-10.
- [35] 姬广闻. 盐度对香鱼仔鱼生长和成活率的影响[J]. 淡水渔业, 2003, 33(4): 3-5.
- [36] 王跃斌, 孙忠, 王伟定. 盐度对不同日龄日本无针乌贼幼体生长及存活的影响[J]. 生物学杂志, 2013, 30(1): 36-38.

Effects of salinity stress on embryonic development and growth performance of cuttlefish *Sepiella maindroni*

HUANG Weiqing^{1,2,3}, CHEN Yuguang¹, ZHANG Yi⁴, QIAO Ying⁵, MA Xiaowan⁵, ZHOU Fengfang^{1,2}, RUAN Shaojiang^{1,2}, DING Jianfa^{1,2}

(1 School of Life Sciences, Ningde Normal University, Ningde 352100, Fujian, China;

2 Engineering Research Center of Mindong Aquatic Product Deep-Processing, Fujian Province University, Ningde 352100, Fujian, China;

3 Ningde Dingcheng Fishery Company Limited, Ningde 352100, Fujian, China;

4 Mindong Fishery Research Institute of Fujian Province, Ningde 352100, Fujian, China;

5 Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai 536000, Guangxi, China)

Abstract: In order to investigate the appropriate salinity for embryonic development and growth condition of *Sepiella maindroni*, the fertilized eggs of cuttlefish were placed in salinity of 5 (S_5), 10 (S_{10}), 20 (S_{20}), 30 (S_{30}) and 40 (S_{40}) groups at the water temperature of $(22.5 \pm 1.5)^\circ\text{C}$, and the local sea salinity of 24 (S_{24}) was used as the control group. The results showed that there were 17 stages in the embryo development of *S. maindroni*, the time of embryo development decreases with the increase of salinity in the range of salinity 20–30. The experimental group S_{30} completed the whole embryo development in the shortest time of 19d and 3h, and the incubation rate $(90.5 \pm 4.4)\%$ was significantly higher than other groups ($P < 0.05$). In S_5 , S_{10} and S_{40} groups, embryo development stopped after the 2-cell stage, 16-cell stage, and the gastrula stage, respectively. In the range of salinity from 20 to 30, the formula $y = ax^b$ was used to fit the growth type of the trunk length (x) and body mass (y) of the 1 to 30 days old offspring of *S. maindroni*. $b \approx 3$ showed the growth equation. After 30 days of breeding, the absolute increase rate, absolute growth rate, and specific growth rate of body mass were $(0.33 \pm 0.12) \text{ g/d}$, $(0.12 \pm 0.02) \text{ cm/d}$ and $(0.35 \pm 0.24)\%/d$, respectively. All the data were significantly higher than the control group ($P < 0.05$). The results showed that the salinity of 30 was more suitable for the growth and development of cuttlefish *S. maindroni*.

Key words: *Sepiella maindroni*; salinity stress; embryonic development; growth performance

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.014

基于机器视觉的鲤、鲫鱼性状测量系统的设计与实现

周晓林,马超,王兆平,杨慧,王延晖,张开松,
穆林,张芹,杨兴丽,李治勋

(河南省水产科学研究院,河南郑州,450044)

摘要:在鱼类育种、渔业资源调查和水产养殖的过程中,均需要对鱼体的体长、体厚、体高等性状参数进行测量。传统测量方法主要采用人工测量方式,劳动强度大、效率低、测量精度低。利用机器视觉技术进行鱼类性状测量可以有效提高测量效率和精度,易于实现自动化。本研究基于机器视觉技术,设计了一个一体化性状测量平台,将鱼类图像采集与分析、体质量与可量性状测量、PIT扫码集成到一个平台,可实现对鲤、鲫鱼性状参数的精确测量。对鱼体2D图像进行性状测量时,需要进行像素校准,由于每条鱼体厚不同,传统的固定像素校准平面在鱼体厚较大时,难以实现精确测量。本研究设计了一种像素校准方法,即在采集鱼体图像时,通过距离传感器测定鱼体体厚,根据体厚大小,确定每条鱼轮廓面的像素校准参数,减小测量误差,提高鱼体可量性状测量的准确性。以鲤、鲫鱼人工测量结果作为对照,比较该系统的测量误差,结果显示,随着鱼体体厚的增加,体长、体高、头长、尾柄长、尾柄高、体厚等参数的相对测量误差没有显著增大。体高和体长相对误差最大值为1.05%、-1.39%;头长、尾柄高、尾柄长和体厚等相对误差最大值分别为1.73%、-2.79%、-2.88%和-2.1%,绝对误差值均小于1 mm。体质量相对误差最大值为-0.36%。该系统满足鲤、鲫鱼性状测量要求。

关键词:机器视觉;鱼类性状;性状测量;表型信息;鲤;鲫

中图分类号:S951.2;TP391.4

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0108-010

无论是进行鱼类经济性状的遗传解析,还是进行现代育种技术如全基因组选择等^[1],都需要大规模群体的表型信息的动态化和量化分析的支持,而高通量表型信息采集是满足这一需求的关键技术。作为表型信息最基础的数据采集之一,鱼类的性状参数测量,一直以来沿用着传统方法:尺子量、称称、肉眼数、人工记,费时费力,尤其是对活鱼测量时,测量时间长,对鱼体伤害大,测量精度低,速度慢,效率低,难以满足鱼类高通量表型信息采集的需求。

机器视觉是近年来快速发展的技术之一,是用机器替代人眼来完成观测和判断^[2],也称计算机视觉,其本质是数字图像处理,主要应用为图像识别、检测、测量及位置引导等,其优势体现在自动化程度高、速度快、准确性高,方便信息集成,不受人为因素干扰等。

目前,在渔业领域,应用机器视觉的图像识别技术,研究人员对鱼类品种识别^[3-10]、胚胎发育^[11]、游泳行为^[12]、摄食行为^[13-16]、分级^[17-18]、鱼苗计数^[19-20]等多个方向进行相关研究,取得了长足进展,提升了研究的信息化、智能化、自动化、精细化水平。应用机器视觉技术的图像识别及测量技术进行鱼类性状测量,多位学者做了多种方法的探索,如杨杰超等^[21]和 Sanchez 等^[22]采用管道诱导方式获取鱼体侧面图像进行性状测量;余心杰等^[23]采用透明秤盘从鱼体下方采集图像及体质量进行测量;李艳君等^[24]采用双目相机立体视觉在水下进行鱼体图像采集及测量;房舒^[25]采用侧面和上面两部相机对放在装有水的收纳盒中斑点叉尾鮰进行两个方向图像采集并进行特征点识别及性状测量;欧利国等^[26]对金枪鱼图像进行较为准确的处理及定位测量;李振波等^[27]、段

收稿日期:2022-02-18

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-45-45);河南省现代农业产业技术体系(S2014-10);河南省基本科研业务费项目(JBKY2021)

作者简介:周晓林(1965—),男,高级工程师,研究方向:渔业机械自动化。E-mail:zhxl@139.com

延娥等^[28]、HAO 等^[29]对鱼体性状测量进行了较为详细的综述。

采用上述文献中的单目相机方法,对静止平放在平台上的鱼体进行图像采集,简单有效,获取的图像清晰准确,平台还可以增加体质量测量、植入式芯片(PIT)扫码等功能,能较好地满足高通量鱼类表型信息采集集成化快速、精确、轻便的要求,但在采用该方式进行性状测量研究时发现两个问题。首先是像素校准(每像素代表的实际尺寸)位置不准确,校准是所有测量的基础,同样,在机器视觉测量中,不准确的像素校准位置就出现误差,现有的像素校准方法是采用与相机镜头固定距离的平面上进行校准,放置在该平面的平面物体进行测量没有问题,但放置在该平面上的鱼体,随着鱼体体厚的增加,测量误差同时增大,其原因是鱼体轮廓面即测量平面与校准平面偏离增大造成的。其次是没有合适的测量模板,常规的机器视觉测量,测量点位较少,不需要模板,采用两点一线标记即可,但鱼类性状测量需要对鱼体图像轮廓外接4个点和鱼体轮廓内的眼径、鳃盖、肛门、尾柄前后、尾柄高低和叉尾等9个点进行标记定位,这些点位既独立,又相互有联系,采用常规的点线标记方法,难以准确表达各点位之间的联系,机器视觉软件就无法对这些关联点进

行自动处理,人机交互也不够友好。

本研究设计了一种随鱼体体厚变化的像素校准新方法和一种鱼类性状测量新模板,研发了实现集鱼体图像采集分析、性状测量、称重、PIT 芯片标记扫码为一体的集成装置及软件,为研究人员对鱼类进行快速、准确、批量的性状测量提供一种新手段,为探索构建具有通用性的鱼类表型信息自动化获取平台提供参考。

1 系统设计

1.1 系统架构设计

为能够精确采集鱼体图像及鱼体质量,系统采用单目相机采集静态鱼体侧面图像模式。总体架构如图1所示,系统由相机、激光距离传感器、称量盘、称重传感器及其变送器、A/D 转换器、光源、背光板、计算机等组成,增加 PIT 芯片标记扫码器、两只脚踏开关等辅助设备。相机连接到计算机,称重传感器及其变送器和激光距离传感器通过 A/D 转换器连接到计算机,PIT 芯片扫码器和两个脚踏开关连接到计算机,光源和背光板连接到电源,两只脚踏开关其中一只用于触发图像采集,另一只用于称重清零。为使鱼体图像轮廓更加清晰,称量盘采用透明材料,其下面有背光板光线向上照射,称重传感器分布在称量盘下面四周。

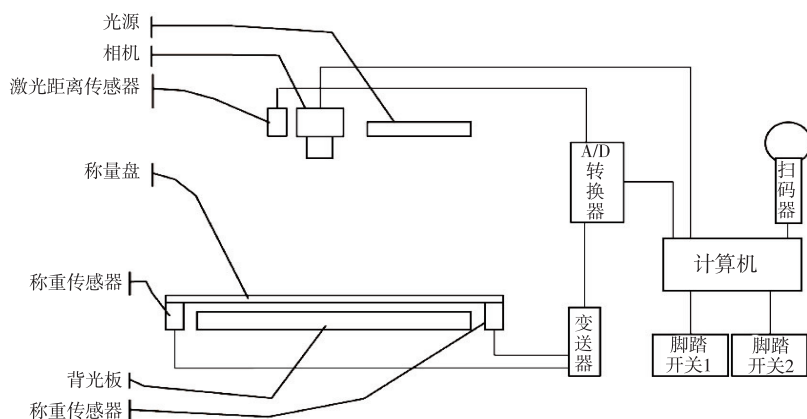


图1 系统架构示意图

Fig. 1 System architecture diagram

1.2 校准方法设计

相机采集图像,表现为远小近大,通过图像对对象进行测量必须进行像素校准,即得到每像素所代表的实际尺寸。现有的机器视觉测量校准方法为,相机对确定大小的黑白相间的正

方形、圆形、刻度尺等平面图案拍摄后,机器视觉软件对其图像分析处理,得到在该状态下(相机镜头与被测物距离确定)像素校准参数,然后对被测对象拍摄采集图像,机器视觉软件依据该状态下像素校准参数,计算出测量对象的实

际大小,完成测量。但该方案有其限定性,即被测对象平面必须与校准平面一致或接近,才能获得较为准确的测量结果,当校准平面与被测对象平面距离偏离较大时,计算出的被测对象尺寸偏差就会变大,达不到测量要求。采用现有的机器视觉技术对鱼体进行拍照测量时,校准平面只有一个,当鱼体一侧平放在平台上,每条鱼体体厚不同,距离相机镜头距离就不同,当鱼体体厚较小,采集的鱼体侧面图像与校准平面接近,误差较小,当鱼体侧面与校准平面偏离较大时,其误差将超出可接受范围,导致测量失败。为此,需要设计一种校准模块及方法,对不同高度的平面分别进行校准,使得不同体厚的鱼体都能得到较为准确的测量。

根据上述要求,设计了一种阶梯形校准模块^[30](图2)及方法,每个阶梯高度确定,每个阶梯平面上设置有黑白相间的确定尺寸的正方形,在其一端标注有该阶梯平面的高度。

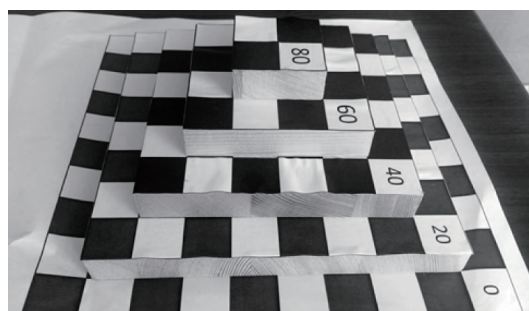


图2 阶梯校准模块

Fig. 2 Step calibration module

把阶梯校准模块平放在图像采集平台上,黑白相间图案朝向相机进行拍照,得到阶梯校准模块图像,如图3所示(上图为阶梯模块图像,下图为校正值显示)为高度为0,每个正方形边长25 mm,校准距离100 mm,像素校准值为0.404 858 mm/pix。机器视觉软件根据每个阶梯黑白图进行像素距离参数校准,阶梯高度系列分别为0、20、40、60、80 mm,每个阶梯高度得到一个像素距离校准参数,通过拟合,得到一个与阶梯高度相关的拟合方程(如图4所示),即把一个确定高度代入方程,可得到该高度下的像素距离参数。

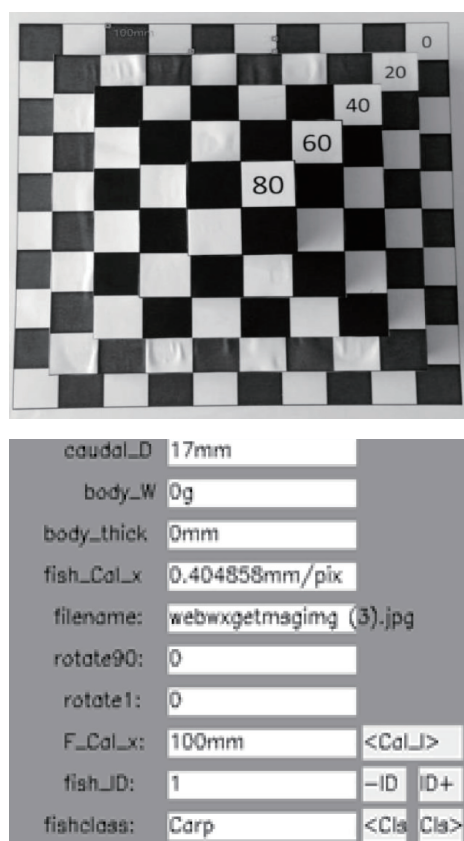


图3 高度为0 mm的阶梯校正的软件截图

Fig. 3 Software screenshot of step calibration with height 0 mm

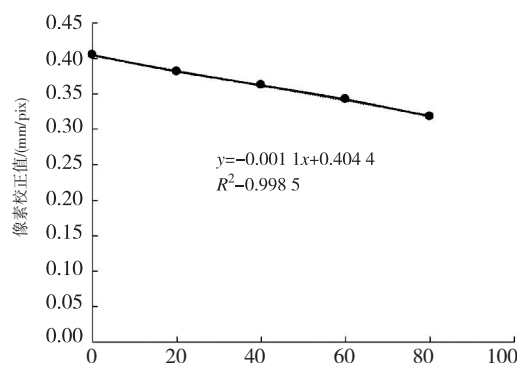


图4 不同高度的像素校正值及其拟合方程

Fig. 4 Calibration values of pixels at different heights and their fitting equations

1.3 测量模板设计

根据鱼类性状测量标准^[31],结合计算机测量要求,设计了一个测量模板^[32],如图5所示,模板包含一个矩形,为鱼体示意图^[31]轮廓外接矩形,其上下宽 a_k 为鱼体体高,左右长 a_j 为鱼体全长,在测量矩形中设置 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 等8条竖线,

在 g 竖线上设置两个点 M、N, M 为尾柄高高点, N 为尾柄高低点。这些点及线均可用鼠标拖动放置在鱼体图像的特征测量位置,即可得出该鱼体可量性状指标:aj-全长、ai-叉长、ah-体长、ad-头长、ab-吻长、bc-眼径、cd-眼后头长、ak-体高、ae-肛前体长、fh-尾柄长、MN-尾柄高。

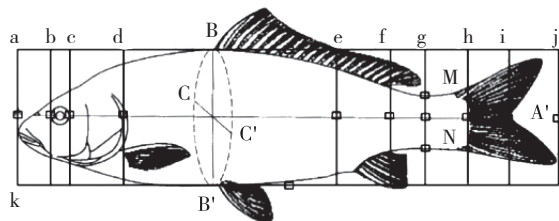


图5 鱼类可量性状测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fish phenotypic traits measurement

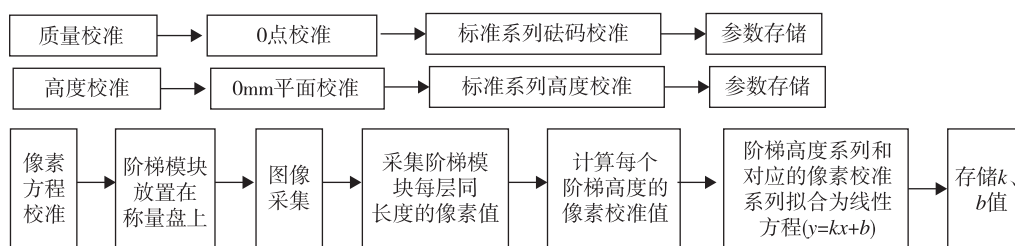


图6 校准流程图

Fig. 6 Calibration flow chart

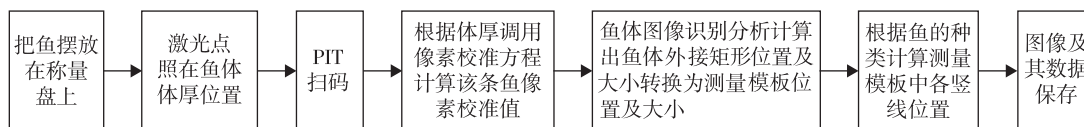


图7 现场采集流程图

Fig. 7 Field collection flow chart

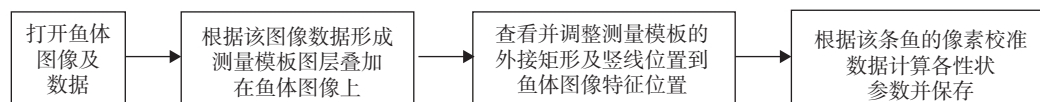


图8 图像测量流程图

Fig. 8 Image measurement flow chart

当完成后期测量流程后,即可进行数据输出,输出格式为表格数据。流程如图9所示。

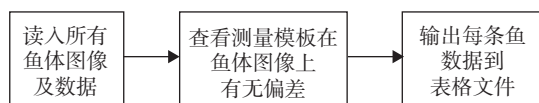


图9 数据输出流程图

Fig. 9 Data output flow chart

1.4 系统流程设计

系统总体流程分四部分,分别为校准、现场采集、后期测量和数据输出。

校准流程包括重量校准、高度校准、像素方程校准,流程如图6所示,每次现场采集之前需要做一次校准流程。

现场采集流程如图7所示,其中的激光点为激光距离传感器发射,该流程循环直至采集完所有鱼体图像及其数据。

后期测量流程是为在现场采集时图像识别算法计算出的测量模板中外接矩形其各竖线位置与鱼体图像的测量特征位置的偏差而进行人工调整,以获取更为准确的性状数据。其流程如图8所示,该流程循环直至所有鱼体图像处理完成。

2 系统采集平台硬件设计

根据系统架构设计要求,设计研制了鱼类性状测量系统平台样机,如图10所示。试验平台底座、立柱、悬臂均采用30×30欧标铝合金型材;相机采用Basler的acA800-510uc,分辨率为800×600,可进行曝光时间、增益、AOI(图像采集区域)

等参数设置,接口为 USB3.0;镜头为 Computar 的 5 mm 定焦镜头;激光距离传感器采用松下 HG-C1400,测量中心距离 400 mm,测量范围 ± 200 mm,重复精度为 0.8 mm,模拟输出为 0~5 V;称重传感器采用金诺悬臂式称重传感器 JHBL-1,量程为 5 kg,整个平台采用 4 个,称重范围为 0~20 kg,变送器采用 4 合 1 的金诺多通道信号处理器 BSQ-12,输出为 0~5 V;A/D 转换器采用 NI 的 DAQ 模块 USB6002,有 4 个差分模拟端口,与计算机接口为 USB2.0;电源采用 12V15000mA 聚合物锂电池;定制可调光的背光板及光源;PIT 芯片扫码器为带有蓝牙的灵瑞科技的 AH03;两只脚踏开关为一诺电器的可自定义键 USB 接口的 EN (TFS)-1;USB 集线器采用联想的 USB3.0 一拖四集分线器高速转换器接头。

连接方式为:4 个称重传感器通过 4 合 1 变送器连接到 USB6002 的一个差分模拟端口;激光位移传感器连接到 USB6002 一个差分端口;相机、USB6002 通过 USB 集线器连接到计算机 USB3.0 接口;脚踏开关通过 USB 集线器或直接连接到计算机;扫码器通过蓝牙连接到计算机。

为方便实际应用,根据系统设计中的阶梯校准原理及方法,设计了带有阶梯校准工具的称重盘(如图 11 所示)。该称重盘由透明材料制成,为长方形槽,长 450 mm,宽 225 mm,可满足全长小于 450 mm、体高小于 225 mm 的常规淡水养殖鱼类,在槽底表面靠近较高边附近设置有与槽边

平行的槽底表面刻度尺 1,为高度 0 mm 校准尺,较高的一边高度为 80 mm,表面设置有较高边上刻度尺 2。像素方程校准时,采集图像中有上下两个标尺,分别对两个平面的每像素距离值校准,采用两点拟合,生成与物体厚度相关的像素距离校准方程。如图 11 所示,相机在鱼体上方,在对鱼体进行测量时,鱼体为纺锤型,鱼体体厚测量位置为 C',测量的鱼体厚度是 C-C',其轮廓在鱼体厚度的 1/2 处,即 B-B' 轮廓平面,所以,采用鱼体体厚 C-C' 的 1/2 值,代入像素校准方程,得到该条鱼轮廓面 B-B' 的每像素距离校准值,作为该鱼体的像素测量校准值。

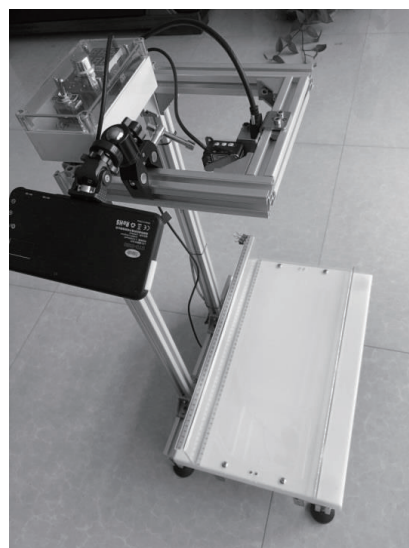


图 10 鱼类性状测量系统样机

Fig. 10 Prototype of fish character measurement system

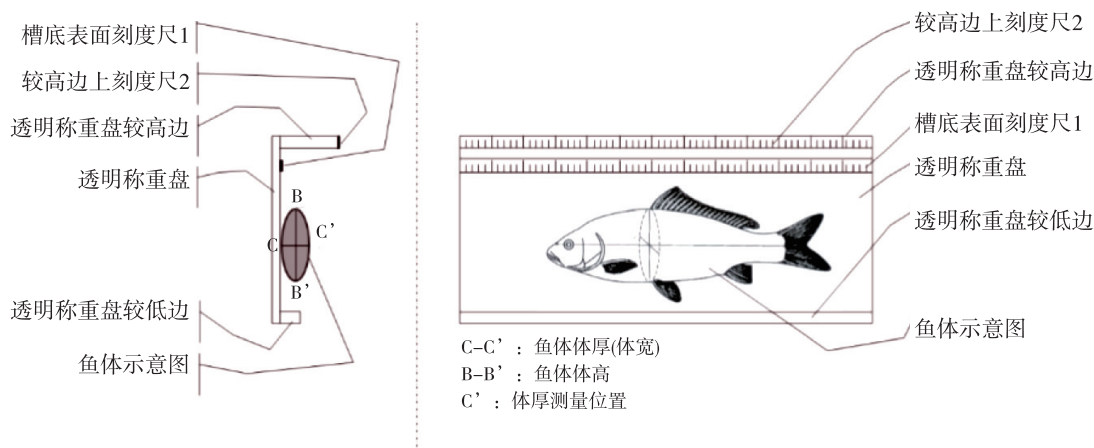


图 11 称重盘示意图

Fig. 11 Illustration of the weighing tray

3 软件控制及功能设计

计算机操作系统为 Windows10,软件开发环境为 VS2015 版的 C++,机器视觉库为 OPENCV3.2.0,相机控制软件开发采用厂家提供的 PYLON SDK5.x,USB6002 采集控制软件开发采用 NI-DAQmx SDK。

根据系统总体流程,软件设置 6 个模块,分别是称重校准、高度校准、相机参数设定及像素方程校准、实时图像及数据采集、图像处理、图像查看及数据输出。

根据像素方程校准流程编制的相机参数及图像像素校准功能模块截图如图 12 所示,左边为数据显示窗口,右边为相机实时显示的带有阶梯校准工具的槽型称量盘图像的显示窗口。在调整好光源后,根据显示图像进行曝光时间、增益调整,同时调整焦距、光圈,使称重盘上两个校正刻度尺在视野范围且图像清晰;在相机实时图像显示窗口中,设置有两个校准线段和一个 AOI 矩形,把 0 mm 高度的校准线段 CAL0 放置在称量盘槽底平面刻度尺 1 上,拉伸校准长度至刻度尺 150~350 mm 处,得到 0 mm 高度时校准距离 200 mm 的像素 429,把 80 mm 高度的校准线段 CAL1 放置在称重盘较高边上刻度尺 2 上,拉伸校准长度至刻度尺 150~350 mm 处,得到 80 mm 高度时校准距离 200 mm 的像素 513,对这两组数据拟合,即可得到像素距离与高度的线性方程;调整图像上的 AOI 矩形左上顶点为(16,150),高度 402 像素,宽度为 768 像素,矩形大小适合采集对象,保存并退出该模块。

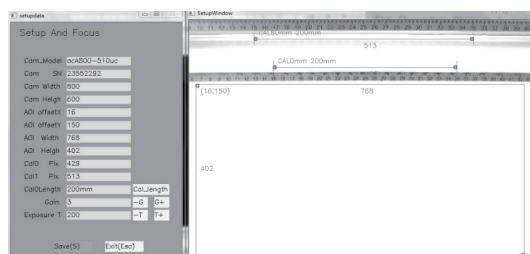


图 12 相机参数及图像像素校准的软件截图

Fig. 12 Software screenshot of camera parameters and image pixel calibration

根据现场采集流程编制的实时图像及数据采集模块流程,把鱼体平放在称重盘上,如有芯片标记,进行扫码,调整鱼体位置,使激光光斑照射在鱼体体厚位置,质量稳定后,按图像采集功能键或踩踏脚踏开关,自动分析并保存图像及数据文件,完成鱼体图像、体厚、质量、芯片标记码采集功能。

根据后期测量流程编制的图像处理功能模块流程,调整每条鱼图像测量模板上的各条线位置到鱼体各特征部位的准确位置,即可得到全长、叉长、体长、头长、吻长、眼径、眼后头长、体高、肛前体长、尾柄长、尾柄高等 11 个可量性状参数,与该条鱼的编号、体厚、体质量、PIT 芯片标记码等保存到数据文件。在完成图像处理,调用数据输出功能模块,可对每条鱼的测量图像及测量数据进行查看,无误后,输出所有测量参数的表格数据,完成整批鱼体性状测量。

4 方法验证

4.1 图像校正方法验证

由于无法找到和鱼体相似的纺锤型物体,而圆柱体的直径轮廓在其高度的 1/2 处,与鱼体轮廓相仿,所以采用 4 个直径依次增加的木制圆柱体进行直径测量验证,同时进行高度、重量测量验证。

圆柱体直径人工测量采用游标卡尺,精确到 0.01 mm,质量人工测量采用奥豪斯 Scout 天平,精确到 0.1 g。软件测量时,把圆柱体平放在平台称重盘上,激光光斑照射在圆柱体最高处,测量圆柱体的高度(也是圆柱体直径),圆柱体左右和前后方向摆放,各采集测量一次圆柱体直径轮廓,以验证相机水平方向和垂直方向的测量准确度。

启动软件,采集圆柱体图像、圆柱体的高度(也是圆柱体的直径)及重量等数据,用软件对其直径轮廓进行测量,精确到 1 mm,高度测量精确到 1 mm,质量测量精确到 1 g。图 13 为直径 20 mm 圆柱体左右摆放测量截图,其图右部为圆柱体图像及测量模板,图左部为测量值显示,其中 body_thick 为圆柱体的高度,body_D 为圆

柱体直径轮廓, $body_W$ 为圆柱体质量, $fish_Cal_x$ 为物体高度 20 mm 的 1/2 高度截面时的像素校正值。

表 1 所示为直径依次增加的 4 个圆柱体人工测量与软件测量结果, 以人工测量为对照, 随着圆柱体直径的增加, 软件测量的圆柱体直径轮廓在水平方向、垂直方向及高度的绝对误差均小于 ± 1 mm; 质量测量中, 绝对误差均小于 ± 1 g。软件在水平、垂直两个方向的测量精度及质量测量精度

均满足设计要求。



图 13 圆柱体测量截图

Fig. 13 Software screenshot of the cylinder Measurement

表 1 圆柱体测量结果
Tab. 1 Measurement results of the cylinder

项目		圆柱体 1	圆柱体 2	圆柱体 3	圆柱体 4
圆柱体直径	人工卡尺测量/mm	20.64	41.66	59.41	85.34
	软件测量(水平)/mm	20	41	59	86
直径轮廓	水平绝对误差/mm	-0.64	-0.66	-0.41	0.66
	软件测量(垂直)/mm	20	41	60	85
	垂直绝对误差/mm	-0.64	-0.66	0.59	-0.34
高度	软件测量/mm	20	41	59	85
	绝对误差/mm	-0.64	-0.66	-0.41	-0.34
质量	人工天平测量/g	13.5	42.8	86.2	161.0
	软件测量/g	13	43	86	161
	绝对误差/g	-0.5	0.2	-0.2	0

4.2 鱼体性状测量验证

选取 5 条鲫鱼及 5 条鲤鱼进行测量验证。按鱼类性状测量标准进行人工测量, 鲤鱼体长采用直尺测量, 精确到 1 mm, 其他可量参数采用游标卡尺测量, 精确到 0.01 mm, 重量采用奥豪斯 Scout 天平, 精确到 0.1 g。

图 14 为软件测量表 2 中鲤 6 的界面截图。软件测量及人工测量选取体长、体高、尾柄长、尾柄高、头长、鱼体体厚和体质量等主要性状参数对比结果如表 2 所示。从表 2 中看出, 以人工测量为对照, 随着鱼体体厚的增加, 体长、体高、头长、尾柄长、尾柄高、体厚等参数的相对误差没有显著增大; 体高和体长相对误差最大值为 1.05%、-1.39%, 头长、尾柄高、尾柄长和体厚等相对误差最大值分别为 1.73%、-2.79%、-2.88%、-2.1%, 绝对误差值均小于 1 mm; 体质量相对误差最大值为 -0.36%; 系统总体误差水平满足测量要求。

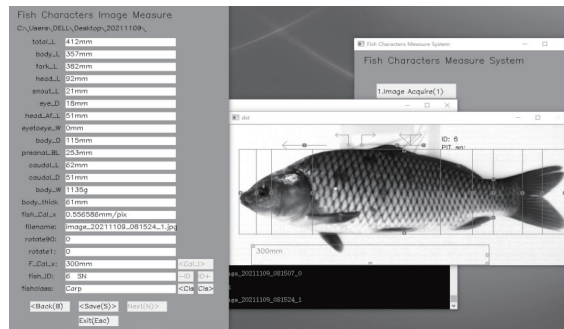


图 14 鲤测量截图

Fig. 14 Software screenshots of common carp (*Cyprinus carpio*) measurement

5 结果讨论

5.1 像素校准平面的重要性

在图 12 的图像像素校准的软件截图中可以看到, 同样 200 mm 长的刻度尺, 在高度为 0 mm 的槽型称量盘底部, 像素为 429, 而在高度为 80 mm 的槽型称量盘较高边上, 像素为 513, 高低两

个平面在一幅图像上像素值差别很大,这是单目相机采用固定平面像素校准值测量不同体厚的鱼体性状参数出现误差的根本原因。在采用可变高度的像素校准平面的方法后,对直径从 20.64 mm 到 85.34 mm 的 4 个阶梯高度的平放圆柱体进行

直径轮廓测量,结果绝对误差均不超过 1 mm,验证了该方法的准确性和有效性。采用体厚较小的鲫鱼和较厚的鲤鱼进行测量对比,鱼体体厚从 39.25 mm 到 63.61 mm,测量结果均符合要求,验证了该方法的实用性。

表 2 鲫、鲤测量结果

Tab. 2 Measurement results of crucian carp (*Carassius auratus*) and common carp (*Cyprinus carpio*)

性状参数		鲫 1	鲫 2	鲫 3	鲫 4	鲫 5	鲤 6	鲤 7	鲤 8	鲤 9	鲤 10
人工测量	体质量/g	363.2	325	382.1	307.1	366.2	1133.8	1118.2	1015.7	729.7	757.4
	体厚/mm	42.23	40.84	44.19	39.25	42.9	61.71	63.61	59.82	52.19	55.44
	体长/mm	215.66	211.64	205.59	205.34	227.14	362	360	340	299	298
	体高/mm	93.02	86.26	98.88	89.74	92.54	115.32	112	109.74	107.7	107.8
	头长/mm	53.08	52.23	56.31	49.68	53.52	92.25	92.67	88.59	74.47	77.94
	尾柄长/mm	37.16	34.84	32.92	34.24	41.75	62.4	63.77	56.85	52.19	52.94
	尾柄高/mm	34.9	33.98	34.81	32.91	34.44	51.88	46.31	45.78	43.88	42.92
软件测量	体质量/g	362	325	381	306	365	1135	1119	1017	730	758
	体厚/mm	42	40	44	40	42	61	63	59	52	55
	体长/mm	216	213	206	205	228	357	355	337	297	297
	体高/mm	94	87	99	89	93	115	112	110	108	107
	头长/mm	54	52	56	49	53	92	92	89	74	78
	尾柄长/mm	37	35	32	35	41	62	63	56	53	52
	尾柄高/mm	34	33	34	32	34	51	46	45	43	42
相对误差/ %	体质量	-0.33	0.00	-0.29	-0.36	-0.33	0.11	0.07	0.13	0.04	0.08
	体厚	-0.54	-2.06	-0.43	1.91	-2.10	-1.15	-0.96	-1.37	-0.36	-0.79
	体长	0.16	0.64	0.20	-0.17	0.38	-1.38	-1.39	-0.88	-0.67	-0.34
	体高	1.05	0.86	0.12	-0.82	0.50	-0.28	0.00	0.24	0.28	-0.74
	头长	1.73	-0.44	-0.55	-1.37	-0.97	-0.27	-0.72	0.46	-0.63	0.08
	尾柄长	-0.43	0.46	-2.79	2.22	-1.80	-0.64	-1.21	-1.50	1.55	-1.78
	尾柄高	-2.58	-2.88	-2.33	-2.77	-1.28	-1.70	-0.67	-1.70	-2.01	-2.14

5.2 潜在的误差因素

鱼体平放到称量盘上,鱼体各部位体厚不同,而体厚测量点只有一个,在鱼体最厚部位,像素校准平面在鱼体的最厚部位的 1/2 处,其他部位的体厚的 1/2 均低于该平面,当鱼体体厚增大,其他部位的体厚与测量点体厚差值增加,部分参数误差就会有所增加,这种趋势在表 2 的测量结果中有所表现,体厚的测量位置和体高的测量位置重合,校准平面始终与体高的测量平面一致,体高的相对误差随体厚增加而趋于平稳,而体长、尾柄长等的测量平面有部分低于校准平面,随着体厚增加,其相对误差趋势向负的方向增加。在本系统的鱼体大小测量范围内,鱼体各部位体厚相差较小,其误差水平符合测量要求,如果需要对体厚更

大的鱼体进行测量,就需要考虑这个潜在的误差因素对测量的影响。

6 结论

本系统在现场采集鱼体图像时,自动扫码,获取该条鱼的唯一编码信息,同时采集鱼体体厚及体质量 2 个性状参数,根据体厚确定鱼体图像的像素校准参数,采用图形识别技术自动获取鱼体外接矩形,根据测量鱼的种类确定的眼径、鳃盖、肛门、尾柄、体长、叉长的位置比例,自动计算测量模板中各竖线的位置,后期人工微调至鱼体各特征部位,得到鱼体的 11 个可量性状参数,现场单人采集每条鱼仅需 5 s 左右,实现了鱼类性状的快速、准确的测量及数据的信息化集成,基本满足

了鱼类高通量表型信息中性状数据的采集要求。采用机器视觉技术中的图像自动识别技术获取鱼体图像的外接矩形,而在鱼体上眼径、鳃盖、尾柄、体长、叉长等特征位置以及侧线鳞等可数性状的图形自动识别技术方面没有涉及,是本系统的不足之处。今后将该方面进行更深入的研究,以期提高本系统的自动测量水平。□

参考文献

- [1] 陈松林,徐文腾,刘洋. 鱼类基因组研究十年回顾与展望[J]. 水产学报,2019,43(1):1-14.
- [2] 杨少荣,吴迪靖,段德山,译. 机器视觉算法与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [3] 张志强,牛智有,赵思明. 基于机器视觉技术的淡水鱼品种识别[J]. 农业工程学报,2011(11):397-401.
- [4] 万鹏,潘海兵,龙长江,等. 基于机器视觉技术淡水鱼品种在线识别装置设计[J]. 食品与机械,2012(6):169-172.
- [5] 龚瑞. 基于计算机视觉的鱼虾识别和形态参数测量[D]. 厦门:厦门大学,2018.
- [6] 王坤殿. 淡水鱼种类识别与重量在线检测研究及装备设计[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
- [7] 涂兵,王锦萍,王思成,等. 基于背部轮廓相关系数算法的淡水鱼种类识别研究[J]. 计算机工程与应用,2016,52(16):162-166.
- [8] 谢忠红,郭小清,程碧云,等. 基于多特征的淡水鱼种类识别研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2016,37(3):71-77.
- [9] 万鹏,潘海兵,宗力,等. 基于机器视觉的鲫鱼和鲤鱼品种识别方法研究[J]. 广东农业科学,2012,17:184-187.
- [10] 顾郑平,朱敏. 基于深度学习的鱼类分类算法研究[J]. 计算机应用与软件,2018(1):200-205.
- [11] 段延娥. 基于机器视觉的鱼卵胚胎发育过程智能化识别方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2016.
- [12] 张胜茂,张衡,唐峰华,等. 计算机视觉技术在监测鱼类游泳行为中的研究进展[J]. 大连海洋大学学报,2017(4):116-123.
- [13] 胡利永,魏玉艳,郑堤,等. 基于机器视觉技术的智能投饵方法研究[J]. 热带海洋学报,2015,34(4):90-95.
- [14] 刘子毅. 基于计算机视觉的大西洋鲑鱼肉色自动分级及摄食活性测量研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2013.
- [15] 赵建. 循环水养殖游泳型鱼类精准投喂研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
- [16] 陈彩文. 基于计算机视觉的鱼群摄食行为分析研究[D]. 太原:太原理工大学,2017.
- [17] 洪锦奇. 基于机器视觉技术的分鱼算法研究[D]. 天津:天津理工大学.
- [18] 张志强,牛智有,赵思明,等. 基于机器视觉技术的淡水鱼质量分级[J]. 农业工程学报,2011,27(2):350-354.
- [19] 朱从容. 一种基于机器视觉的鱼苗自动计数方法[J]. 渔业现代化,2009(2):27-31.
- [20] 王硕,范良忠,刘鹰. 基于机器视觉的大菱鲆鱼苗计数方法研究[J]. 渔业现代化,2015,42(1):16-19.
- [21] 杨杰超,许江淳,陆万荣,等. 基于计算机视觉的大黄鱼体尺测算与体质量估测[J]. 中国农机化学报,2018,39(6):66-70.
- [22] SANCHEZ-TORRES G, CEBALLOS-ARROYO A, ROBLES-SERRANO S. Automatic measurement of fish weight and size by processing underwater hatchery images[J]. Engineering Letters, 2018(7):26.
- [23] 余心杰,吴雄飞,王建平,等. 基于机器视觉的大黄鱼形态参数快速检测方法[J]. 集成技术,2014,3(5):45-51.
- [24] 李艳君,黄康为,项基. 基于立体视觉的动态鱼体尺寸测量[J]. 农业工程学报,2020,36(21):220-226.
- [25] 房舒. 基于深度学习的鱼类表型数据测量方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.
- [26] 欧利国,王冰妍,刘必林,等. 基于计算机视觉的3种金枪鱼属鱼类形态指标自动测量研究[J]. 海洋学报,2021,43(11):105-115.
- [27] 李振波,赵远洋,杨普,等. 基于机器视觉的鱼体长度测量研究综述[J]. 农业机械学报,2021,51(增刊):207-218.
- [28] 段延娥,李道亮,李振波,等. 基于计算机视觉的水产动物视觉特征测量研究综述[J]. 农业工程学报,2015(15):9-19.
- [29] HAOM, YU H, LI D. The Measurement of fish size by machine vision-a review[R]. 9th International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA), Sep 2015, Beijing, China:15-32.
- [30] 周晓林,周高宪,马超,等. 一种阶梯形机器视觉测量校正模块:CN2019214596831[P]. 2020-06-30.
- [31] GB/T18654.3—2008 养殖鱼类种质检验 第3部分:性状测定[S].
- [32] 周晓林,胡亚东,周高宪,等. 一种鱼类性状测量装置:CN201721300619X[P]. 2018-04-17.

Design and implementation of trait measurement system for common carp (*Cyprinus carpio*) and crucian carp (*Carassius auratus*) based on machine vision

ZHOU Xiaolin, MA Chao, WANG Zhaoping, YANG Hui, WANG Yanhui, ZHANG Kaisong,
MU lin, ZHANG Qin, YANG Xingli, LI Zhixun
(Henan Academy of Fishery Sciences, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: In the process of fish breeding, fishery resources survey, and aquaculture, the length, thickness, and height of the fish body are measured. The traditional measurement method mainly adopts artificial measurement, which has the disadvantages of high labor intensity, low efficiency, and low measurement accuracy. Using machine vision technology to measure fish traits can effectively improve measurement efficiency and accuracy, and is easy to be automated. Based on machine vision technology, we designed an integrated trait measurement platform that integrated fish image collection and analysis, body weight and weight available trait measurement, and PIT scanning code, which can realize the accurate measurement of trait parameters of carp and crucian carp. Pixel calibration is required for character measurement of 2D fish images. Due to the different body thicknesses of each fish, it is difficult to achieve accurate measurement with a traditional fixed pixel calibration plane when the body thickness is large. To solve this problem, this study designed a pixel calibration method. During the collection of fish body images, the thickness of the fish body was measured by a distance sensor, and pixel calibration parameters of each fish contour surface were determined according to the thickness, so as to reduce the measurement error and improve the accuracy of the measurement of measurable traits of fish. The measurement errors of the system were compared with the manual measurement results. The results showed that the relative measurement errors of body length, body height, head length, caudal stem length, caudal stem height, and body thickness have no significantly change with the increase in body thickness. The maximum relative errors of body height and body length were 1.05% and -1.39% respectively. The maximum relative errors of head length, caudal peduncle height, caudal peduncle length, and body thickness were 1.73%, -2.79%, -2.88%, and -2.1% respectively, and the absolute errors were all less than 1 mm. The maximum relative error of body weight was -0.36%. This indicates that the system fits the requirements of fish characters measurement.

Key words: machine vision; fish; characters; measurement; phenotype data; *Cyprinus carpio*; *Carassius auratus*

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.015

基于 YOLOv5 模型的鱼类数量统计方法改进研究

覃学标¹, 黄冬梅^{1,2}, 宋巍¹, 贺琪¹, 杜艳玲¹, 袁小华¹

(1 上海海洋大学信息学院, 上海 201306;

2 上海电力大学电子与信息工程学院, 上海 200090)

摘要:在渔业养殖过程中,需要定期对养殖池内鱼的数量进行监测。针对现有方法中存在的漏检问题,提出基于 YOLOv5 模型的局部优选以及改进输出尺度的鱼类数量统计方法。通过增加检测鱼的头部、尾部等局部信息,从鱼的全身、鱼的头部、鱼的尾部三个类别中优选数量最多的类作为数量统计的结果以解决漏检的问题。同时,针对鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部在图像中显示为大尺度或中尺度目标的情况,增加了这两类目标的特征输出以提高模型对目标的检测能力,使得模型能够适用于当前条件下的数量检测。结果显示,通过本方法统计出的数量与人工计数相比误差较小,准确率为 96.3%,检测的帧速率为 111 fps。在 YOLOv5 模型的基础上,应用局部优选的策略使得统计数量提高了 37.4%,对输出尺度的改进使得统计数量提高了 4.9%。该研究可以应用于渔业养殖鱼群数量统计和鱼类检测等方面。

关键词:鱼类数量统计;目标检测;局部优选;改进输出尺度

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0118-009

在渔业养殖过程中,需要定期地对养殖池内鱼的数量进行监测^[1-2],以估算生产潜力、分析鱼的构成和统计生物量等^[3-6]。而鱼生活在水下,受成本、安全和对生物体毁坏等因素的影响^[7],依靠人工计数容易出错并会对鱼造成一定的伤害^[8-9]。利用各种远程可操控的潜水设备替代人工观测是良好的解决方案,通过这些设备可以大范围地收集鱼类在水下活动的图像^[10]。但要对这些图像中鱼的数量进行统计,仍然需要人工进行处理^[11]。近几年基于机器学习的图像处理方法快速发展^[12-15],被广泛地应用于人脸识别、行为监测和自动驾驶等领域^[16-21],如何利用机器学习的方法自动统计图像中鱼的数量是当前研究的热点之一^[22-24]。

当前基于机器学习的鱼类数量统计方法主要有回归分析法、计算黑点法和深度学习等方法,诸多学者基于这些方法开展了鱼类数量统计的研究。如 Zhang 等^[25]提出密度分级和局部回归的鱼类数量统计方法,用于检测鱼类在相互重叠时的数量。Albuquerque 等^[26]运用高斯混合的方法

检测图像中的黑点,以此计算鱼苗的数量。Hernandez 等^[27]将输入图像转为黑白图像,并通过设置阈值的方式计算其中的黑点,以此统计图像中鱼苗的数量。Lainez 等^[28]基于深度学习方法开展鱼苗数量统计研究,由于鱼苗的个体较小,为了避免漏检,对图像进行切块,在较小范围内进行数量统计。除此之外,基于深度学习的鱼类检测模型也用于鱼的数量统计。如 Yang 等^[29]使用 YOLOv3 和 Faster R-CNN 模型对海参、扇贝和海胆的图像进行检测,对输出结果进行统计可以得到相应类别的数量。Gray 等^[30]使用 Mask R-CNN 模型对无人机采集的鲸鱼图像进行检测,对检测结果进行统计可得到鲸鱼的数量。上述方法中,回归分析法和计算黑点法对图像的质量要求较高,主要应用于室内鱼苗数量的统计。在养殖环境下,受水体浑浊度和水中光衰减的影响,水下图像普遍具有模糊、对比度低的特点,难以通过回归分析或计算黑点的方法对鱼的数量进行统计。基于深度学习的鱼类数量统计方法对模糊的水下图像具有较强的适用性,可以应用于养殖环境下

收稿日期:2022-03-21

基金项目:国家自然科学基金(61972240);上海市科委部分地方高校能力建设项目(20050501900、20050500700)

作者简介:覃学标(1984—),男,博士生,研究方向:鱼类目标检测。E-mail:xbqin@shou.edu.cn

通信作者:黄冬梅(1964—),女,教授,博士生导师,研究方向:大数据、海洋信息研究。E-mail:dmhuang@shou.edu.cn

鱼类数量的统计。但在养殖条件下,鱼在水中相互遮挡,图中可观测到的具有完整轮廓的鱼类目标较少,在这样的情况下运用当前基于深度学习的模型进行数量统计存在较严重的漏检问题,影响了数量统计的准确率。

本研究提出局部优选及改进输出尺度的鱼类数量统计方法。在检测鱼的全身的基础上,增加检测鱼的头部和鱼的尾部等局部信息,优选三个类别中数量最多的类作为数量统计的结果,以减少遮挡带来的漏检问题。另外,鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部在图像中显示为大尺度目标或中尺度目标,为了提高模型对该类目标的检测能力,本方法对模型的输出尺度进行改进,增加了大尺度目标和中尺度目标的特征输出,使其更适合当前条件下的数量检测,进一步提高了数量统计的准确率。

1 数据与方法

1.1 数据

使用水下摄像机 GoPro RX0 在室外养殖池中采集数据,时间为 2020 年 5 月~6 月下午

13:00—16:00,图像分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$,帧速率 50 fps。将视频按 10 帧一张输出,从中取出一条或多条完整轮廓的鱼的图像。由于采集的数据中鱼类相互遮挡,大量的图像质量不高,需要进行清洗。清洗后得到 3 595 张图像,构成鱼类数据集(Data1)。使用标注软件 LabelImg 将图像中的鱼标注为“fish”“head”和“tail”。“fish”定义为肉眼可辨别的鱼;“head”定义为鱼嘴到鱼眼的部分;“tail”定义为鱼肛门到尾鳍夹角的部分,标注过程如图 1 所示。按 7:3 比例将数据划分为训练集 2 517 张,测试集 1 078 张。由 3 人分别对测试集中鱼的总数量进行计数,取平均数作为人工计数的结果。经过计算,测试集中人工计数的鱼的总数为 3 546 条。

Data1 为经过挑选的数据,不能代表实时条件下的数据特征,为了进一步验证模型的鲁棒性,建立了时序数据集(Data2)。从所采集的数据中随机截取 10 min 视频,按 1 s 一张输出,得到 600 张时序图像,人工计数每一张图像中鱼的数量并保存成时序数列,如图 2 所示。经过计数,时序数据集中鱼的总数为 2 287 条。



图 1 鱼类数据集

Fig. 1 Fish data set

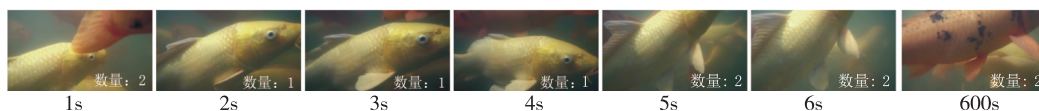


图 2 时序数据集

Fig. 2 Time series data set

1.2 方法

1.2.1 局部优选的鱼类数量统计

由于在拍摄画面中存在鱼的相互遮挡或画面截断等实际情况,具有完整轮廓的鱼类目标较少,以鱼的全身作为目标进行检测将导致漏检问题。然而,画面中鱼的头部和鱼的尾部出现的情况较

多且比较完整,将其选为目标进行检测比较理想。

基于此,本研究在检测鱼的全身的基础上,增加检测鱼的头部和鱼的尾部等局部信息,通过优选 3 个类别中数量最多的类作为数量统计的结果,达到提高数量统计准确率的目的,如图 3 所示。

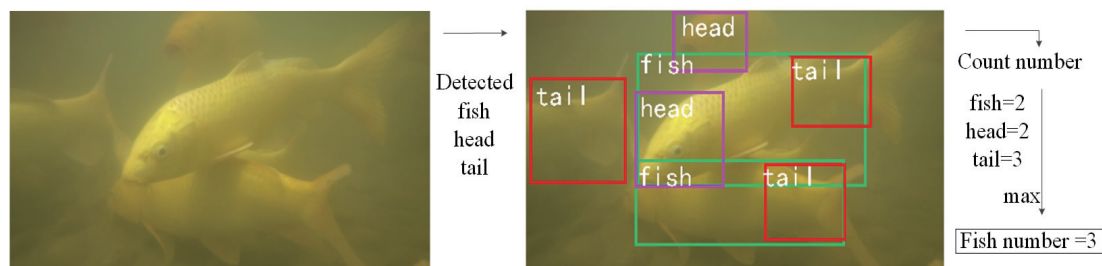


图 3 局部优选的检测过程

Fig. 3 Locally optimized detection process

将图像输入鱼类检测模型,记输出的鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部的数量分别为 N_{fish} 、 N_{head} 和 N_{tail} ,优选的数量统计结果表示为:

$$N = \max(N_{\text{fish}}, N_{\text{head}}, N_{\text{tail}}) \quad (1)$$

式中: N 表示鱼的数量。

1.2.2 改进输出尺度的鱼类检测模型

Gray 等^[26]的研究表明,YOLO 模型在鱼类的

检测上取得较好的检测结果,基于此,本研究选取 YOLOv5 模型作为鱼类检测模型开展试验。YOLOv5 模型依据网络宽度和深度不同分为 l、m 和 s 三种结构,为了能够快速完成部署,本研究在计算量较小的 YOLOv5s 模型上开展试验,其网络结构如图 4 所示。

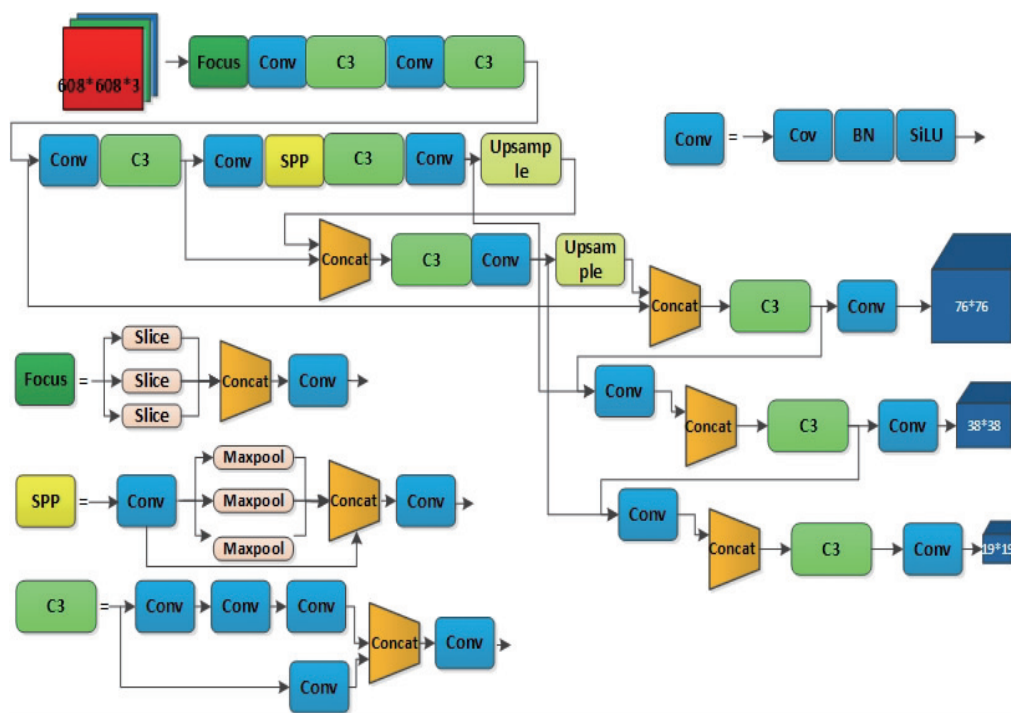


图 4 YOLOv5s 模型的网络结构

Fig. 4 The structure of YOLOv5s

将鱼类图像输入 YOLOv5s 模型,同时对鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部进行检测,优选数量最多的类作为数量统计的结果。一般情况下,养殖鱼类的体型较大,属于大尺度目标,鱼头和鱼尾则属于中尺度目标。为了提高模型对这类目标的检

测能力,本方法将 YOLOv5s 模型的输出尺度改为 76×76 、 38×38 、 38×38 、 19×19 和 19×19 。通过对模型输出尺度的改进,使其更适合当前条件下的鱼类检测,引入局部优选和改进输出尺度后的 YOLOv5s+模型如图 5 所示。

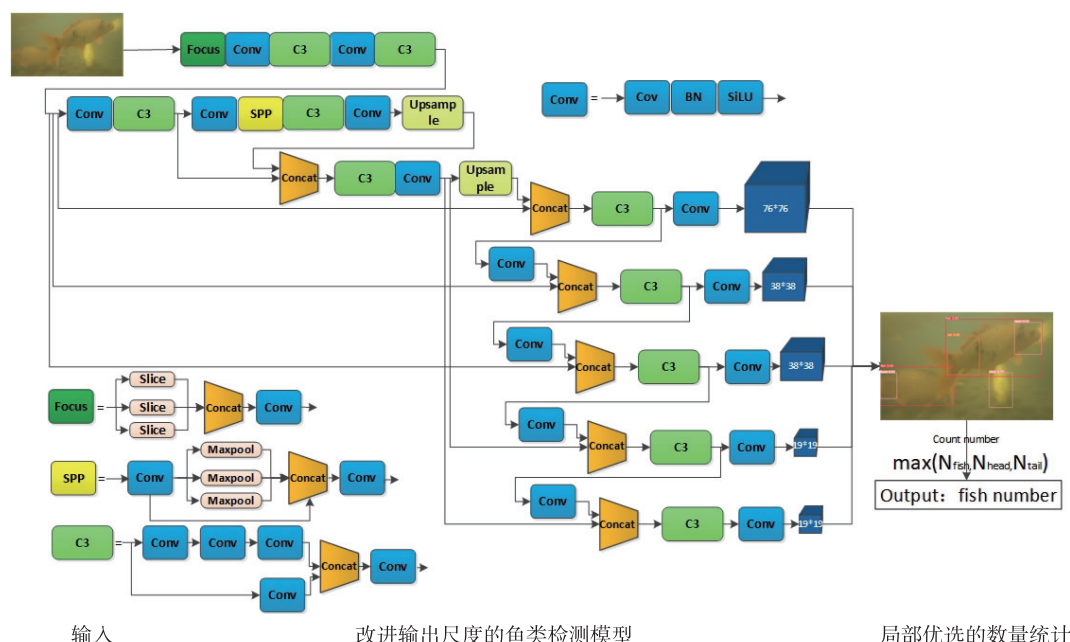


图 5 YOLOv5s+的网络结构

Fig. 5 The structure of YOLOv5s+

2 试验

2.1 试验设置

将 Data1 的训练集输入 YOLOv5s+模型进行训练,训练参数为输入尺寸 640×640 ,激活函数 Mish,损失函数 Focal loss,学习率 0.01,训练轮数 300 轮。作为对比,在 YOLOv3、Mask R-CNN 和未改进的 YOLOv5s 模型上进行试验,模型的训练参数使用原文默认值。试验环境为处理器 AMD 1950X 3.4GHz,内存 32G,显卡 GTX-1080Ti,操作系统 Ubuntu16.04,编辑环境 Python3.8。

2.2 试验结果

引入检测数量和检测时间对本方法进行评价,检测数量定义为检测概率大于 0.3 的目标个数,以人工计数的数量作为衡量的基准。检测时间定义为单帧图像的检测时间,准确率为检测数量除以人工计数的数量。

表 1 为不同方法在 Data1 的测试集和 Data2

上试验结果的对比。

表 1 试验结果的对比

Tab. 1 The experimental results of the proposed method

方法	Data1		Data2		检测时间/s
	检测数量	准确率/%	检测数量	准确率/%	
Mask R-CNN ^[30]	2485	70.1	1 630	71.3	2
YOLOv3 ^[29]	2938	82.9	1 821	79.6	0.16
YOLOv5s	3046	85.9	1 864	81.5	0.007
YOLOv5s+	3414	96.3	2 035	88.9	0.009
人工计数	3546	/	2 287	/	/

从表 1 中可以看出,本方法 YOLOv5s+获得较好的数量统计结果。在 Data1 上的检测数量与人工计数误差较小,准确率为 96.3%;在 Data2 上检测的准确率为 88.9%,检测时间为 0.009s,帧速率为 111 fps。对比其他方法,本方法在 Data1 上的准确率比未改进的 YOLOv5s 高 10.4%,比 YOLOv3 高 13.4%,比 Mask R-CNN 模型高

26.2%。说明本方法可以较准确地对鱼类数量进行检测,在速度方面可以满足实时性的检测需求。

3 讨论

3.1 局部优选的性能分析

引入检测数量和提升幅度对局部优选的性能进行评估。提升幅度 δ 的计算方法为

$$\delta = \frac{\Delta}{C} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Δ 为增量; C 为基准值。

表 2 为仅以鱼的全身作为目标进行检测与局部优选检测结果的对比,试验模型为 YOLOv5s+。可以看出,仅以鱼的全身作为目标进行检测,Data1 和 Data2 的检测数量与人工计数的结果相差较大,出现较严重的漏检问题。局部优选的策略通过优选三个类别中数量最多的类作为数量统计的结果,其检测结果接近人工计数的结果,比仅以鱼的全身作为目标进行检测的结果高 37.4% 和 30.7%,说明局部优选的策略有效地提高了模型的检测数量。

表 2 仅以鱼的全身作为目标进行检测与局部优选检测结果的对比

Tab. 2 Comparison of overall detection and local optimization detection results

检测方法	Data1		Data2	
	检测数量	$\delta/\%$	检测数量	$\delta/\%$
仅以鱼的全身作为目标进行检测	2 485	/	1 557	/
局部优选	3 414	37.4	2 035	30.7
人工计数	3 546	/	2 287	/

图 6 为从 Data1 中选择样例图像对局部优选的结果进行展示。从图 6 中可以看出,在不同条件下,鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部都有数量占优的情况,通过优选数量最多的类作为数量统计的结果,可以提高检测的准确率。图 6b 和图 6c 展示了仅以鱼的全身作为目标进行检测所出现的漏检情况。图 6b 局部优选的检测结果为 4 条,而以鱼的全身作为目标进行检测的结果仅为 1 条,少了 3 条;图 6c 局部优选的检测结果为 3 条,而以鱼的全身作为目标进行检测的结果为 2 条,少了 1 条。说明局部优选的策略有效地提高了模型的检测数量。

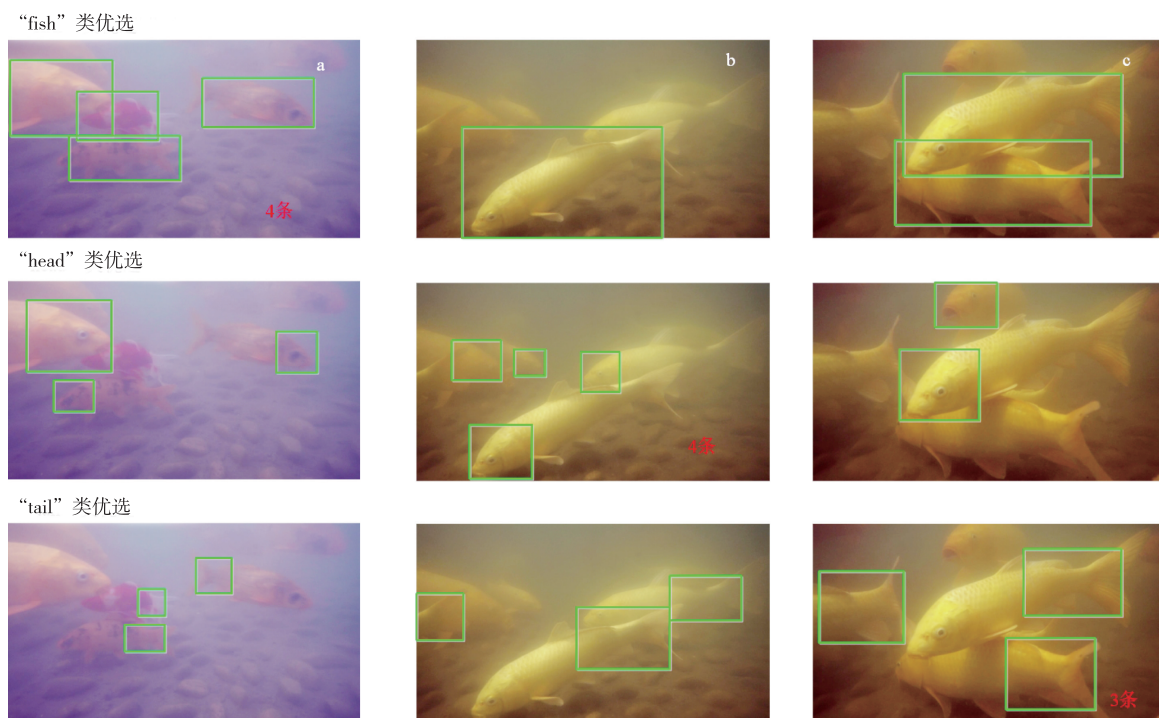


图 6 鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部检测结果(红色数字为优选的结果)

Fig. 6 The situation in which the whole body, head and tail of a fish are dominant(The red number is the preferred result)

3.2 改进输出尺度的性能分析

以下对输出尺度改进前后的性能进行分析。引入检测数量和检测精度 $AP^{[31]}$ 进行评价, AP 计算方法为

$$R = \frac{T}{T + N} \quad (3)$$

$$P = \frac{T}{T + F} \quad (4)$$

$$AP = \int_0^1 P(R) dR \quad (5)$$

式中: R 为召回率, P 为准确率, T 为将正样本检测为正样本的数量, N 为将正样本检测为负样本的数量, F 为将负样本检测为正样本的数量。

选择 $AP50$ 作为检测精度衡量依据, 将预测框与真实框交并比大于 50% 的结果定为正确结果。

表 3 为输出尺度改进前后在 Data1 上检测结果的对比。从表中可以看出, 对比未改动的 YOLOv5s 模型, 改进后的 YOLOv5s+ 模型在鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部三个类别中 $AP50$ 分别提高了 2.2%、1.9% 和 1.9%, 检测数量分别提高了 12.7%、3.0% 和 9.4%, 局部优选的检测数量提高了 4.9%。在检测时间上, 由于增加了输出的尺度, 检测时间增长 0.002 s。说明本方法对 YOLOv5s 模型输出尺度的改进可以进一步提高检测精度和检测数量, 对局部优选的检测结果也产生了影响。

表 3 输出尺度改进前后检测结果的对比

Tab. 3 Comparison of test results before and after improvement

类别	模型	AP50	AP50 增量	检测 数量	$\delta/\%$	检测 时间/s
Fish	YOLOv5s	85.5	/	2 204	/	/
	YOLOv5s+	87.7	2.2	2 485	12.7	/
Head	YOLOv5s	86.3	/	2 917	/	/
	YOLOv5s+	88.2	1.9	3 006	3.0	/
Tail	YOLOv5s	79.5	/	2 234	/	/
	YOLOv5s+	81.4	1.9	2 445	9.4	/
局部优选	YOLOv5s	/	/	3 253	/	0.007
	YOLOv5s+	/	/	3 414	4.9	0.009

表 4 为输出尺度改进前后在 Data2 上检测结果的对比。由于 Data2 为未标注的时序数据, 仅对其改进前后的检测数量进行对比。从表 4 中可

以看出, 对比未改动前, 改进后的 YOLOv5s+ 模型在鱼的全身、鱼的头部和鱼的尾部三个类别中的检测数量分别提高了 52.3%、9.0% 和 16.3%, 局部优选的检测数量提高了 15.4%。Data2 为未经挑选的数据, 鱼类相互遮挡, 图像质量较差, 可以代表实时条件下的数据特征。在输出尺度改进后的模型上, 其检测结果的提升幅度比 Data1 的提升幅度更加明显, 说明对输出尺度的改进在实时数据的检测中发挥了更大的作用。

表 4 输出尺度改进前后检测结果的对比

Tab. 4 Comparison of test results before and after improvement

类别	模型	检测数量	$\delta/\%$
Fish	YOLOv5s	1 022	/
	YOLOv5s+	1 557	52.3
Head	YOLOv5s	1 529	/
	YOLOv5s+	1 667	9.0
Tail	YOLOv5s	1 109	/
	YOLOv5s+	1 290	16.3
局部优选	YOLOv5s	1 762	/
	YOLOv5s+	2 035	15.4

3.3 应用验证

由于 Data2 为连续的时序数据并已人工计数每一张图像中鱼的数量, 在 Data2 上开展本方法的应用验证。为了更直观地将本方法机器统计的结果与人工计数的结果进行对比, 以 10 为窗口单位, 输出两者的移动平均线, 如图 7 所示。可以看出, 两者之间未表现出较大的背离。说明本方法的检测结果与人工计数的结果相近, 在实时鱼类数量统计上具有实用性。

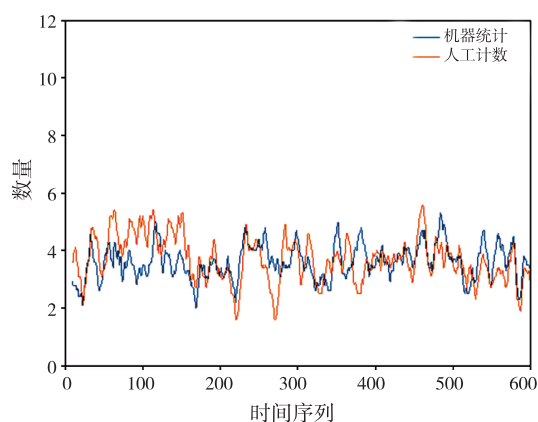


图 7 移动平均线对比

Fig. 7 Comparison of the rolling mean

4 结论

本研究提出局部优选及改进输出尺度的鱼类数量统计方法,可以准确地对图像中鱼的数量进行统计,并在速度上满足实时性的统计需求。方法所采用的局部优选策略使得统计数量提高了 37.4%,对输出尺度的改进使得统计数量提高了 4.9%,可以应用于渔业养殖实时鱼类数量统计的生产中。□

参考文献

- [1] COLAS F, TARDIVEL M, PERCHOC J, et al. The ZooCAM, a new in-flow imaging system for fast onboard counting, sizing and classification of fish eggs and metazooplankton [J]. *Progress In Oceanography*, 2017, 166(1): 54-65.
- [2] ANDRADI-BROWN D A, CONSUELO M S, EXTON D A, et al. Assessing caribbean shallow and mesophotic reef fish communities using baited-remote underwater video (BRUV) and diver-operated oideo (DOV) survey techniques [J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(12): 1-23.
- [3] UNSWORTH R, PETERS J R, MCCLOSKEY R M, et al. Optimising stereo baited underwater video for sampling fish and invertebrates in temperate coastal habitats [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2014, 150(1): 281-287.
- [4] STOBART B, GARCIAHARTON J A, ESPEJO C, et al. A baited underwater video technique to assess shallow-water mediterranean fish assemblages: methodological evaluation [J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2007, 345(2): 158-174.
- [5] SCHMID K, REISFILHO J A, HARVEY E, et al. Baited remote underwater video as a promising nondestructive tool to assess fish assemblages in clearwater Amazonian rivers: testing the effect of bait and habitat type [J]. *Hydrobiologia*, 2017, 784(1): 93-109.
- [6] KONOVALOV D A, SALEH A, BRADLEY M, et al. Underwater fish detection with weak multi-domain supervision [C]. *International Joint Conference on Neural Networks*. Budapest: IEEE Computer Society, 2019: 1-8.
- [7] GRAY P C, BIERLICH K C, MANTELL S A, et al. Drones and convolutional neural networks facilitate automated and accurate cetacean species identification and photogrammetry [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2019, 10(9): 1490-1500.
- [8] GRAY P C, FLEISHMAN A B, KLEIN D J, et al. A convolutional neural network for detecting sea turtles in drone imagery [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 10(3): 345-355.
- [9] 范松伟, 林翔瑜, 周平. 基于改进的卷积神经网络的虾苗自动计数研究 [J]. *渔业现代化*, 2020, 47(6): 35-41.
- [10] PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2017, 26(4): 1579-1594.
- [11] SEBASTIEN V, DAVID M, MARC C, et al. A Deep learning method for accurate and fast identification of coral reef fishes in underwater images [J]. *Ecological Informatics*, 2018, 48(1): 238-244.
- [12] 宋自根, 张佳彬, 覃学标, 等. 一种基于 Mask-RCNN 图像分割的头足类动物角质色素沉积量化方法 [J]. *渔业现代化*, 2021, 48(5): 70-78.
- [13] LIN T Y, PIOTR DOLLAR, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C]. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Honolulu: IEEE Computer Society, 2017: 936-944.
- [14] TIAN Z, SHEN C, H CHEN, et al. FCOS: fully convolutional one-stage object detection [C]. *International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Seoul: IEEE Computer Society, 2019: 9626-9635.
- [15] TAN M, PANG R, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection [C]. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Seattle: IEEE Computer Society, 2020: 10778-10787.
- [16] 袁红春, 王丹, 陈冠奇, 等. 基于 LightGBM 模型的鱼类异常行为检测 [J]. *渔业现代化*, 2020, 47(1): 47-55.
- [17] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation [C]. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. IEEE Computer Society, 2017: 2481-2495.
- [18] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs [J]. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, 40(4): 834-848.
- [19] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object Detection and Semantic Segmentation [C]. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Columbus: IEEE Computer Society, 2014: 580-587.
- [20] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN [C]. *International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Venice: IEEE Computer Society, 2017: 2980-2988.
- [21] 刘虎, 龚宇, 张彪, 等. 基于 EDEM 的鱼苗分选机设计与工作参数优化 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 114-121.
- [22] 袁红春, 张硕. 基于 Faster R-CNN 和图像增强的水下鱼类目标检测方法 [J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(4): 612-619.
- [23] 孙龙清, 刘婷, 陈帅华, 等. 多目标鱼体对象提议检测算法研究 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 260-267.
- [24] 赵德安, 刘晓洋, 孙月平, 等. 基于机器视觉的水下河蟹识别方法 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 151-158.
- [25] ZHANG L, LI W, LIU C, et al. Automatic fish counting method using image density grading and local regression [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 179: 1-10.
- [26] ALBUQUERQUE P, GARCIA V, OLIVEIRA A, et al. Automatic live fingerlings counting using computer vision [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 167(1): 1-9.

- [27] HERNANDEZ J M, INZUNZA G E, GARCIA G, et al. Development and implementation of a fish counter by using an embedded system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145(1):53-62.
- [28] LAINEZ S, GONZALES D B. Automated fingerlings counting using convolutional neural network[C]. International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Singapore: IEEE Computer Society, 2019:67-72.
- [29] YANG H B, LIU P, HU Y Z, et al. Research on underwater object recognition based on YOLOv3 [J]. Microsystem technologies, 2021, 27(4):1837-1844.
- [30] GRAY P C, BIERLICH K C, MANTELL S A, et al. Drones and convolutional neural networks facilitate automated and accurate cetacean species identification and photogrammetry[J]. Methods Ecol Evol, 2019, 10(9):1490-1500.
- [31] EVERINGHAM M, GOOL L V, WILLIAMS C, et al. The pascal visual object classes (VOC) challenge[J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 88(2):303-338.

Improvement of fish quantity statistics method based on YOLOv5 model

QIN Xuebiao¹, HUANG Dongmei^{1,2}, SONG Wei¹, HE Qi¹, DU Yanling¹, YUAN Xiaohua¹

(1 College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2 College of Electronics and Information Engineering,
Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: During fish farming, the number of fish in the ponds needs to be monitored regularly. Aiming at the problem of missing detection in the existing methods, this paper proposed a local optimization method based on the YOLOv5s model and a fish quantity statistics method with an improved output scale. By adding local information such as the head and tail of the detected fish, the category with the largest number was selected from the three categories of the whole body, head, and tail of the fish as the result of quantitative statistics to solve the problem of missing detection. At the same time, for the case that the whole body, head, and tail of fish were displayed as large-scale or mesoscale targets in the image, the feature output of these two types of targets was increased to improve the target detection ability of the model, so that the model can be suitable for quantitative detection under the current conditions. The results showed that compared with manual counting, the error of the quantity counted by this method was small, the accuracy was 96.3%, and the detection frame rate was 111 FPS. Based on the YOLOv5 model, the application of local optimization strategy increased the number of statistics by 37.4%, and the improvement of output scale increases the number of statistics by 4.9%. The study can be applied to the statistics of fish stocks in fishery and fish detection.

Key words: fish quantity statistics; object detection; local optimization; improved output scale

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2022.06.016

超声辅助酶法提取罗非鱼皮胶原蛋白及其溶解特性

李家柔¹,倪剑波²,何静怡¹,许惠雅¹,井璐楠¹,施文正^{1,2}

(1 上海海洋大学食品学院,上海 201306;

2 平太荣远洋渔业集团,浙江舟山 316100;

3 国家淡水水产品加工技术研发分中心(上海),上海 201306)

摘要:以罗非鱼皮为原料,探究了超声辅助酶法提取罗非鱼皮胶原蛋白的最佳工艺及其溶解特性。采用超声功率、加酶量、超声时间作为单因素试验自变量,并进行响应面优化,求得使胶原蛋白得率最高的提取条件。将罗非鱼皮超声辅助酶法所得胶原蛋白(Ultrasonic pepsin-soluble collagen,UPSC)和常规酶法所得胶原蛋白(Pepsin-soluble collagen,PSC)进行蛋白得率、紫外光谱及溶解特性分析比较。结果显示:最优提取工艺为超声功率165 W、超声时间26 min、加酶量1.67%,此条件下UPSC得率(62.26%)显著高于PSC(29.02%)。紫外光谱分析得到二者的最大吸收峰均在230 nm而不是280 nm处,符合I型胶原蛋白特征。在不同pH条件下,UPSC的相对溶解度几乎均高于PSC。研究表明:超声辅助酶法是一种高效、环保、简便的提取罗非鱼皮胶原蛋白的方法,适合工业化生产。本研究不但提供了超声辅助酶法提取罗非鱼皮胶原蛋白的最佳工艺,而且所得胶原蛋白得率高、相对溶解度较好,为其在食品加工方面的应用提供了依据。

关键词:罗非鱼皮;超声辅助酶法优化;胶原蛋白;得率;相对溶解度

中图分类号:TS254.9

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2022)06-0127-008

人体内富含胶原蛋白^[1],以起到支撑、保护组织的作用。外源性胶原蛋白大多来自陆生的哺乳动物^[2],目前主要应用于食品工业、生物医药、化工领域等^[3]。然而,一些疾病如海绵状脑病(疯牛病)的爆发和宗教限制等因素限制了哺乳动物胶原蛋白的应用^[4]。与哺乳动物胶原蛋白相比,鱼类胶原蛋白有相似的氨基酸组成及生物相容性^[5],且无传播疾病的风险、无宗教限制、吸收能力更强,引起了较多学者的关注^[6-7]。据报道,鱼类副产品胶原蛋白含量丰富,特别是鱼皮中含有约70%的I型胶原蛋白^[8]。

罗非鱼是中国重要的经济养殖鱼类之一,生长快、富含蛋白质^[9]。2020年,中国罗非鱼产量和罗非鱼加工品产量分别为165万t和55万t^[10],但罗非鱼加工品形式单一,主要为整鱼冷冻和冷冻鱼片^[9],副产物如鱼皮、鱼鳞、鱼骨等未得到有效利用,造成资源浪费和环境污染。罗非鱼皮中胶原蛋白质量分数为20.65%,约占其粗蛋白的62.30%^[11],是良好的胶原蛋白来源。

超声作为一种绿色加工技术,不但广泛应用于食品加工的各个环节,也被用来提取天然活性产物^[12]。利用超声技术不但可以在较短的时间内完成提取过程,而且能降低溶剂消耗,得到更高纯度的产品^[13]。邹焱等^[14]利用超声辅助胃蛋白酶,以乙酸为溶剂提取中华鳖裙边胶原蛋白,得率高达74.5%,且与酶提取法所得胶原蛋白相比,热稳定性显著提高;李根等^[15]使用超声辅助酶法提取鲢皮胶原蛋白,得率(37.36%)是酶法提取的两倍多,且发现超声处理改变了鲢皮表面结构,使胶原蛋白更易溶出。目前尚未有研究给出超声辅助酶法提取罗非鱼皮胶原蛋白的最佳工艺,使其在工业化的提取应用上受限。常规酶法提取鱼类胶原蛋白得率约为10%~30%,效率低下且耗时较长^[15-18]。

本研究采用超声辅助胃蛋白酶法提取罗非鱼皮胶原蛋白,进行响应面优化得到使胶原蛋白得率较高的最佳提取工艺,使罗非鱼皮胶原蛋白得到高效充分的利用,为罗非鱼皮胶原蛋白的工业

收稿日期:2022-05-21

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2019YFD0902003)

作者简介:李家柔(1997—),女,硕士研究生,研究方向:水产品加工与贮藏。E-mail:LiJiarou1997@163.com

通信作者:施文正(1975—),男,博士,教授,研究方向:水产品加工与食品风味。wzshi@shou.edu.cn

化提取以及在食品中的开发利用提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

罗非鱼购于上海市浦东新区南汇新城镇水产店,取鱼皮去鳞除杂后,于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻备用;氢氧化钠、氯化钠、无水碳酸钠、正丁醇、五水合硫酸铜等均为分析纯,胃蛋白酶(3000 U/g),国药集团化学试剂有限公司;乙酸、酒石酸钾钠均为分析纯,牛血清白蛋白(生物技术级,96%),上海迈瑞尔化学技术有限公司;福林酚试剂,合肥博美生物科技有限责任公司。

1.2 仪器与设备

SCIENTZ-10N 型冷冻干燥机、SB-400DTY 型超声多频清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;UV-1800PC 型紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;H-2050R 型高速冷冻离心机,长沙湘仪有限公司;HH-6 型数显恒温搅拌水浴锅,常州鸿泽实验科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料前处理

去除杂蛋白:用 NaOH 溶液(0.1 mol/L)浸泡鱼皮 24 h($m:V=1:20$),间隔 12 h 重新更换溶液以达到最佳的去除效果,之后用蒸馏水冲洗备用。

脱脂:用 10% 正丁醇溶液进行浸泡,其他条件同上述步骤。

1.3.2 罗非鱼皮胶原蛋白的提取

超声辅助酶法提取:将经前处理后的罗非鱼皮剪碎($0.5\times 0.5\text{ cm}^2$),每组鱼皮用量为 2 g,加入 0.5 mol/L 乙酸溶液($m:V=1:40$),再加入一定量的胃蛋白酶,酶解液 pH 为 2 左右,在 25 kHz 频率下用一定功率超声处理一定时间, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 搅拌 18 h,离心($10\ 000\times g$,离心半径 $r=10\text{ cm}$) 30 min 后,收集上清液,在沉淀中再次加入 0.5 mol/L 乙酸溶液($m:V=1:10$)及胃蛋白酶,进行超声、搅拌、离心(条件同上)。收集上清液,加入 NaCl 使其最终浓度为 0.9 mol/L , $10\ 000\times g$ (离心半径 $r=10\text{ cm}$)离心 30 min 后,将沉淀溶于乙酸溶液进行透析,于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻过夜,真空冷冻干燥后即可得到胶原蛋白粉末。

常规酶法提取:取剪碎的罗非鱼皮 2 g,加入

0.5 mol/L 乙酸溶液($m:V=1:40$),再加入 1.67% 胃蛋白酶,酶解液 pH 为 2 左右, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 磁力搅拌 48 h^[19],离心($10\ 000\times g$,离心半径 $r=10\text{ cm}$) 30 min 后,收集上清液,在沉淀中再次加入 0.5 mol/L 乙酸溶液($m:V=1:10$)及 1.67% 胃蛋白酶,进行搅拌、离心(条件同上)。收集上清液,加入 NaCl 使其最终浓度为 0.9 mol/L , $10\ 000\times g$ (离心半径 $r=10\text{ cm}$)离心 30 min 后,将沉淀溶于乙酸溶液进行透析,于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻过夜,真空冷冻干燥后即可得到胶原蛋白粉末。

胶原蛋白得率由下式计算:

$$y = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: y 为胶原蛋白得率; m_1 为冷冻干燥后胶原蛋白粉末质量/g; m_2 为鱼皮质量/g。

冻干后胶原蛋白粉中的水分含量依据 GB 5009.3—2016^[20]进行测定,结果表示为 $\bar{x} \pm s$ 。

1.3.3 单因素试验

在前期试验基础上,设定提取溶剂为乙酸(5 mol/L)、料液比为 1:40、超声频率为 25 kHz。以胶原蛋白得率为指标,探究超声功率(100、150、200、250、300 W)、超声时间(15、20、25、30、35 min)、加酶量(0.75%、1.00%、1.25%、1.50%、1.75%)等因素的影响,每个水平进行 3 次平行试验,取均值。

1.3.4 响应面优化试验

以胶原蛋白得率为响应值,设计响应面试验,各因素与水平如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素与水平
Tab. 1 Factors and levels used for Box-Behnken design

因素	水平		
	-1	0	1
X_1 超声时间/min	20	25	30
X_2 超声功率/W	100	150	200
X_3 酶添加量/%	1.25	1.50	1.75

1.3.5 紫外可见光谱分析

参考邢瀚文等^[21]的方法,以乙酸溶液(0.5 mol/L)为溶剂,配制 1 mg/mL 的胶原蛋白溶液,在 $10\ 000\times g$ (离心半径 $r=10\text{ cm}$)的条件下离心 10 min,取上清液,紫外扫描范围为 200~400 nm。

1.3.6 溶解度分析

参考 Chen 等^[22]的方法并稍做改动,将胶原

蛋白样品用乙酸溶液(0.5 mol/L)溶解,使其质量浓度为3 mg/mL,取8 mL样品溶液,分别调pH为1、2、3、4、5、6、7、8、9、10,室温下搅拌30 min后,加入蒸馏水(调至相应的pH)使其达到10 mL。室温下再次搅拌30 min后,于4℃在10 000×g(离心半径 $r=10$ cm)条件下离心30 min,上清液蛋白浓度通过Lowry法^[23]进行测定。蛋白相对溶解度(%)由每个pH条件下蛋白浓度与最高蛋白浓度比值计算。

1.3.7 数据处理

使用IBM SPSS Statistics 23.0进行单因素ANOVA检验、显著性分析($P<0.05$)及Duncan多重比较;使用Design-Expert 10进行响应面优化;使用Origin 2018作图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 超声功率对胶原蛋白得率的影响

由图1得,胶原蛋白得率在超声功率为150 W时达到最大,之后随着超声功率的增大,胶原蛋白得率逐渐减小。

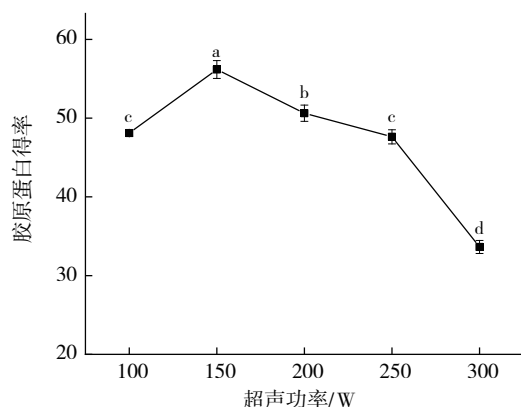


图1 超声功率对胶原蛋白得率的影响

Fig. 1 Effect of ultrasonic power on the yield of collagen

一定的功率范围内,超声产生的空化效应和机械效应可修饰酶的结构,暴露其活性位点,提高酶的活力^[24]。超声作用还可改变底物特性,使胶原蛋白更易溶解于提取溶剂中^[25],为胶原蛋白的提取提供最佳条件。超声功率过大时,会产生显著的热效应,降低酶的活性甚至使其失活,影响胶原蛋白得率。水产胶原热变性温度较低,温度过高也会破坏胶原蛋白的结构,从而降低胶原蛋白

得率。所以,选取最佳超声功率为150 W。

2.1.2 超声时间对胶原蛋白得率的影响

由图2可以看出,胶原蛋白得率随超声时间延长呈现先增高后降低的趋势,在超声时间为25 min时提取率最高,为49.53%。

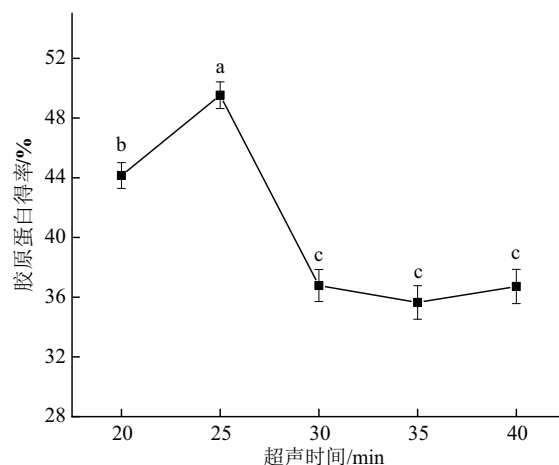


图2 超声时间对胶原蛋白得率的影响

Fig. 2 Effect of ultrasonic time on the yield of collagen

之后,胶原蛋白得率随超声时间的增长而明显降低($P<0.05$),说明超声作用时间对胶原蛋白的得率有较大的影响。适当的超声作用时间可使酶与底物充分反应,促进胶原蛋白的溶出。长时间的超声作用会产生较高能量,使环境介质的温度变高,对酶的活性以及胶原蛋白的分子结构造成一定影响^[26],使胶原蛋白得率下降。因此,要严格控制超声时间,选取25 min为最佳条件。

2.1.3 加酶量对胶原蛋白得率的影响

由图3可知,加酶量在0.75%~1.50%范围内,胶原蛋白得率随加酶量的增大而提高,在加酶量为1.5%时达到最大,继续增大加酶量胶原蛋白得率开始降低。在加酶量为1.0%~1.5%范围内,胶原蛋白得率与加酶量几乎呈现线性关系,这是由于,底物充足的条件下,酶促反应速率受酶浓度影响,适当增添酶量可以使底物与酶尽可能反应,进而提高胶原蛋白得率。继续增大加酶量时,底物与酶完全反应,酶浓度过高反而会产生抑制作用,导致胶原蛋白降解^[14,27]。鉴于此,最适加酶量定为1.5%。

由国标法测得冻干后胶原蛋白粉中的水分含量为:UPSC(4.52%±0.10%),PSC(4.38%±0.06%),不同批次的胶原蛋白粉水分含量相同。

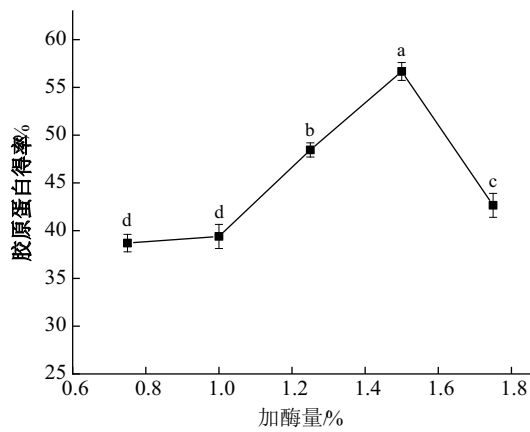


图3 加酶量对胶原蛋白得率的影响

Fig.3 Effect of enzyme dosage on the yield of collagen

2.2 响应面试验结果与分析

2.2.1 数学模型的建立与显著性分析

响应面试验设计与结果如表2所示,通过对其回归拟合,得到该模型的回归方程为 $Y(\%) = 60.88 + 3.60X_1 + 2.86X_2 + 2.49X_3 - 0.10X_1X_2 + 0.55X_1X_3 + 1.38X_2X_3 - 8.43X_1^2 - 5.35X_2^2 - 2.80X_3^2$,表3为回归模型的显著性分析。模型 P 值小于0.0001,失拟误差 P 值为0.4216,说明此模型可用于预测响应值^[28]。模型 R^2 值为0.9896,表明模型拟合度高^[29], R_{Adj}^2 为0.9762,说明此模型适用于97.62%的变化。 F 值的大小可表明不同因素对胶原蛋白得率的影响程度^[30],

由表可知超声时间的影响最大,超声功率次之,加酶量影响最小。 X_1 、 X_2 、 X_3 及 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 的 P 值均小于0.01,对胶原蛋白得率的影响极显著, X_2X_3 的 P 值小于0.05,对结果的影响显著。

表2 响应面试验设计与结果

Tab.2 Box-Behnken design matrix with experimental results

试验号	X_1 超声时间	X_2 超声功率	X_3 加酶量	胶原蛋白 得率/%
1	0	0	0	62.0
2	1	0	-1	50.3
3	-1	-1	0	41.2
4	-1	1	0	46.8
5	0	-1	-1	49.0
6	-1	0	-1	43.2
7	0	1	-1	52.3
8	0	1	1	59.2
9	0	0	0	61.0
10	1	0	1	57.2
11	1	1	0	52.8
12	-1	0	1	47.9
13	0	0	0	61.6
14	0	0	0	59.5
15	1	-1	0	47.6
16	0	0	0	60.3
17	0	-1	1	50.4

表3 回归模型方差分析

Tab.3 Analysis of variance for the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	722.35	9	80.26	73.92	<0.0001 **
X_1 超声时间	103.68	1	103.68	95.49	<0.0001 **
X_2 超声功率	65.55	1	65.55	60.37	0.0001 **
X_3 加酶量	49.50	1	49.50	45.59	0.0003 **
X_1X_2	0.040	1	0.040	0.037	0.8532
X_1X_3	1.21	1	1.21	1.11	0.3262
X_2X_3	7.56	1	7.56	6.97	0.0335 *
X_1^2	299.04	1	299.04	275.42	<0.0001 **
X_2^2	120.63	1	120.63	111.10	<0.0001 **
X_3^2	33.07	1	33.07	30.46	0.0009 **
残差	7.60	1	1.09		
失拟误差	3.57	3	1.19	1.18	0.4216
纯误差	4.03	4	1.01		
总和	729.95	16			
$R^2 = 0.9896$		$R_{Adj}^2 = 0.9762$			

注: $P < 0.05$, 差异显著, * ; $P < 0.01$, 差异极显著, **

2.2.2 因素间交互作用影响结果

由图4可观察到,超声功率和加酶量(X_2, X_3)的等高线图为椭圆形,说明其交互作用显著^[31]。此模型下,使蛋白得率较高的条件为:超声时间26.015 min、超声功率164.804 W、加酶量1.67%,胶原蛋白得率为62.37%。为方便操作,调整提取

条件为超声时间26 min、超声功率165 W、加酶量1.67%,验证试验所得胶原蛋白得率为62.26%,接近模型计算的理论值。常规酶法所提的胶原蛋白得率仅为29.02%,超声辅助酶法不但缩短了提取时间,而且显著提高了蛋白得率,为罗非鱼皮胶原蛋白的高效提取提供了依据。

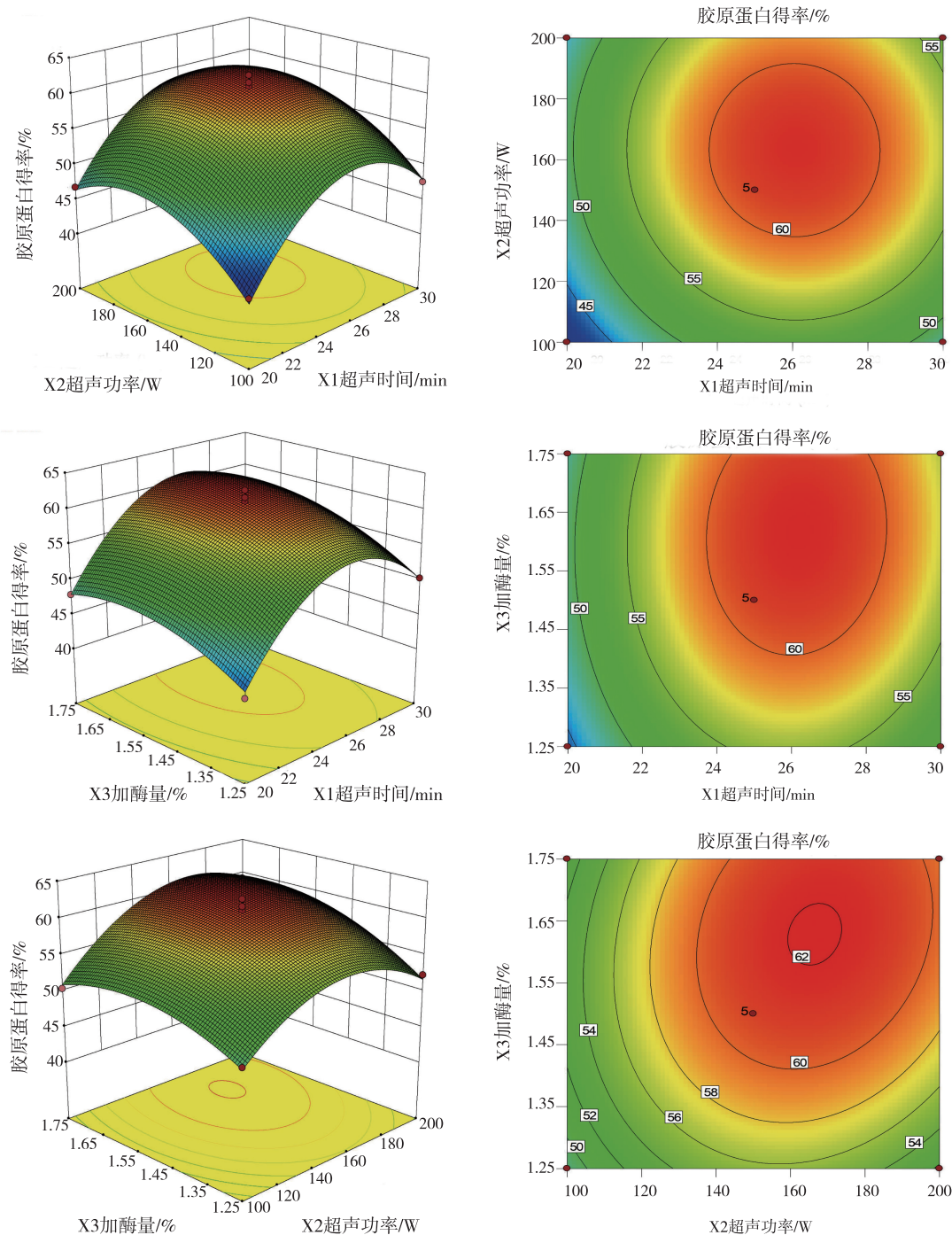


图4 不同因素间交互作用的响应面和等高线图

Fig. 4 Response surface and contour map of interactive effect between different factors

2.2.3 紫外光谱分析

在紫外光谱中,由于 $-C=O$ 、 $-COOH$ 、 $-CONH_2$ 等基团的存在,胶原蛋白在210~240 nm之间存在特征吸收峰^[32]。由图5可知,UPSC和PSC都在230 nm处有最大吸收峰,与I型胶原蛋白特征一致,且与鲑皮胶原蛋白^[15]以及中华鳖胶原蛋白^[33]紫外吸收峰相似。UPSC和PSC在280 nm处无明显的吸收峰,说明其几乎不含芳香族氨基酸。以上结果表明,超声辅助酶法提取到的胶原蛋白为典型的I型胶原蛋白。

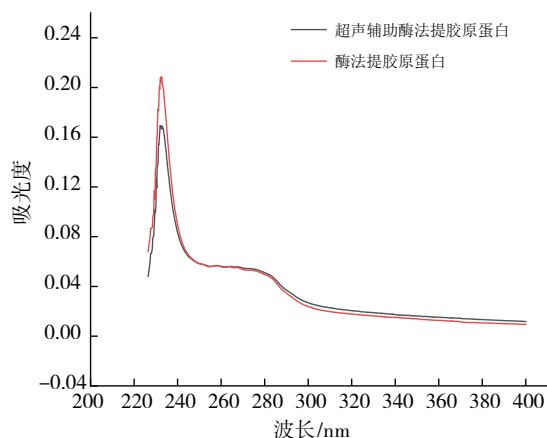


图5 罗非鱼皮胶原蛋白紫外光谱分析

Fig. 5 Ultraviolet spectrum spectra of UPSC and PSC made from tilapia skin

2.2.4 溶解度分析

图6显示了UPSC和PSC在不同pH条件下的相对溶解度,可以看出二者均在酸性条件下有较高的溶解度。

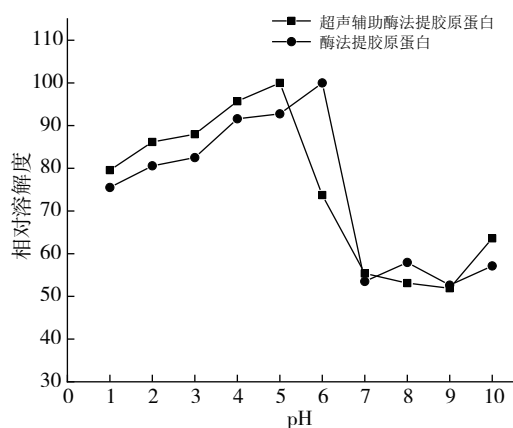


图6 不同pH下胶原蛋白相对溶解度

Fig. 6 Relative solubility of extracted UPSC and PSC of Tilapia skin in pH

UPSC和PSC的最大溶解度分别在pH=5及pH=6处,随着pH继续增大,相对溶解度显著降低($P<0.05$),均在pH=7左右达到最小,而后又在碱性条件下随pH增加有所上升。这是由于在胶原蛋白等电点($pI=7$)处,蛋白分子净电荷为0,疏水作用力增强,使胶原蛋白相对溶解度下降;当pH高于或低于等电点时,蛋白分子间的电荷斥力会增大蛋白的相对溶解度。同时可以观察到,在酸性pH范围内,UPSC的相对溶解度均高于PSC,这与Zou等^[33]研究结果相似,他们发现经超声处理的酸溶性蛋白比常规酸法提取所得的胶原蛋白溶解度高,这为胶原蛋白在食品工业的应用提供了借鉴。

3 结论

本研究对超声辅助酶法提取罗非鱼皮胶原蛋白的提取条件进行了响应面优化,最优提取工艺为:超声功率165 W、超声时间26 min、加酶量1.67%,此工艺下胶原蛋白得率高达62.26%,约为常规酶法提取得率(29.02%)的两倍。此法高效简便,既缩短了提取时间,又显著提高了罗非鱼皮胶原蛋白得率。紫外光谱扫描结果表明,UPSC在230 nm处有最大吸收峰,为典型的I型胶原蛋白。溶解性试验表明,在酸性条件下,与PSC相比,UPSC具有更高的相对溶解度。因此,超声辅助酶法是一种简便高效的提取方法,适合罗非鱼皮胶原蛋白的工业化生产。未来可进一步探讨超声辅助对于罗非鱼皮胶原蛋白各项物理化学性质的影响及变化机制,使罗非鱼皮胶原蛋白得到差异化利用。

参考文献

- [1] JAFARI H, LISTA A, SIEKAPEN MM, et al. Fish collagen: extraction, characterization, and applications for biomaterials engineering[J]. Polymers, 2020, 12(10): 2230-2267.
- [2] KAN M, QIAN X, ZHANG T, et al. Highly Active IrO_x Nanoparticles/Black si electrode for efficient water splitting with conformal TiO_2 interface engineering[J]. ACS Sustainable Chemistry Engineering, 2017, 5(11): 10940-10946.
- [3] MAHBOOB S. Isolation and characterization of collagen from fish waste material-skin, scales and fins of catla catla and cirrhinus mrigala[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52: 4296-4305.
- [4] CARVALHO A M, MARQUES A P, SILVA T H, et al.

- Evaluation of the potential of collagen from codfish skin as a biomaterial for biomedical applications [J]. *Marine Drugs*, 2018, 16(12):495.
- [5] SHAVANDI A, HOU Y, CARNE A, et al. Marine waste utilization as a source of functional and health compounds[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2019, 87:187-254.
- [6] HOU Y, SHAVANDI A, CARNE A, et al. Marine shells: Potential opportunities for extraction of functional and health-promoting materials [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, 46:1047-1116.
- [7] CHINH N T, MANH V Q, TRUNG V Q, et al. Characterization of collagen derived from tropical freshwater carp fish scale wastes and its amino acid sequence [J]. *Natural Product Communications*, 2019, 14(7):1-40.
- [8] BLANCO M, VÁZQUEZ J A, PÉREZ-MARTÍN R I, et al. Collagen extraction optimization from the skin of the small-spotted catshark (*S. canicula*) by Response Surface Methodology[J]. *Marine Drugs*, 2019, 17(1):40.
- [9] LIN S, HU X, LI L, et al. Preparation, purification and identification of iron-chelating peptides derived from tilapia (*Oreochromis niloticus*) skin collagen and characterization of the peptide-iron complexes [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149(3):111796.
- [10] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [11] 杨树奇, 曾少葵, 周春霞, 等. 3 种鱼皮的基本成分及氨基酸组成分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2010, 30(1):97-100.
- [12] ROCHA C, NOREA C. Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from grape pomace[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2020, 16(1-2).
- [13] ATA O, KUMCUOGLU S, TAVMAN S. Effects of sonication on the extraction of pepsin-soluble collagens from lamb feet and product characterization [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 159:113253.
- [14] 邹烨, 蔡盼盼, 王立, 等. 超声辅助酶法提取中华鳖裙边胶原蛋白及其热稳定性能 [J]. *食品科学*, 2018, 39(02):254-259.
- [15] 李根, 任国艳, 李倩, 等. 超声辅助提取鲢皮胶原蛋白工艺优化及结构特征分析 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(22):160-168.
- [16] 严子军, 纪洁清, 刘永. 响应面优化酶溶性罗非鱼鳞胶原蛋白的提取工艺[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(18):86-88.
- [17] AHMED R, HAQ M, CHUN B S. Characterization of marine derived collagen extracted from the by-products of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 135:668-676.
- [18] LASSOUED I, JRIDI M, NASRI R, et al. Characteristics and functional properties of gelatin from thornback ray skin obtained by pepsin-aided process in comparison with commercial halal bovine gelatin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41:309-318.
- [19] EL-RASHIDY AA, GAD A, ABU-HUSSEIN A E H G, et al. Chemical and biological evaluation of Egyptian Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) fish scale collagen [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2015, 79:618-626.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 邢瀚文, 韩玮, 施文正, 等. 响应面法优化固态发酵制备罗非鱼皮胶原蛋白的工艺 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(20):120-126.
- [22] CHEN J, LI L, YI R, et al. Extraction and characterization of acid-soluble collagen from scales and skin of tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 66:453-459.
- [23] LOWRY O H, ROSEBROUGH N J, FARR A L, et al. Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, 193(1):265-275.
- [24] SUBHEDAR P B, GOGATE P R. Intensification of enzymatic hydrolysis of lignocellulose using ultrasound for efficient bioethanol production: a review [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(34):11816-11828.
- [25] 王珮, 苏秀榕, 张永飞, 等. 鲢鱼皮胶原蛋白酶提取最优工艺研究与结构表征 [J]. *食品科学*, 2013, 34(7):217-222.
- [26] 耿军凤, 张丽芬, 陈复生, 等. 超声波辅助酶技术在食品蛋白质中的应用研究 [J]. *食品工业*, 2019, 40(1):237-242.
- [27] 公维洁, 卓先勤, 许环浪. 响应面优化超声波辅助提取马面鱼皮胶原蛋白工艺研究 [J]. *食品工业*, 2018, 39(7):92-96.
- [28] MANSUR A R, SONG N E, JANG H W, et al. Optimizing the ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of flavonoids in common buckwheat sprouts [J]. *Food Chemistry*, 2019, 293:438-445.
- [29] PIZZOLATO M, BOUTELIER T, DERICHE R. Perfusion deconvolution in DSC-MRI with dispersion-compliant bases [J]. *Medical Image Analysis*, 2017, 36:197-215.
- [30] 王升力, 黄雪琴, 郭诗, 等. 响应面法优化虾壳中虾青素提取工艺的研究 [J]. *陕西农业科学*, 2016, 62(2):1-5.
- [31] CAO S G, WANG Y, XING L J, et al. Structure and physical properties of gelatin from bovine bone collagen influenced by acid pretreatment and pepsin [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 121:213-223.
- [32] WANG J, PEI X, LIU H, et al. Extraction and characterization of acid-soluble and pepsin-soluble collagen from skin of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 106:544-550.
- [33] ZOU Y, XU P, LI P, et al. Effect of ultrasound pre-treatment on the characterization and properties of collagen extracted from soft-shelled turtle (*Pelodiscus sinensis*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82:72-81.

Ultrasonic-assisted enzymatic extraction and relative solubility of collagen from tilapia skin

LI Jiarou¹, NI Jianbo², HE Jingyi¹, XU Huiya¹, JING Lunan¹, SHI Wenzheng^{1,2}

(1 College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2 Ping Tai Rong Ocean Fishery Group, Zhoushan 316100, Zhejiang, China;

3 National Research and Development Center for Processing Technology of Freshwater Aquatic Products (Shanghai), Shanghai 201306, China)

Abstract: The effects of the ultrasound-assisted enzymatic method on yield and dissolution properties of collagen extracted from tilapia skin were studied. A single factor test was used to investigate the influence of ultrasonic power, enzyme dosage, and ultrasonic time on collagen yield. The optimum extraction process was obtained by using the box-Behnken experimental design. The collagen yield, ultraviolet spectrum, and solubility characteristics of ultrasonic pepsin-soluble collagen and pepsin-soluble collagen were compared. The optional extraction conditions were revealed in the study as follows: ultrasonic power at 165 W, ultrasonic time for 26 min, and enzyme dosage at 1.67%. Under these conditions, the yield of UPSC (62.26%) was significantly higher than that of PSC (29.02%). The ultraviolet spectrum showed that both of them had absorption peaks at 230 nm instead of 280 nm, which was consistent with the characteristics of collagen. Under different pH conditions, the relative solubility of UPSC was higher than that of PSC. The results show that the ultrasound-assisted enzymatic method is an efficient, environmentally friendly, and simple method for extracting collagen from tilapia skin, which is suitable for industrial production. This study not only provides the best technology for extracting collagen from tilapia skin by ultrasonic-assisted enzymatic method but also provides the basis for its application in food processing with high yield and good relative solubility of collagen.

Key words: tilapia skin; optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction; collagen; yield; relative solubility

《渔业现代化》2022年第49卷总目次

综述与专论

- 中国水产养殖发展现状与前景展望 莽琦,徐钢春,朱健,等(2)1
紫菜机械化采收装备技术研究进展 唐嘉鸿,李秀辰,张国琛,等(3)1
南极磷虾粉加工过程中品质变化及评价研究进展 欧阳杰,赵昕源,马田田,等(4)1
封闭式养殖工船研发历程回顾 刘晃,徐皓,庄志猛(5)1
中国深远海养殖装备发展探讨及思考 鲍旭腾,湛志新,崔铭超,等(5)8

水产养殖工程

- 以 PLA、PHBV 为碳源的生物絮团技术在海水养殖中的应用 李晓蕊,宋协法,周广军,等(1)1
3 种不同规模化培养模式对湛江等鞭金藻生产力及色素含量的影响 吕布,杨守国,VASQUEZ Hebert Ely,等(1)11
饲料源 Cu(II) 在生物絮团水产养殖系统中的积累及其对氨氧化的影响 徐波,刘文畅,谭洪新,等(1)18
小头鲷幼鱼陆基循环水养殖日周期性运动规律研究 杨蕊,周胜杰,赵旺,等(1)24
配合饲料投喂量和粒径对绿盘鲍稚鲍生长和存活的影响 万为民(1)30
高密度聚乙烯(HDPE) 近海养殖网箱框架抗弯刚度分析 魏盛军(1)38
船载式投饲机饲料输送关键参数仿真分析 俞国燕,陈振雄,刘峰春,等(2)10
网衣清洗空化射流喷嘴仿真试验 葛安亮,李延龙,王新宝,等(2)18
基于 CFD 模拟及 PIV 技术的鱼池流场分析与优化 张成林,张宇雷,吴凡,等(2)25
工厂化养殖红罗非鱼摄食耗氧规律 张瑜霏,张宇雷(3)10
浮性与沉性生物絮团氨氮处理能力与营养组成的比较研究 谭竞宏,陆泳因,罗国芝,等(3)16
蟹塘投饲船螺旋驱动装置设计与水动力性能分析 陈雷雷,任万川,李俊,等(3)27
虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*) 鱼体水动力学特性研究 闫文彦,黄六一,李玉岩,等(3)36
新建组合填料垂直潜流湿地系统处理沿海垦区池塘养殖尾水的效果 王雪峰,刘文畅,樊利鹏,等(3)46
铜合金编织网网片阻力水槽试验研究 王磊,王鲁民,万荣,等(3)55
不同磷酸二氢钾添加量对鱼菜共生系统水质及鱼菜生长的影响 徐琰斐,顾川川,高霞婷,等(3)63
斑石鲷陆海接力养殖初步研究 王枫林,高云涛,高云红,等(4)8
流水和循环水养殖模式对虾养殖系统运行稳定性和细菌群落演替规律 张晋,周灿,王青瑶,等(4)15
集装箱循环水养殖系统中浮游植物群落结构特征及影响因素 王龙燕,闵文武,王金乐,等(4)26
大连市杏树屯养殖海域人工鱼礁建设适宜性分析 马成龙,刘敏,田涛,等(4)37
工厂化养殖条件下中华鲮生长特性研究 李美帅,孙以康,边力,等(4)45
基于热流固耦合模型的养殖工船养殖舱温度场数值模拟 翟绪辉,程晖,刘长东,等(5)15
养殖工船养殖舱流场数值仿真与特性分析 王银涛,李志松,郭晓宇,等(5)24
基于 FLOW-3D 的船载舱养流场特性分析 秦康,崔铭超,刘晃,等(5)35
养殖工船电力推进调距桨动力系统策略 黎建勋,董晓妮,崔铭超,等(5)45
深远海养殖工船投饲系统设计 王志勇,邹海生,张耀明,等(5)54
10 万吨级养殖工船投饲控制系统设计 董晓妮,王志勇,徐志强,等(5)61
深远海养殖自动投饲系统仿真分析与试验验证 黄建伟,骆意,魏树辉,等(5)68
基于晃荡载荷的养鱼水舱操作平台结构强度分析 王靖,王侨,张怡,等(5)76
养殖工船大黄鱼冰浆保鲜方法研究 姜旭阳,姚琳琳,赵晓霞,等(5)81
工船养殖集中控制系统研发与应用 黄温赞,于得水,董晓妮,等(5)89
船型桁架结构网箱系泊方式优选及影响参数分析 张松,庞国良,黄小华,等(5)97
重力式海洋养殖网箱系统受力分布及变形研究 曹宇,王宁,叶谦,等(5)106
基于多孔介质模型的养殖装备网衣水动力特性研究 陈诚,宋炜,谢正丽,等(5)115
一种基于激光矩阵的水下网衣巡检机器人定位方法 秦浩,杨仁友,杨靓(5)127
工厂化养殖红鳍东方鲀摄食耗氧率研究 张宇雷,单建军,张瑜霏(6)1
增殖放流鱼苗野化训练装置设计与试验 胡庆松,王熠,祖西龙,等(6)7
基于麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的深远海养殖平台系统缆力预报研究 许条建,金延儒,蒋梅荣,等(6)17

组合钢架式网箱水动力性能分析	张婧,孙立文,周游,等(6)27
管道式气力提升池底吸污装置性能研究及试验	黄达,张宇雷,张海耿,等(6)35
围栏养殖平台振动实时监测系统设计与试验	邓浩然,崔勇,关长涛,等(6)42
虹吸式吸鱼泵的水动力学特性研究	田昌凤,吴凡,车轩,等(6)49
绿鳍马面鲀幼鱼游泳运动及能量代谢的初步研究	党保成,陈四清,李雪梅,等(6)57
青岛近岸野生牡蛎及海滩沉积物中的微塑料季节性分布特征及其关联性	黄六一,黄杰鸿,尤鑫星,等(6)67
一种赖氨酸芽孢杆菌对凡纳滨对虾生长和水质影响	管立平,谢晶晶,李伟豪,等(6)77
pH 急性胁迫对方斑东风螺行为及免疫酶活性的影响	丁瑞霞,黄星美,赵旺,等(6)84
池塘多营养级养殖水体的初级生产力及影响因子分析	赵宇曦,刘兴国,陆明,等(6)91
盐度胁迫对曼氏无针乌贼胚胎发育和生长性能的影响	黄伟卿,陈宇光,张艺,等(6)100

渔船与捕捞

基于模糊 PID 的拖网渔船升沉补偿系统研究	张志伟,郑雄胜,贾森君(1)106
玻璃钢渔船传热系数的研究	高霞,朱陈程,郑建丽,等(2)34
渔船倾斜试验现场控制系统设计	张怡,黄文超,张舒(2)42
多波束宽带探鱼仪发射波束形成的现场可编程门阵列(FPGA)实现	魏珂,李国栋,王志俊,等(2)51
海带采收船操纵性仿真计算	李纳,张彬(4)88
网口结构变化对南极磷虾桁杆拖网水动力性能的影响	程军,宋伟华,李灵智,等(4)96

水产品加工

电麻醉对珍珠龙胆石斑鱼麻醉效应与血液生化指标的影响	白贞,沈建,徐文其,等(1)89
海带晾晒干燥特性及干燥模型研究	郭赛飞,周荣,沈建,等(1)97
鲛鳔鱼、鱿鱼、马面鱼明胶提取工艺优化	区兑鹏,张小军,严忠雍,等(2)76
基于改进 Mask R-CNN 的花白鲢去鳞率计算方法研究	肖哲非,沈建,郑晓伟,等(2)85
不同干燥方式下南极磷虾干燥特性与主要营养物质变化	马田田,欧阳杰,赵昕源,等(2)94
不同鱼体大小、暂养温度、麻醉方式对黄颡鱼麻醉的影响	周文,廖涛,朱子健,等(2)102
池塘内循环流水养殖模式对黑鲷肌肉品质影响的研究	张艺,周振平,林培华(3)107
用于杀鱼机剖腹刀具自动控制的视觉检测方法	郑贵君,周聪玲,王永强(4)104
超声辅助酶法提取罗非鱼皮胶原蛋白及其溶解特性	李家柔,倪剑波,何静怡,等(6)127

渔业信息化

基于区块链的水产品交易溯源系统研究与实现	冯国富,胡俊辉,陈明(1)44
基于迁移学习和金字塔卷积网络的河蟹个体图像识别方法研究	冯裕清,杨信廷,徐大明,等(1)52
轻量化神经网络在远洋鱿钓检测技术中的应用	刘雨青,周彦,黄璐瑶,等(1)61
基于 NB-IoT 和无人船巡检的水产养殖场物联网系统研究	李昕聪,余紫扬,刘璞,等(1)72
改进 YOLO v4 模型在鱼类目标检测上的应用研究	郑宗生,李云飞,卢鹏,等(1)82
基于改进 YOLOv5 的水产养殖细菌性鱼病病原细菌检测算法	许竞翔,欧阳建,邱懿,等(2)60
基于声学摄像机的养殖池塘南美白对虾资源量评估	沈蔚,彭战飞,张进,等(2)68
基于 CBAM 和 BiFPN 改进 YOLOv5 的渔船目标检测	张德春,李海涛,李勋,等(3)71
基于 ResNet 的典型养殖鱼类识别方法研究	涂雪滢,刘世晶,钱程(3)81
水族馆鱼类目标检测网络优化研究	刘洋,张胜茂,王书献,等(3)89
基于极限学习机的南太平洋长鳍金枪鱼渔场预测	曾硕星,袁红春(3)99
一种边缘检测方法在头足类角质颚识别中的应用	王冰妍,刘必林,顾心雨(4)52
基于残差模块的红螯螯虾卵计数方法的研究	杨国伟,周超,胡起立,等(4)60
基于多尺度特征提取的水下图像增强模型	杜守庆,陈明,王俊豪(4)70
基于渔业船联网的船载终端系统设计与实现	张玉涛,李国栋,汤涛林,等(4)80
基于机器视觉的鲤、鲫鱼性状测量系统的设计与实现	周晓林,马超,王兆平,等(6)108
基于 YOLOv5 模型的鱼类数量统计方法改进研究	覃学标,黄冬梅,宋巍,等(6)118