



基于浮游生物完整性指数的不同循环饥饿投饲模式黄颡鱼养殖塘水质评价

张亚军¹, 秦秀东², 李恩军², 程光平^{1,3*}, 李文红^{1*}, 张伟刚⁴,
孙玉章⁴, 张曼¹, 崔亮¹, 赵晚晨¹

(¹广西大学动物科学技术学院/广西高校水生生物健康养殖与营养调控重点实验室, 南宁 530004; ²桂林市第二水产养殖场, 广西桂林 541000; ³广西海洋研究所, 广西北海 536000; ⁴桂林市小池塘农牧有限公司, 广西桂林 541000)

摘要:【目的】探索不同循环饥饿投饲模式对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)养殖塘水质状况的影响, 筛选出基于优良水质的黄颡鱼池塘养殖循环饥饿投饲模式, 为其规模化生态化养殖提供科学参考。【方法】按间隔3 d(X3组)、5 d(X5组)、7 d(X7组)和10 d(X10组)饥饿1 d等4种循环饥饿投饲模式养殖黄颡鱼, 以正常投饲塘(X0组)为参照点, 利用浮游生物完整性指数(P-IBI)评价各模式塘水体健康状况, 比较分析P-IBI评价结果和灰色关联分析结果。【结果】最终筛选出Y2(浮游植物种类数)、Y14(浮游植物生物量)、Y19(浮游动物Margalef丰富度指数)、Y31(硅藻门相对丰度)、Y33(绿藻门相对丰度)和Y35(枝角类和桡足类相对丰度)作为构建P-IBI评价体系的指标。P-IBI分值显示, 养殖中、后期各试验塘和参照点的水体健康状况均有所下降, 至养殖结束时, X0、X3、X5、X7和X10各组的P-IBI分值比其初始值分别下降57.66%、19.30%、11.10%、30.08%和29.91%; 各试验组的P-IBI平均值排序为X7<X10<X3<X5, X5组水体健康状况最好, P-IBI平均值较X0组提高11.77%。基于Pearson相关性分析结果显示, 各组P-IBI与水温(WT)呈显著正相关($P<0.05$, 下同), 与总磷(TP)呈显著负相关, 与其他环境因子的相关性不显著($P>0.05$)。灰色关联分析结果表明, 4组试验塘和参照点水质综合判定均为Ⅲ类, 其中X3组和X5组水质状况较优, 其试验后期均为Ⅲ类, 且有1个时期为Ⅱ类。【结论】循环饥饿投饲模式中处于饥饿期的黄颡鱼对饲料利用率较高, 减少养殖塘中残饵的富集; 同时饥饿期黄颡鱼直接或间接利用养殖塘中的浮游生物, 在一定程度上能保持浮游生物群落结构相对稳定, 达到改善水质的目的。综合分析水质因子和P-IBI得出, 间隔5 d饥饿1 d的投饲模式有助于改善黄颡鱼养殖塘水质状况。

关键词: 黄颡鱼; 浮游生物完整性指数; 循环饥饿; 水质评价

中图分类号: S964.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-1191(2020)07-1754-10

Evaluation of water quality in *Pelteobagrus fulvidraco* culture ponds with different circular starvation feeding mode based on plankton integrity index

ZHANG Ya-jun¹, QIN Xiu-dong², LI En-jun², CHENG Guang-ping^{1,3*}, LI Wen-hong^{1*},
ZHANG Wei-gang⁴, SUN Yu-zhang⁴, ZHANG Man¹, CUI Liang¹, ZHAO Wan-chen¹

(¹College of Animal Science and Technology, Guangxi University/Key Laboratory of Aquatic Health Cultivation and Nutrition Regulation of Guangxi Colleges and Universities, Nanning 530004, China; ²The Second Aquaculture Farm in Guilin, Guilin, Guangxi 541000, China; ³Institute of Oceanography of Guangxi, Beihai, Guangxi 536000, China;

⁴Guilin Small Pond Agriculture and Animal Husbandry Company, Guilin, Guangxi 541000, China)

Abstract: 【Objective】This study aimed to clarify the effects of different cycle starvation feeding modes on the water quality of *Pelteobagrus fulvidraco* pond, and to screen out the cycle starvation feeding mode of *P. fulvidraco* pond farming based on excellent water quality, so as to provide scientific reference to its large-scale ecological farming. 【Method】The four feeding modes was no-feeding *P. fulvidraco* for 1 d with an interval of 3 d(X3 group), 5 d(X5 group), 7 d(X7 group) and 10 d(X10 group), respectively, with the normal feeding group(X0 group) as control. The water quality of

收稿日期: 2019-09-23

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科AB16380057); 广西科技重大专项(桂科AA17204095-2)

作者简介: *为通讯作者: 程光平(1956-), 博士, 教授, 主要从事水产生态养殖研究工作, E-mail: cgp5@163.com; 李文红(1966-), 博士, 教授, 主要从事水产动物健康养殖研究工作, E-mail: whli@163.com。张亚军(1995-), 研究方向为水产生态养殖, E-mail: zyj17696078864@163.com

each model pond was evaluated by Plankton Integrity Index (P-IBI), and results by P-IBI and gray correlation were compared. 【Result】The results showed that, Y2 (phytoplankton species number), Y14 (phytoplankton biomass), Y19 (zooplankton Margalef abundance index), Y31 (Bacillariophyta relative abundance), Y33 (Chlorophyta relative abundance), and Y35 (Cladocera and Copepods relative abundance) were selected as the indicators to construct the P-IBI evaluation system. The P-IBI showed that, the water status of each experimental pond and the reference points in the middle and later stage of the breeding decreased to some degrees. By the end of the breeding, the P-IBI scores of groups X0, X3, X5, X7 and X10 decreased by 57.66%, 19.30%, 11.10%, 30.08% and 29.91%, respectively, compared with their initial values. The P-IBI mean value of each group was sorted through small to large as groups X7<X10<X3<X5, and X5 had the best water health, and the average P-IBI value was 11.77% higher than that of group X0. Based on Pearson correlation analysis, P-IBI of each group was significantly positively correlated with water temperature (WT) ($P<0.05$, the same below), significantly negatively correlated with total phosphorus (TP), and not significantly correlated with other physicochemical factors ($P>0.05$). Grey correlation analysis results showed that the four groups of test pond and reference point pond water quality comprehensive judgement were class III water, water quality of groups X3 and X5 was fine, the at late test were class III water, and there was a time when water quality was class II. 【Conclusion】The results of circular starvation feeding mode indicate that the efficiency of feed utilization in the no-feeding stage is higher, which can reduce the enrichment of residual bait in the breeding pond. Besides, during the no-feeding period, the plankton in the culture ponds can be used directly or indirectly, which maintains the relatively stable structure of the plankton community and then improves the water quality. Based on the comprehensive analysis of water quality factors and P-IBI, no-feeding for 1 d with a 5 day interval is helpful to improve the water quality of aquaculture ponds.

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; plankton index of biotic integrity (P-IBI); circular starvation; evaluation of water quality

Foundation item: Guangxi Key Research and Development Plan Project (Guike AB16380057); Guangxi Science and Technology Major Project (Guike AA17204095-2)

0 引言

【研究意义】黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 又名黄腊丁、昂刺、黄骨鱼等, 属鲇形目 (Siluriformes) 鲿科 (Bagridae) 黄颡鱼属 (*Pelteobagrus*)。其肉质细嫩, 味道鲜美, 营养价值高, 深受消费者喜爱。近年我国黄颡鱼养殖产业发展迅猛 (姚清华等, 2018), 但随着养殖规模的扩大和养殖产量的提高, 养殖塘生态系统受到不同程度破坏, 导致养殖对象病害增多、品质下降、成活率较低及养殖成本升高, 严重影响其养殖经济效益 (邓先余等, 2008; 丁正峰等, 2008)。因此, 科学改进投饲模式, 提高输入饲料的利用率, 以及降低残饵和养殖鱼类排泄物对养殖水环境的影响, 对实现黄颡鱼规模化池塘生态养殖具有重要意义。【前人研究进展】循环饥饿投饲能诱导鱼类处于饥饿状态, 而在饥饿状态下再投喂饲料, 鱼类会获得补偿生长 (Ali et al., 2003; Peres et al., 2011; 阮国良等, 2016; 王润等, 2018)。苏胜彦等 (2017) 研究表明, 循环饥饿投喂方式能激发幼鱼产生补偿生长效应, 且饲料投喂量最少。王成桂等 (2017) 研究发现, 饥饿可提高珍珠龙胆石斑鱼 [*Epinephelus fuscoguttatus* (♀) × *E. lanceolatus* (♂)] 幼鱼饵料利用率。王润等 (2018) 研究认为, 适宜的循环饥饿投饲策略能增加珍珠龙胆石斑鱼食欲, 提高其摄食率; 同时由于饲料消化率的提高、饲料系数的降低及饲料投喂量的减少, 水体水质情况得到一定程度改善。近年来, 养殖水体水质评价体系变得越来越多样化。Karr

(1981) 首次提出以鱼类为研究对象建立生物完整性指数 (Index of biotic integrity, IBI), 并对北美水生态系统进行健康评价。IBI 可定量描述人类干扰与生物特性间的关系, 且该指数对于干扰反应敏感 (Ode et al., 2005)。IBI 评价体系不仅通过鱼类 (刘春池等, 2017) 构建, 还逐渐扩展到以浮游生物 (娄方瑞等, 2015)、藻类 (杨燕君等, 2017)、底栖动物 (孔凡青等, 2018) 和微生物 (朱文婷等, 2019) 构建, 并应用于评价养殖水体健康状况。浮游生物作为水生态系统中生物链和生产力的基础, 对水生态系统的结构及功能有重要影响 (张婷等, 2014), 其 IBI 能很好地指示人为干扰导致的水质变化情况, 在水质评价中已得到广泛运用 (谭巧等, 2017; 黎明民等, 2018; 崔亮等, 2019)。【本研究切入点】迄今, 与循环饥饿投饲有关的研究主要集中在对养殖鱼类的补偿生长方面, 而评价此类投饲模式对养殖水环境影响方面的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】采用浮游生物完整性指数 (Plankton index of biotic integrity, P-IBI) 及灰色关联分析评价 4 种循环饥饿投饲模式对黄颡鱼养殖塘生态健康状况的影响, 以期筛选出基于优良水质的黄颡鱼池塘养殖循环饥饿投饲模式, 为黄颡鱼规模化生态化养殖提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验塘概况

试验塘为广西桂林市某农牧有限公司的 9 口生产性黄颡鱼养殖塘, 各塘面积 0.40~0.65 ha, 水深约

2 m, 土质塘堤, 底泥厚度约40 cm。主养鱼为平均体重0.9 g/尾的杂交黄颡鱼, 各塘放养密度均为45.0万尾/ha; 配养平均体重125 g/尾的鳊(120尾/ha)和46 g/尾的鲫(3300尾/ha)。试验用饲料为广东奥特饲料有限公司生产的海龙牌黄颡鱼膨化配合饲料, 粗蛋白含量 $\geq 40\%$ 。

1.2 试验方法

1.2.1 投饲模式及养殖管理 试验设X3(间隔3 d饥饿)、X5(间隔5 d饥饿)、X7(间隔7 d饥饿)和X10(间隔10 d饥饿)4个试验组, 每组设2个平行塘, 另设X0(正常投饲)为对照组。各塘均用自动投饲机投饲, 按基于放养量(密度)和生长状况估算的存塘黄颡鱼重量计算各塘每天的理论投饲量, 每10 d调整日投饲量1次; 按设定的不同间隔周期停食, 每个间隔周期停食1 d。具体投饲中, 以所投饲1 h后的剩余状况判断当天实际投饲量及确定次日投饲量。除间隔饥饿周期外, 各塘管理方法相同。试验期共146 d。

1.2.2 样品采集与分析 黄颡鱼鱼种放养10 d后开始采样, 之后每隔1个月左右采样1次。采样点设在投饲台附近, 所采水样为0.5、1.0和1.5 m水层的混合水样。水环境因子样品采集与测定参照魏复盛(2002)、国家环境保护总局(2009)的方法, 采集1 L水样分至2个500 mL水样瓶中, 测定项目包括透明度(SD)、水温(WT)、总磷(TP)、总氮(TN)、溶解氧(DO)、五日生化耗氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、亚硝态氮(NO₂-N)和叶绿素a(Chla); 浮游生物样本采集与测定参考韩茂森(1980)、张觉民和何志辉(1991)、周凤霞和陈剑虹(2005)、翁建中(2010)的方法, 分别采集浮游动物和浮游植物的水样, 将其浓缩至1 L, 加入甲醛和鲁哥氏液固定, 带回实验室静置沉淀24 h, 收集底部的浮游生物, 定容至50 mL, 在200倍显微镜下鉴定到属, 并计数。计数结果在Excel 2019中进行统计。计数公式如下:

$$N = \frac{n \times v}{M \times V}$$

式中, N 为1 L水样中的浮游生物个数(ind/L), n 为计数所获得的个体数(ind), v 为沉淀体积(mL), M 为计数体积(mL), V 为采样体积(L)。

1.2.3 P-IBI指标构建 参照杨燕君等(2017)的方法构建P-IBI评价体系, 选取35个可充分反映浮游生物群落丰富度、营养结构和群落结构的指标作为P-IBI初选生物学指标(表1)。

1.2.4 P-IBI指数计算 参照朱文婷等(2019)的方法, 通过分布范围、判别能力和相关性分析对初选指

标进行筛选, 构建P-IBI评价体系; 参照Blocksom等(2002)提出的比值法, 对构建的P-IBI评价体系进行赋值计算。

1.2.5 参照点选择 目前参照点的选取尚无统一标准。由于X0组采用持续投喂方式, 可准确反映目前规模化黄颡鱼养殖塘水质状况。因此, 参考Stoddard等(2006)的参照点选择法, 选取主养鱼、池塘条件和日常管理相同, 且人为干预最少的X0号塘为参照点。

1.2.6 水质灰色关联分析 灰色关联分析是对系统内部事物间的状态进行量化比较分析的方法(翟国静, 1996), 利用数列的可比性定量刻画系统内部主要因素间的相关程度(陈琴等, 2019), 能量化指示水质的变化情况(赖坤容和周维博, 2010; 王平和王云峰, 2013)。将养殖塘水体作为一个灰色系统, 参照GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的水质分类, 得出水体的水质状况(章新等, 2010), 然后研究P-IBI与环境因子的相关性。

为消除不同量纲的影响, 采用均值法对水环境因子实测值进行无量纲化处理, 无量纲化公式如下:

$$X_b(K) = \frac{X_b^{(0)}(K)}{\frac{1}{n} \sum_{a=1}^n X_a^{(0)}(K)}$$

式中, $X_b(K)$ 为 b 检测时期水域评估样品的 K 项指标的无量纲化值, $X_b^{(0)}(K)$ 为 b 检测时期水域评估样品各水质指标的实测值, $X_a^{(0)}(K)$ 为水环境质量分类标准中各评估指标的标准值。

关联系数计算公式如下:

$$\varepsilon_{ij}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(k) + \rho \Delta_{\max}}$$

式中, $\Delta_{ij}(k) = |x_i(k) - y_j(k)|$, 即 $\{x_i(k)\}$ 与 $\{y_j(k)\}$ 在第 k 项差值的绝对值; Δ_{\min} 和 Δ_{\max} 分别为 $\Delta_{ij}(k)$ 的最小值和最大值; ρ 为分辨系数, 本研究中 $\rho = 0.5$ 。

关联度计算公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k)$$

式中, n 为水质评价指标个数, $\varepsilon_i(k)$ 为第 i 项 k 指标的关联系数。

2 结果与分析

2.1 不同投饲模式的投饲总量

试验结束, 各组投饲模式的投饲量如表2所示, X0组单位面积投饲量最高, 为27000 kg/ha, 各试验组均低于X0组, 其中X3组最低, 为13922 kg/ha, 比X0组少投48.44%。

表 1 P-IBI评价体系初选指标

Table 1 Primary selection indexes of P-IBI evaluation system

编号 Code	初选指标 Primary selection index	指标描述 Index description
Y1	浮游动物种类数	浮游动物数目
Y2	浮游植物种类数	浮游植物数目
Y3	原生动物种类数	原生动物数目
Y4	轮虫类种类数	轮虫类数目
Y5	枝角类种类数	枝角类数目
Y6	桡足类种类数	桡足类数目
Y7	浮游动物密度	浮游动物总密度
Y8	原生动物密度	原生动物总密度
Y9	轮虫类密度	浮游动物中轮虫类密度
Y10	枝角类密度	浮游动物中枝角类密度
Y11	桡足类密度	浮游动物中桡足类密度
Y12	浮游植物密度	浮游植物总密度
Y13	浮游动物生物量	浮游动物生物量
Y14	浮游植物生物量	浮游植物生物量
Y15	浮游植物Shannon-Wiener多样性指数	$H' = -\sum P_i \cdot \log_2 P_i$, P_i 为第 <i>i</i> 种的个体数百分比
Y16	浮游植物Pielou均匀度指数	$J' = H'/\log_2 S$, H' 为多样性指数, S 为物种数
Y17	浮游动物Shannon-Wiener多样性指数	$H' = -\sum P_i \cdot \log_2 P_i$, P_i 为第 <i>i</i> 种的个体数百分比
Y18	浮游动物Pielou均匀度指数	$J' = H'/\log_2 S$, H' 为多样性指数, S 为物种数
Y19	浮游动物Margalef丰富度指数	$D = (S-1)/\ln N$, S 为物种数, N 为个体总数
Y20	浮游植物Margalef丰富度指数	$D = (S-1)/\ln N$, S 为物种数, N 为个体总数
Y21	浮游动物与浮游植物密度比	浮游动物密度/浮游植物密度
Y22	浮游动物与浮游植物生物量比	浮游动物生物量/浮游植物生物量
Y23	轮虫类与枝角类和桡足类密度比	轮虫类密度/枝角类和桡足类密度
Y24	浮游动物与浮游植物种类数比	浮游动物种类数/浮游植物种类数
Y25	硅藻门密度	浮游植物中硅藻门密度
Y26	蓝藻门密度	浮游植物中蓝藻门密度
Y27	绿藻门密度	浮游植物中绿藻门密度
Y28	硅藻门生物量	浮游植物中硅藻门生物量
Y29	蓝藻门生物量	浮游植物中蓝藻门生物量
Y30	绿藻门生物量	浮游植物中绿藻门生物量
Y31	硅藻门相对丰度	硅藻门密度/浮游植物密度
Y32	蓝藻门相对丰度	蓝藻门密度/浮游植物密度
Y33	绿藻门相对丰度	绿藻门密度/浮游植物密度
Y34	轮虫类相对丰度	轮虫类密度/浮游动物密度
Y35	枝角类和桡足类相对丰度	枝角类和桡足类密度/浮游动物密度

表 2 不同投饲模式的投饲总量

Table 2 Feeding amount of different feeding modes

指标 Index	处理组 Treatment group				
	X0	X3	X5	X7	X10
面积(ha) Area	0.45	0.64	0.52	0.46	0.61
总投饲量(kg) Total feeding amount	12150	8910	9440	9075	12940
单位面积投饲量(kg/ha) Feeding amount per unit area	27000	13922	18154	19728	21213

2.2 初选指标的筛选结果

通过对初选指标分布范围的筛选,排除90%指标数值得分为0的指标Y3和Y8,用SPSS 25.0构建箱体图,对其余指标进行判别能力筛选。依据参照点和各试验塘监测指标25%~75%分位数的箱体图重叠情况对各指标进行判别筛选:参照崔亮等(2019)的方法,选取试验塘为监测点,定义监测点和参照点中位线均位于对方箱体内为 $IQ < 1$;有1个中位线位于对方箱体内定义为 $IQ > 1$;2个中位线均不在对方箱体内定义为 $IQ > 2$ 。去掉 $IQ < 1$ 的指标,筛选出Y1、Y2、Y7、Y11、Y12、Y14、Y19、Y20、Y23、Y24、Y25、Y26、

Y28、Y31、Y32、Y33、Y34和Y35共18个指标。然后继续使用SPSS 25.0对筛选出的18个指标进行Pearson相关性分析,筛选出Y2(浮游植物种类数)、Y14(浮游植物生物量)、Y19(浮游动物Margalef丰富度指数)、Y31(硅藻门相对丰度)、Y33(绿藻门相对丰度)和Y35(枝角类和桡足类相对丰度)6个指标(图1,表3)作为本研究P-IBI评价体系的指标。

2.3 P-IBI各指标对环境干扰的反应度判断

循环饥饿主要是利用养殖对象的补偿生长效应,间接降低养殖水体的氮、磷含量(Blanquet and Oliva-Teles, 2010),进而影响浮游生物丰度。因此,

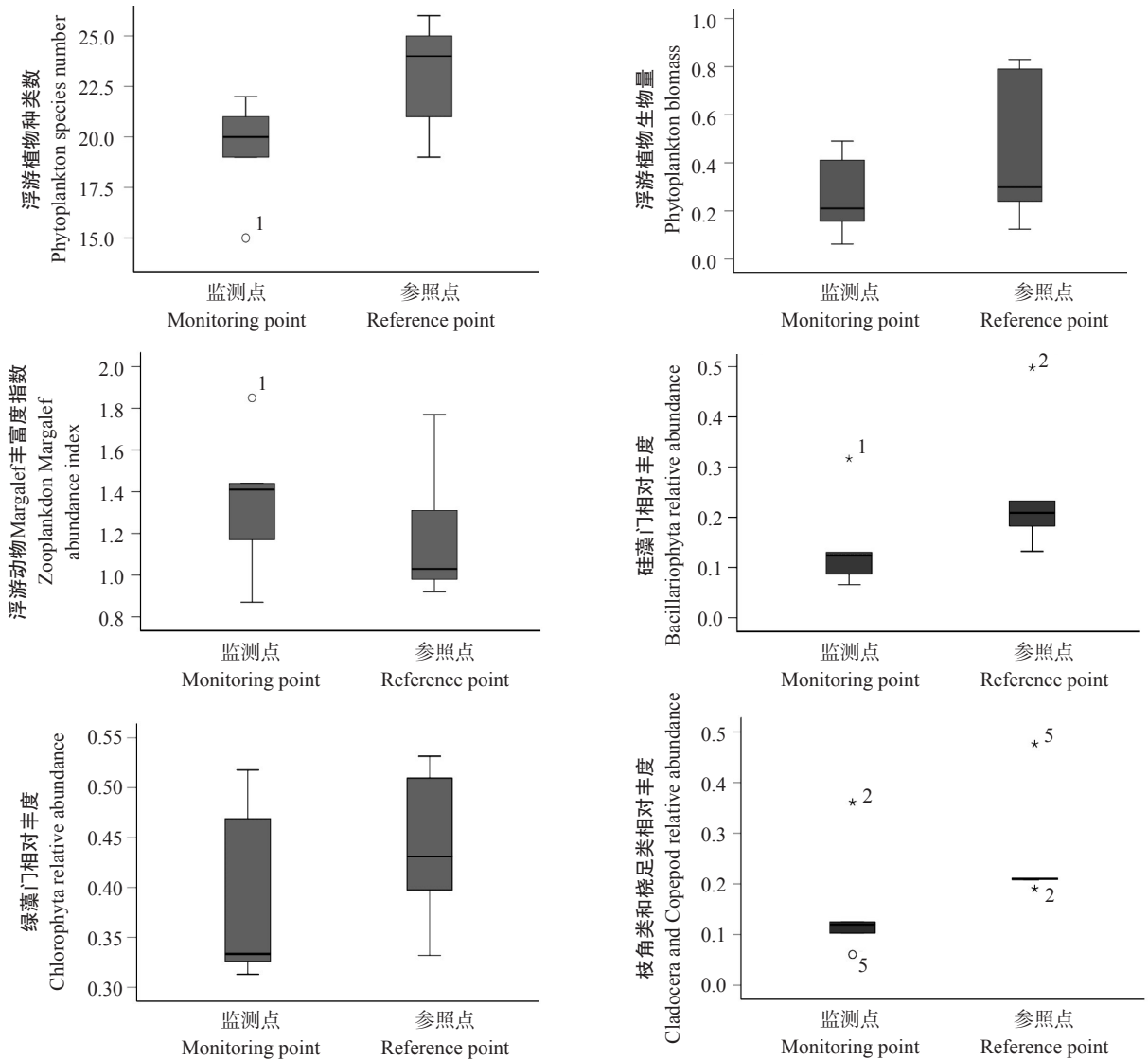


图 1 筛选后所得指标的箱体图

Fig.1 The box diagram of the indicators obtained after screening

图中o代表异常值,*代表极端值,数值代表第几个数

o represented abnormal value, * represented extreme value, numerical value represented the order of the number

表 3 P-IBI各指标的Pearson相关性分析结果

Table 3 Pearson correlation analysis for each index of P-IBI

指标 Index	Y2	Y14	Y19	Y31	Y33	Y35
Y2	1.000					
Y14	-0.071	1.000				
Y19	-0.015	-0.169	1.000			
Y31	-0.036	0.106	-0.159	1.000		
Y33	-0.079	0.072	-0.206	-0.006	1.000	
Y35	0.115	-0.150	0.260	-0.103	0.177	1.000

本研究将所选指标Y2和Y19对环境干扰的反应度定义为下降,其余指标对环境干扰的反应度定义为上升(表4)。

2.4 P-IBI评价标准的建立

根据各评价指标对环境干扰的反应度,利用比值法确定P-IBI各指标值,再将各指标值相加,得到

表 4 P-IBI评价指标对环境干扰的反应度

Table 4 The degree of reactivity of P-IBI indexes to environment interference

指标 Index	反应度 The degree of reactivity to interference
Y2	下降
Y14	上升
Y19	下降
Y31	上升
Y33	上升
Y35	上升

该组的P-IBI分值。将参照点P-IBI分值的25%分位数(3.247)作为健康评价的标准,当试验塘的P-IBI分值大于健康标准即视该塘为健康;将小于健康标准的范围进行4等分,共确定健康、亚健康、一般、差和极差5个水质等级(表5)。

2.5 P-IBI评价结果

在P-IBI评价体系中,P-IBI分值与养殖塘的水质健康状况有关,P-IBI分值越大,代表水质健康状况越好,反之则表示健康状况越差。与P-IBI评价标准(表5)比对评价各组塘水质状况,结果(表6)显示,在4种不同投饲模式塘健康状况中,X3组P-IBI分值变动范围为2.559~3.671,平均值为3.183;X5组P-IBI分值变动范围为3.220~4.486,平均值为3.693;X7组P-IBI分值变动范围为2.208~3.470,平均值为2.862;X10组P-IBI分值变动范围为2.493~3.763,平均值为3.048;4种投饲模式塘的P-IBI平均值排序为X7<X10<X3<X5。与参照点(X0组)相比,X5组的P-IBI平均值提高11.77%。

随着养殖进行,养殖对象生长和饲料输入量不断增加,养殖中、后期各试验塘和参照点的健康状况

均有所下降,但下降程度不一致。X3组为2个健康和3个亚健康;X5组为4个健康和1个亚健康;X7组为1个健康、2个亚健康和2个一般;X10组为2个健康和3个亚健康;参照点(X0组)为3个健康、1个亚健康和1个一般(表6)。从试验开始到结束,X0、X3、X5、X7和X10各组养殖塘P-IBI分值比其初始值分别下降57.66%、19.30%、11.10%、30.08%和29.91%;对应的P-IBI分值降幅排序为X5<X3<X10<X7<X0。基于P-IBI分值的水质评价结果显示,各组试验塘健康状况均优于参照点,其中X5组塘(间隔5 d饥饿)健康状况最佳。

2.6 P-IBI与环境因子的相关性分析结果

使用SPSS 25.0对各组P-IBI分值和水环境因子数据进行Pearson相关性分析,结果(表7)显示,P-IBI与WT和TP分别呈显著正相关和负相关($P<0.05$),与其他环境因子的相关性不显著($P>0.05$)。

表 5 P-IBI评价体系的评价标准

Table 5 Evaluation standard for P-IBI evaluation system

健康分级 Health classification	健康 Healthy	亚健康 Sub-health	一般 good	差 Poor	极差 Range
评价标准 Assessment criteria	>3.247	2.435~3.247	1.624~2.434	0.812~1.623	<0.812

表 6 各处理组的P-IBI分值及水质健康状况评价结果

Table 6 The P-IBI scores of each group and the results of assessment of water quality health condition

采样时间(年-月) Sampling date (Y-M)	X0组 X0 group		X3组 X3 group		X5组 X5 group		X7组 X7 group		X10组 X10 group	
	分值 Score	健康状况 Health condition	分值 Score	健康状况 Health condition	分值 Score	健康状况 Health condition	分值 Score	健康状况 Health condition	分值 Score	健康状况 Health condition
2018-06	4.521	健康	3.171	亚健康	3.622	健康	3.158	亚健康	3.557	健康
2018-07	3.247	亚健康	3.671	健康	3.514	健康	2.396	一般	2.684	亚健康
2018-08	3.437	健康	3.595	健康	4.486	健康	3.470	健康	3.763	健康
2018-09	3.400	健康	2.918	亚健康	3.624	健康	3.077	亚健康	2.743	亚健康
2018-10	1.914	一般	2.559	亚健康	3.220	亚健康	2.208	一般	2.493	亚健康
平均值 Average	3.304	-	3.183	-	3.693	-	2.862	-	3.048	-

表 7 P-IBI与主要环境因子的相关性分析结果

Table 7 Correlation coefficient between P-IBI and main environmental factors

环境因子 Environmental factor	WT	SD	DO	COD _{Mn}	BOD ₅	TP	TN	NH ₃ -N	NO ₂ -N	Chla
相关性系数 Correlation coefficient	0.406*	0.181	0.061	-0.282	0.047	-0.427*	0.324	-0.043	0.226	0.255

*表示显著相关($P<0.05$)

* represented significant correlation($P<0.05$)

2.7 基于不同循环饥饿投饲模式的黄颡鱼养殖塘水质灰色关联分析结果

以GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的5类水质级别为标准,对其进行无量纲化处理(表8),将无量纲化处理后的各塘实测值与其进行关联度计算,结果如表9所示。关联度越大,说明该水质越接近相应水质级别,判定关联度最大时对应的水质类别即为其水质级别。由表9可知,4组试验塘水质综合判定均为Ⅲ类,参照点也为Ⅲ类;在动态变化上,至试验末期参照点和X7组水质为Ⅳ类,其余试验塘水质均为Ⅲ类。从5个监测期来看,X7、X10和X0组

表 8 地表水环境质量的无量纲值

Table 8 The dimensionless value of surface water environmental quality standard

级别 Grade	TP	TN	DO	BOD ₅	COD _{Mn}	NH ₃ -N
I	0.130	0.192	1.596	0.577	0.270	0.146
II	0.325	0.481	1.277	0.577	0.541	0.485
III	0.649	0.962	1.064	0.769	0.811	0.971
IV	1.299	1.442	0.638	1.154	1.351	1.456
V	2.597	1.923	0.426	1.923	2.027	1.942

均有2个时期为Ⅳ类水,水质状况相对较差;X3和X5组塘均只有1个时期为Ⅳ类水质,同时有1个时期出现Ⅱ类水质,水质状况相对较好。

表 9 不同循环饥饿投饲模式下黄颡鱼养殖塘水质灰色关联分析结果

Table 9 Grey correlation analysis of *P. fulvidraco* aquaculture water quality under different circular starvation feeding modes

处理组 Treatment group	日期 (月-日) Date(M-D)	I	II	III	IV	V	水质级别 Water grade
X0	06-08	0.696	0.670	0.746	0.603	0.488	III
	07-19	0.604	0.688	0.742	0.713	0.583	III
	08-10	0.555	0.619	0.710	0.759	0.645	IV
	09-16	0.620	0.723	0.932	0.765	0.519	III
	10-19	0.695	0.699	0.703	0.706	0.458	IV
	均值	0.634	0.680	0.767	0.709	0.539	III
X3	06-08	0.635	0.669	0.754	0.726	0.527	III
	07-19	0.664	0.729	0.706	0.684	0.460	II
	08-10	0.569	0.645	0.794	0.846	0.581	IV
	09-16	0.607	0.650	0.773	0.771	0.586	III
	10-19	0.608	0.657	0.753	0.739	0.474	III
	均值	0.616	0.670	0.756	0.753	0.526	III
X5	06-08	0.803	0.816	0.798	0.776	0.710	II
	07-19	0.544	0.645	0.708	0.758	0.459	IV
	08-10	0.598	0.682	0.834	0.734	0.586	III
	09-16	0.546	0.647	0.819	0.779	0.499	III
	10-19	0.627	0.739	0.843	0.715	0.465	III
	均值	0.624	0.706	0.800	0.752	0.543	III
X7	06-08	0.660	0.706	0.757	0.701	0.480	III
	07-19	0.592	0.706	0.737	0.713	0.461	III
	08-10	0.585	0.667	0.844	0.787	0.546	III
	09-16	0.506	0.606	0.705	0.748	0.536	IV
	10-19	0.574	0.649	0.747	0.752	0.457	IV
	均值	0.584	0.667	0.758	0.740	0.496	III
X10	06-08	0.652	0.632	0.666	0.618	0.554	III
	07-19	0.597	0.690	0.717	0.731	0.514	IV
	08-10	0.619	0.708	0.830	0.789	0.556	III
	09-16	0.534	0.640	0.764	0.791	0.547	IV
	10-19	0.638	0.688	0.760	0.714	0.460	III
	均值	0.608	0.672	0.747	0.729	0.526	III

3 讨论

3.1 不同循环饥饿投饲模式对养殖塘健康状况的影响

养殖环境中,鱼类会面临食物匮乏等极端条件,在饥饿胁迫环境下,鱼类机体的能量物质会不断被消耗(朱站英等,2012),代谢水平减弱(曾令清等,2015),免疫力降低(华雪铭等,2012),酶活性发生改变(Azodi et al.,2015)等;同时鱼体通过自身代谢机能的改变以适应这种饥饿胁迫(Azodi et al.,2015)。养殖水体中的氮、磷输入主要来自饲料,而氮、磷是构成生物体各组分的重要元素,是决定浮游生物生长的重要营养元素,对水体中的水生生物及水质状况起着重要作用(周劲风和温琰茂,2004;宣雄智等,2019)。不适宜的投饲模式会导致养殖塘水质败坏,间接影响鱼类的生长状况,从而导致养殖效益极大降低;而适宜的投饲模式既能使养殖水体保持健康状态,养殖鱼类获得补偿生长,又可提高饲料利用

效率,降低饲料能耗及其成本,提高经济效益(Huang et al.,2008;Blanquet and Oliva-Teles,2010)。健康的水生态系统具有稳定性和可持续性,即在时间上具有维持其组织结构自我调节和对胁迫的恢复能力(廖静秋和黄艺,2013)。王润等(2018)研究发现循环饥饿模式处理下的试验水体明显优于持续投喂的对照水体,在间隔3 d饥饿的投饲模式下,水质状况显著优于持续投喂组的水质状况。本研究中,4组试验塘生态健康状况总体上均优于参照塘,其中X5组塘(间隔5 d饥饿)的平均P-IBI分值最高,健康状况最好,且健康状况保持度较好,与王润等(2018)的研究结果相似。分析P-IBI可知,利用饥饿可增加鱼类对于饲料的利用率,减少水体中营养盐的富集,同时通过饥饿提高养殖对象对部分浮游生物的摄食率,降低养殖水体富营养化压力(Blanquet and Oliva-Teles,2010)。此外,循环饥饿还有助于刺激黄颡鱼食欲及提升饲料利用率,减少外源饲料输入量(韩春艳等,2014),在一定程度上改善养殖水体的水质状况。

3.2 P-IBI评价与水化指标间的关系

P-IBI主要受浮游生物群落结构的影响,浮游生物群落与水环境因子关系密切,其种类组成和物种多样性随着环境的变化而变化,不同水体中,环境因子对浮游生物群落结构的影响也有差异(张婷等,2014)。李喆等(2014)研究发现,WT、COD_{Mn}、TP和SD是影响浮游植物群落结构的主要环境因子。崔亮等(2019)研究表明,COD_{Mn}、WT和pH是与浮游生物群落结构关联度较高的环境因子。本研究的灰色关联分析结果表明,在5个多月(5次)的监测中,X3组和X5组的水质级别仅有1次为IV类水,且都有1次为II类水,P-IBI评价亦显示X5组P-IBI分值最高,表明水质好坏与环境因子和浮游生物种群组成密切相关,浮游生物多样性从生物视角揭示了养殖水体的健康状况。P-IBI与水环境因子相关性分析结果表明,P-IBI与WT和TP呈显著相关,而WT的变化会导致浮游动物新陈代谢强度、生长发育和繁殖周期的改变,进而影响其群落结构的变化(Lenz et al.,2005;林青等,2014)及水体生态健康状况。

4 结论

循环饥饿投饲模式中处于饥饿期的黄颡鱼对饲料利用率较高,减少养殖塘中残饵的富集;同时饥饿期黄颡鱼直接或间接利用养殖塘中的浮游生物,在一定程度上能保持浮游生物群落结构相对稳定,

达到改善水质的目的。综合分析水质因子和P-IBI得出,间隔5 d饥饿1 d的投饲模式有助于改善黄颡鱼养殖塘水质状况。

参考文献:

- 陈琴,高胜男,李恩军,程光平,崔亮,赵学倩,何绪伟,秦秀东. 2019. 基于两种生物浮床的养殖池塘中浮游动物多样性与水质的灰色关联性分析[J]. 广东农业科学, 46(2): 137-146. [Chen Q, Gao S N, Li E J, Cheng G P, Cui L, Zhao X Q, He X W, Qin X D. 2019. Analysis on grey correlation between zooplankton diversity and water quality in culture pond based on two kinds of biological floating beds[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 46(2): 137-146.]
- 崔亮,李恩军,程光平,秦秀东,张曼,赵学倩,高胜男,何绪伟. 2019. 基于浮游生物完整性指数的不同生物浮床黄颡鱼养殖池塘生态健康评价[J]. 南方农业学报, 50(1): 179-186. [Cui L, Li E J, Cheng G P, Qin X D, Zhang M, Zhao X Q, Gao S N, He X W. 2019. Ecological health assessment of *Pelteobagrus eupogon* culture ponds of different bio-floating beds based on plankton integrity index [J]. Journal of Southern Agriculture, 50(1): 179-186.]
- 邓先余,罗文,谭树华,邱山红,陈康贵. 2008. 黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)“红头病”病原菌迟钝爱德华氏菌(*Edwardsiella tarda*)的分离及鉴定[J]. 海洋与湖沼, 39(5): 511-516. [Deng X Y, Luo W, Tan S H, Qiu S H, Chen K G. 2008. Isolation and identification of bacteriosis pathogen-*Edwardsiella tarda* from yellow catfish(*Pelteobagrus fulvidraco*) with red head disease[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 39(5): 511-516.]
- 丁正峰,薛晖,边文冀,刘丽平,吴光红. 2008. 养殖黄颡鱼腹水症病原研究[J]. 华中农业大学学报, 27(5): 639-643. [Ding Z F, Xue H, Bian W J, Liu L P, Wu G H. 2008. Pathogenic bacteria causing ascites disease of cultured yellow catfish(*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 27(5): 639-643.]
- 国家环境保护总局. 2009. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境出版社. [State Environmental Protection Administration. 2009. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 韩春艳,郑清梅,陈桂丹,刘丽霞. 2014. 不同投喂模式对奥尼罗非鱼生长及体内脂类代谢的影响[J]. 广东农业科学, 41(16): 120-124. [Han C Y, Zheng Q M, Chen G D, Liu L X. 2014. Effects of feeding regimes on growth performance, lipid metabolism of juvenile hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) [J]. Guangdong Agricultural Science, 41(16): 120-124.]
- 韩茂森. 1980. 淡水浮游生物图谱[M]. 北京: 农业出版社. [Han M S. 1980. The freshwater plankton atlas[M]. Beijing: Agriculture Press.]
- 华雪铭,朱站英,邢思华,王军,韩加凤,于宁,周洪琪. 2012. 饥饿对草鱼非特异免疫水平的影响[J]. 动物学杂志, 47(2): 91-97. [Hua X M, Zhu Z Y, Xing S H, Wang J, Han J F, Yu N, Zhou H Q. 2012. Effects of starvation on the non-specific immune parameters of grass carp, *Ctenopharyngodon idellus* [J]. Chinese Journal of Zoology, 47(2): 91-97.]
- 孔凡青,崔文彦,周绪申. 2018. 基于大型底栖动物完整性指数(B-IBI)的永定河水系生态健康评价[J]. 生态环境学报, 27(3): 550-555. [Kong F Q, Cui W Y, Zhou X S. 2018. Health assessment on Yongding River watershed using benthic index of biotic integrity (B-IBI) [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(3): 550-555.]
- 赖坤容,周维博. 2010. 灰色关联分析在延安市宝塔区延河段水质评价中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(5): 570-573. [Lai K R, Zhou W B. 2010. Application of the grey association analysis method to the Yanhe water environmental quality assessment in Yan'an, Shaanxi, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 37(5): 570-573.]
- 黎明民,骆鑫,付家想,蓝文陆. 2018. 基于浮游植物生物完整性的北部湾生态健康评价[J]. 中国环境监测, 34(6): 113-121. [Li M M, Luo X, Fu J X, Lan W L. 2018. Study on phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI) assessment for marine ecosystem health: A case of Beibu Gulf [J]. Environmental Monitoring in China, 34(6): 113-121.]
- 李喆,霍堂斌,唐富江,王念民. 2014. 松花江哈尔滨段冰下浮游生物群落结构与环境因子的相关分析[J]. 水产学杂志, (6): 44-50. [Li Z, Huo T B, Tang F J, Wang N M. 2014. The relationship between community structure of plankton and environmental factors in ice-covered water in Harbin section of Songhua River [J]. Chinese Journal of Fisheries, (6): 44-50.]
- 廖静秋,黄艺. 2013. 应用生物完整性指数评价水生生态系统健康的研究进展[J]. 应用生态学报, 24(1): 295-302. [Liao J Q, Huang Y. 2013. Research progress on using index of biological integrity to assess aquatic ecosystem health [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 24(1): 295-302.]
- 林青,由文辉,徐凤洁,俞秋佳,余华光. 2014. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 34(23): 6918-6929. [Lin Q, You W H, Xu F J, Yu Q J, Yu H G. 2014. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dishui Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 34(23): 6918-6929.]
- 刘春池,牛建功,蔡林钢,张人铭. 2017. 伊犁河流域鱼类生物完整性指数构建初探[J]. 淡水渔业, 47(4): 15-22. [Liu C C, Niu J G, Cai L G, Zhang R M. 2017. Preliminary study on fish index of biotic integrity (F-IBI) assessment for Ili River, Xinjiang [J]. Freshwater Fisheries, 47(4): 15-22.]
- 娄方瑞,刘明涛,程光平,介百飞,贾峥,李文红,张曼. 2015. 岩滩水库水质与浮游生物完整性灰色关联分析[J]. 广

- 东农业科学, 42(17): 147-152. [Lou F R, Liu M T, Cheng G P, Jie B F, Jia Z, Li W H, Zhang M. 2015. Grey relation analysis between Plankton-index of biotic integrity and water quality in Yantan reservoir[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 42(17): 147-152.]
- 阮国良, 罗鸣钟, 靳恒, 杨代勤. 2016. 非营养性胁迫后鱼类补偿生长效应的研究进展[J]. 南方农业学报, 47(2): 319-324. [Ruan G L, Luo M Z, Jin H, Yang D Q. 2016. Research advances in compensatory growth of fish suffered non-nutritional stress[J]. Journal of Southern Agriculture, 47(2): 319-324.]
- 苏胜彦, 盘文静, 张希昭, 黄才姬, 张成锋, 唐丹, 徐跑. 2017. 饥饿循环处理对黄河鲤鱼新品系幼鱼补偿生长性能的影响[J]. 上海海洋大学学报, 26(5): 699-705. [Su S Y, Pan W J, Zhang X Z, Huang C J, Zhang C F, Tang D, Xu P. 2017. Effects of cycle of starvation-refeeding on the compensatory growth performance of *Cyprinus carpio haematopterus* new strain juveniles[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 26(5): 699-705.]
- 谭巧, 马芊芊, 李斌斌, 吕红健, 付梅, 姚维志. 2017. 应用浮游植物生物完整性指数评价长江上游河流健康[J]. 淡水渔业, 47(3): 97-104. [Tan Q, Ma Q Q, Li B B, Lü H J, Fu M, Yao W Z. 2017. Ecological health assessment of the upper reaches of the Yangtze River, based on biotic integrity index of phytoplankton[J]. Freshwater Fisheries, 47(3): 97-104.]
- 王成桂, 梁华芳, 陈嘉华. 2017. 饥饿对龙虎斑幼鱼生长和饵料利用的影响[J]. 水产科学, 36(5): 612-616. [Wang C G, Liang H F, Chen J H. 2017. Effect of starvation on growth and feed utilization of juvenile dragon-tiger grouper[J]. Fisheries Science, 36(5): 612-616.]
- 王平, 王云峰. 2013. 综合权重的灰色关联分析法在河流水质评价中的应用[J]. 水资源保护, 29(5): 52-54. [Wang P, Wang Y F. 2013. River water quality evaluation based on grey incidence analysis of comprehensive weight[J]. Water Resources Protection, 29(5): 52-54.]
- 王润, 王晓龙, 田相利, 董双林, 李志凌, 韩笑冰. 2018. 不同循环饥饿—投喂策略对珍珠龙胆石斑鱼生长和水质的影响[J]. 海洋湖沼通报, (4): 68-75. [Wang R, Wang X L, Tian X L, Dong S L, Li Z L, Han X B. 2018. Effects of different feeding models on the growth of *Epinephelus fuscoguttatus* (♀) × *E. lanceolatus* (♂) and water quality [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, (4): 68-75.]
- 魏复盛. 2002. 水与废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社. [Wei F S. 2002. Water and wastewater monitoring and analysis method[M]. The 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 翁建中. 2010. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社. [Weng J Z. 2010. The map of common freshwater floating algae in China[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press.]
- 宣雄智, 李文嘉, 李绍钰, 魏凤仙, 徐彬, 王树启, 刘金根. 2019. 饲料分解对不同养殖水体生态环境的影响[J]. 河南农业科学, 48(11): 163-173. [Xuan X Z, Li W J, Li S Y, Wei F X, Xu B, Wang S Q, Liu J G. 2019. Effects of feed decomposition on the ecological environment of different aquaculture waters[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 48(11): 163-173.]
- 杨燕君, 徐沙, 刘瑞, 许金铸, 施军琼, 吴忠兴. 2017. 基于附石藻类生物完整性指数对汝溪河水生态系统健康的评价[J]. 水生生物学报, 41(1): 228-237. [Yang Y J, Xu S, Liu R, Xu J Z, Shi J Q, Wu Z X. 2017. Using epilithic algae assemblages to assess stream health of the Ruxi River, China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 41(1): 228-237.]
- 姚清华, 颜孙安, 郭清雄, 胡兵, 林虬. 2018. 养殖密度对瓦氏黄颡鱼幼鱼生长品质和生化指标的影响[J]. 福建农业学报, 33(7): 670-675. [Yao Q H, Yan S A, Guo Q X, Hu B, Lin Q. 2018. Effects of stocking density on growth performance and parameters of *Pelteobagrus vachelli* juveniles[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 33(7): 670-675.]
- 曾令清, 彭韩柳依, 王健伟, 庞旭, 曹振东, 付世建. 2015. 南方鲇幼鱼运动代谢的个体变异和重复性及其饥饿响应[J]. 水产学报, 39(1): 52-64. [Zeng L Q, Peng H L Y, Wang J W, Pang X, Cao Z D, Fu S J. 2015. Repeatability and variation in locomotion metabolism of the juvenile southern catfish during starvation[J]. Journal of Fisheries of China, 39(1): 52-64.]
- 翟国静. 1996. 灰色关联分析在水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, (3): 183-187. [Zhai G J. 1996. Application of grey correlation analysis in water quality evaluation[J]. Water Resources and Power, (3): 183-187.]
- 张觉民, 何志辉. 1991. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社. [Zhang J M, He Z H. 1991. Handbook for survey of fishery natural resources in inland waters[M]. Beijing: Agriculture Press.]
- 张婷, 马行厚, 王桂苹, 李德亮, 金斌松, 秦海明. 2014. 鄱阳湖国家级自然保护区浮游生物群落结构及空间分布[J]. 水生生物学报, 38(1): 158-165. [Zhang T, Ma X H, Wang G P, Li D L, Jin B S, Qin H M. 2014. Community structure and spatial distribution of plankton in the Poyang Lake national nature reserve, China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 38(1): 158-165.]
- 章新, 贺石磊, 张雍照, 陈思, 高军省. 2010. 水质评价的灰色关联分析方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 21(5): 117-119. [Zhang X, He S L, Zhang Y Z, Chen S, Gao J S. 2010. Study on grey relational analysis method for water quality assessment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 21(5): 117-119.]
- 周凤霞, 陈剑虹. 2005. 淡水微型生物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社. [Zhou F X, Chen J H. 2005. Microbiological atlas of fresh water[M]. Beijing: Chemical Industry Press.]
- 周劲风, 温琰茂. 2004. 珠江三角洲基塘水产养殖对水环境的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 43(5): 103-106. [Zhou J F, Wen Y M. 2004. Effects of fish aquaculture

- on water environment in the Zhujiang River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 43(5):103-106.]
- 朱文婷, 钱玮, 于森, 宣雄智. 2019. 基于微生物完整性指数的苏州市湿地健康评价[J]. 环境科学研究, 32(3):423-430. [Zhu W T, Qian W, Yu M, Xuan X Z. 2019. Health evaluation of wetlands in Suzhou City based on microbiome index of biotic integrity[J]. Research of Environmental Sciences, 32(3):423-430.]
- 朱站英, 华雪铭, 于宁, 邢思华, 王军, 周洪琪. 2012. 草鱼蛋白质和脂肪代谢对饥饿胁迫的响应[J]. 水产学报, 36(5):756-763. [Zhu Z Y, Hua X M, Yu N, Xing S H, Wang J, Zhou H Q. 2012. Response of lipid and protein metabolism of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) to starvation[J]. Journal of Fisheries of China, 36(5):756-763.]
- Ali M, Nicieza A G, Wootton R J. 2003. Compensatory growth in fishes: A response to growth depression[J]. Fish and Fisheries, 4(2):147-190.
- Azodi M, Ebrahimi E, Motaghi E, Morshedi V. 2015. Metabolic responses to short starvation and re-feeding in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Ichthyological Research, 62(2):177-183.
- Blanquet I, Oliva-Teles A. 2010. Effect of feed restriction on the growth performance of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) juveniles under commercial rearing conditions [J]. Aquaculture Research, 41(8):1255-1260.
- Blocksom K A, Kurtenbach J P, Klemm D J, Fulk F A, Cormier S M. 2002. Development and evaluation of the Lake Macroinvertebrate Integrity Index (LMII) for New Jersey lakes and reservoirs [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 77(3):311-333.
- Huang G Q, Wei L, Zhang X, Gao T. 2008. Compensatory growth of juvenile brown flounder *Paralichthys olivaceus* (Temminck & Schlegel) following thermal manipulation [J]. Journal of Fish Biology, 72(10):2534-2542.
- Karr J R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 6(6):21-27.
- Lenz P H, Hower A E, Hartline H K. 2005. Temperature compensation in the escape response of a marine copepod, *Calanus finmarchicus* (Crustacea) [J]. Biological Bulletin, 209(1):75-85.
- Ode P R, Rehn A C, May J T. 2005. A quantitative tool for assessing the ecological condition of streams in southern coastal California streams [J]. Environmental Management, 35:493-504.
- Peres H, Santos S, Oliva-Teles A. 2011. Lack of compensatory growth response in gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles following starvation and subsequent refeeding [J]. Aquaculture, 318(3-4):384-388.
- Stoddard J L, Larsen D P, Hawkins C P, Johnson R K, Norris R H. 2006. Setting expectations for the ecological condition of running waters: The concept of reference condition [J]. Ecological Applications, 16(4):1267-1276.

(责任编辑 罗 丽)