

陆基推水集装箱循环水养殖系统中浮游植物群落结构特征

赵秀侠, 方婷, 陈金良, 高娜, 陈诚, 卢文轩

引用本文:

赵秀侠, 方婷, 陈金良, 高娜, 陈诚, 卢文轩. 陆基推水集装箱循环水养殖系统中浮游植物群落结构特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 869–878.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0838>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沉水植物对罗氏沼虾养殖系统的水质调控效应

缪艳阳, 高志宝, 李旭光, 周军, 许志强, 徐宇, 林海

农业环境科学学报. 2023, 42(3): 652–661 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0834>

农村污染河道生态修复中浮游植物的群落特征

刘娅琴, 刘福兴, 宋祥甫, 邹国燕, 付子轼, 潘琦

农业环境科学学报. 2015, 34(1): 162–169 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.01.023>

白洋淀流域水文连通对浮游植物群落的影响

田艺苑, 杨薇, 刘强, 王烜, 赵彦伟

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1538–1547 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1337>

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397–2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

添加藻类和有机肥对罗非鱼养殖水体浮游植物群落结构的影响

孟顺龙, 李丹丹, 裘丽萍, 胡庚东, 范立民, 宋超, 吴伟, 郑尧, 陈家长, 邢旭文

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2099–2105 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0417>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵秀侠, 方婷, 陈金良, 等. 陆基推水集装箱循环水养殖系统中浮游植物群落结构特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 869–878.

ZHAO X X, FANG T, CHEN J L, et al. Characteristics of the phytoplankton community in a land-based container aquaculture system with recycling water[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(4): 869–878.

陆基推水集装箱循环水养殖系统中 浮游植物群落结构特征

赵秀侠^{1,2}, 方婷^{1,2}, 陈金良³, 高娜^{1,2}, 陈诚^{1,2}, 卢文轩^{1,2*}

(1. 安徽省农业科学院水产研究所, 合肥 230001; 2. 水产增殖养殖安徽省重点实验室, 合肥 230001; 3. 安徽有机良庄农业科技股份有限公司, 安徽 太和 236629)

摘要:为研究陆基推水集装箱循环水养殖模式中养殖水体及净化系统浮游植物群落结构特征, 于2021年10月对集装箱养殖中华鲟(*Acipenser sinensis*)水体与净化处理系统水体中的浮游植物及水质理化因子进行分析, 并运用多样性指数、均匀度指数等评价养殖水体与净化水体的浮游植物群落结构特征。结果显示: 在养殖水体中共鉴定出浮游植物4门17属21种, 在净化系统水体中共鉴定出8门51属93种, 净化系统水体中浮游植物种类数显著大于养殖水体的($r=0.918, P<0.01$)。在养殖水体中, 浮游植物丰度与生物量分别为 $2.816 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.021 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 优势种主要为类颤鱼腥藻(*Anabaena oscillarioides*)和颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*); 在净化系统水体中, 浮游植物丰度与生物量平均值分别为 $1.135 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.763 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 优势种为被甲栅藻(*Scenedesmus armatus*)、二形栅藻(*Scenedesmus dimorphus*)、顶锥十字藻(*Crucigenia apiculata*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、细小平裂藻(*Merismopedia minima*)等; 净化系统水体浮游植物丰度与生物量显著高于养殖水体的($P<0.01$), 且优势种种类较多。净化系统水体浮游植物的多样性指数、均匀度指数等均显著高于养殖水体的($P<0.05$), Shannon-Wiener多样性指数与Pielou均匀度指数显示养殖水体为 β -中污染水平, 净化系统水体为轻污染水平。冗余分析(RDA)结果显示, 影响集装箱循环水养殖水体与净化系统水体浮游植物群落的主要理化因子为pH、比电导率(SPC)、溶解氧(DO)与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等, 净化系统水体浮游植物群落主要与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、光照等因子有关。研究表明, 在实际生产中可通过调控水质条件控制集装箱循环水养殖系统与净化系统水体中浮游植物群落结构来维护养殖模式的良好运行。

关键词:集装箱循环水养殖模式; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 冗余分析

中图分类号: Q948.8 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)04-0869-10 doi:10.11654/jaes.2022-0838

Characteristics of the phytoplankton community in a land-based container aquaculture system with recycling water

ZHAO Xiuxia^{1,2}, FANG Ting^{1,2}, CHEN Jinliang³, GAO Na^{1,2}, CHEN Cheng^{1,2}, LU Wenxuan^{1,2*}

(1. Fisheries Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Aquaculture and Fishery Enhancement of Anhui Province, Hefei 230001, China; 3. Anhui Organic Liangzhuang Agricultural Science and Technology Company Limited, Taihe 236629, China)

Abstract: To explore the phytoplankton community characteristics in a land-based container aquaculture system with recycling water and

收稿日期: 2022-08-22 录用日期: 2022-10-14

作者简介: 赵秀侠(1981—), 女, 助理研究员, 主要从事渔业水环境资源保护工作。E-mail: xiuxia99@126.com

*通信作者: 卢文轩 E-mail: ahfishery@163.com

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-46); 安徽省现代农业产业技术体系项目([2021]711号); 安徽省农业科学院青年英才项目(QNYC-202108); 铜陵市科技计划项目(20200302052)

Project supported: National Modern Agriculture Industry Technology System(CARS-46); Anhui Academy of Agriculture Technology System([2021]711); Anhui Academy of Agricultural Sciences(QNYC-202108); Science and Technology Plan Projects of Tongling(20200302052)

purification system, we analyzed the phytoplankton community and water physicochemical factors in the culture water of an *Acipenser sinensis* aquaculture container and ecological purification system. Then, we applied Shannon–Wiener diversity index and Pielou evenness index to evaluate the phytoplankton community characteristics. The experiments were carried out in October 2021 at Taihe County, Fuyang City, Anhui Province. The results showed that a total of 21 species (17 genera, 4 phyla) of phytoplankton were detected in the culture water, while 93 species were identified in the purification system, belonging to 8 phyla and 51 genera. The number of phytoplankton species in the purification system was significantly higher than that in the culture water of the land-based container with a recycling water aquaculture mode ($r=0.918$, $P<0.01$). In the culture water, the phytoplankton density and biomass were 2.816×10^5 cells $\cdot$ L $^{-1}$ and 0.021 mg $\cdot$ L $^{-1}$, respectively, and the dominant species were *Anabaena oscillarioides* and *Melosira granulata* var. *angustissima*. In the purification system, the phytoplankton density and biomass were 1.135×10^6 cells $\cdot$ L $^{-1}$ and 0.763 mg $\cdot$ L $^{-1}$, respectively, with the dominant species being *Scenedesmus armatus*, *Scenedesmus dimorphus*, *Crucigenia apiculata*, *Synedra acus*, and *Merismopedia minima*. The purification system had more dominant species of phytoplankton, and the phytoplankton density and biomass were significantly higher than that in culture water ($P<0.01$). The purification system had a higher diversity index and evenness index than the culture system ($P<0.05$), and the water quality was lightly polluted, while the culture system had a β secondary pollution level. Redundancy analysis (RDA) of phytoplankton abundance, biomass, and water environmental factors showed that pH, specific conductance, dissolved oxygen, and NO_3^- -N were the main environmental factors affecting the cultural water and purification system, while NO_3^- -N, NO_2^- -N, and light were the major environmental factors affecting the purification system. Therefore, in actual production, the phytoplankton community structure in land-based container culture water and the purification system can be controlled by regulating water quality to maintain the operation of the aquaculture mode.

Keywords: land-based container with recycling water aquaculture mode; phytoplankton; community structure; environmental factor; redundancy analysis

传统的水产养殖业存在环境污染、资源浪费与设施落后等问题,已不符合现代渔业绿色发展需求。陆基推水集装箱循环水养殖模式因具有节水节地、集约化生产便利等优势而引起关注^[1]。陆基推水集装箱养殖系统一般包括养殖集装箱体与3个进阶式净化处理塘,集装箱养殖尾水经过滤、沉淀、增氧、净化、除菌等处理流程后,重新进入箱体用于水产养殖或水生蔬菜培育等,从而实现养殖尾水循环利用。与传统池塘养殖相比,集装箱养殖模式具有节约用水95%,节省用地75%以上,养殖过程实现自动化控制和精细化管理,不改变土地属性,抗灾性强,养殖密度高等优势^[2-3]。集装箱养殖技术的发展避免了传统池塘养殖业存在的一系列缺陷^[4],促进了我国水产养殖业的绿色智能发展与渔业转型升级。

目前关于陆基集装箱养殖研究多集中在水产品的质量研究,如集装箱养殖模式下大西洋鲑鱼(*Gadus morhua*)、乌鳢(*Channa argus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、马口鱼(*Opsariichthys bidens*)等在肌肉营养价值、组织结构、营养物质利用效率、经济效益方面优于传统池塘养殖模式与溪流养殖模式^[5-8];集装箱养殖大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)时,投喂策略与水温等因素会影响饲料利用率和尾水净化效果等^[3]。关于集装箱养殖尾水净化及对河流水质影响等方面的研究,如鲑鱼(*Salmon*)集装箱养殖尾水改变

了河流中溶解态有机质(DOM)的浓度与细菌降解水平^[9]。有研究基于AQUATOX构建的串联型尾水净化塘,模拟了培植沉水植物和添加低密度滤食性鱼类的生物处理方法,为集装箱式循环水养殖模式的喂养结构调整与水生态系统组分调控等提供了借鉴^[10]。有研究采用Ulva方法筛选目标物种与菌株等进行集装箱养殖尾水中浮游植物生物修复等^[11-12]。但目前关于集装箱养殖系统养殖尾水净化处理工艺中水质、浮游植物群落结构等系统性研究鲜见报道。鉴于此,本文通过对集装箱养殖水体与净化塘中水质状况、浮游植物群落结构特征进行调查分析,并运用冗余分析探讨浮游植物群落组成与环境因子的关系,为集装箱循环水养殖模式的水质调控及系统维护运行提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 养殖尾水处理系统与处理流程

试验于2021年10月29日在阜阳市太和县双浮镇安徽有机良庄农业科技股份有限公司陆基集装箱循环水养殖基地进行,养殖集装箱底部呈10°斜面(宜于集污),箱体规格均为6.1 m(长)×2.4 m(宽)×2.9 m(高),有效养殖水体每箱约为25 m³。

陆基集装箱循环养殖系统(图1)由集装箱养殖区、微滤机、沉淀池、明渠、三级尾水净化塘与水泵组

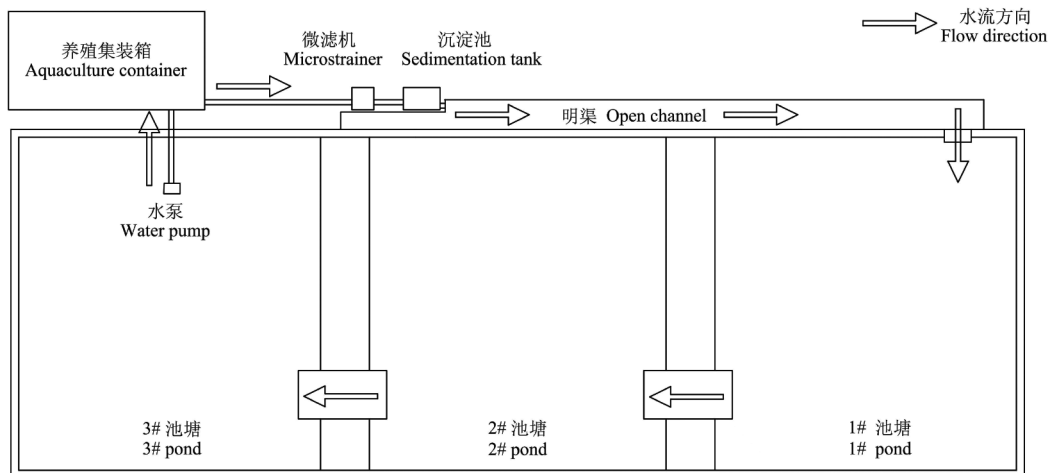


图1 陆基推水集装箱养殖系统结构示意图

Figure 1 The structure diagram of land-based container with recycling water system

成。养殖尾水采用异位处理方法,尾水处理流程为:集装箱底部排出的养殖尾水经PVC(聚氯乙烯)暗管进入沉淀池沉淀预处理,上层水经过微滤机固液分离,以去除90%以上大于0.125 mm的颗粒固体废弃物,尾水进入一级沉淀池,然后通过二级塘(设有生态浮床)净化,经过滤坝流入三级塘,三级塘水用于养殖、灌溉等用途,完成养殖水体循环利用。

集装箱养殖种类为中华鲟(*Acipenser sinensis*),投放规格为750 g·尾⁻¹,放养数量为1 800尾·箱⁻¹,日投喂2次,饵料系数约为0.9,投喂饲料为特种水产饲料。养殖用水为符合国家渔业水质标准的地下水,地下水经抽滤、曝气后用于养殖。养殖期间补充因渗漏、蒸发等损失的养殖用水,箱体内的水每5 h循环1次。

1.2 样品采集与测定方法

根据集装箱养殖尾水处理工艺共设置4个采样点,分别是集装箱内1个,净化系统中1#池塘、2#池塘、3#池塘各1个。采用1 L有机玻璃采水器采集集装箱内养殖水与净化塘内表层水(0~50 cm),每个采样点随机采集3~4次后取混合水样,水样编号:箱体养殖水记作YS-1,净化系统中水体记作JH1、JH2、JH3(分别为一、二、三级净化塘)。

浮游植物样品采集及鉴定方法参照《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[13]和《淡水浮游生物研究方法》^[14]。定性样品用25#浮游生物网(孔径为64 μm)在上层水体呈“∞”字形捞取3~5 min,将滤取的样品放入样品瓶中,并加入鲁哥试剂固定;定量样品用有机玻璃采水器采集1 L水样(表层水与底层水混合),加入水样体积1.5%的鲁哥试剂固定,实验室沉淀、浓

缩,定容为30 mL。同时每个采样点采集混合水样1 L,4℃保存用于水质参数分析。

浮游植物样品经浓缩、定容后,用细小虹吸管移出上清液,最后定容为30 mL。吸取0.1 mL样品注入0.1 mL浮游生物计数框内,在Olympus BX53显微镜(400倍)下进行种类鉴定与细胞计数;计数方法为目镜视野法,每个样本重复计数2~3次,每次观察100个视野,取其平均值,然后换算成单位体积中浮游植物的细胞密度。浮游植物生物量采用细胞体积法推算。

现场采用便携式多参数水质分析仪(YSI Pro-Plus)测定溶解氧(DO)、pH、电导率(Cond)、比电导率(SPC)、水温(WT)、化学需氧量(COD)、氧化还原电位(ORP);采用透明盘测定水体透明度(SD)。叶绿素a(Chl.a)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)指标在实验室内参照相关文献测定^[15]。

1.3 数据处理

运用Margalef物种丰富度指数(D)、Shannon-Wiener物种多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J)及浮游植物优势度等参数分析浮游植物群落结构特征。优势度 $Y \geq 0.02$ 的藻类定为优势种^[16]。各参数计算公式如下:

$$D = (S-1)/\ln N \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S (n_i/N) \times \ln(n_i/N) \quad (2)$$

$$Y = n_i/N \times f_i \quad (3)$$

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

式中: S 为浮游植物总种数; N 为浮游植物个体总数; n_i 为第*i*种浮游植物个体数; f_i 为第*i*种浮游植物各采

样点出现频率。

水质判定标准: $D \geq 4.0$ 为水质清洁, $3.0 \leq D < 4.0$ 为寡污型, $2.0 \leq D < 3.0$ 为 β -中污型, $1.0 \leq D < 2.0$ 为 α -中污型, $D < 1.0$ 为重污型; H' 值 ≥ 4.0 为清洁, $3.0 \leq H' < 4.0$ 为轻污染, $2.0 \leq H' < 3.0$ 为 β -中污染, $1.0 \leq H' < 2.0$ 为 α -中污染, $H' < 1.0$ 为重污染; $0.8 \leq J < 1.0$ 为清洁, $0.5 \leq J < 0.8$ 为轻污染, $0.3 \leq J < 0.5$ 为中污染, $0 \leq J < 0.3$ 为重污染^[16]。

采用Canoco 5.0软件对浮游植物和环境因子进行冗余分析,筛选出相对生物量至少在一个样点大于1%且在各样点的出现频率大于25%的种类进行排序。将浮游植物生物量与水质指标进行lg(x+1)转换处理,使数据符合正态分布。

2 结果与分析

2.1 水体理化特征

试验期间,集装箱养殖水与净化系统水体水质指标情况见表1。养殖水与净化系统水体水温基本保持一致,组间差异不显著;净化系统JH1、JH2、JH3中溶解氧含量逐渐增加,总氮、总磷、氨氮、亚硝态氮略有下降,但差异均不显著。

2.2 浮游植物种类组成与优势种

调查期间,从中华鲟集装箱式养殖水体YS-1中共鉴定出浮游植物4门17属21种,从净化系统水体中共鉴定出浮游植物8门51属93种,其中,JH-1共鉴定

出8门38属60种,JH-2共鉴定出8门42属71种,JH-3共鉴定出7门26属46种(表2)。净化系统水体中浮游植物种类均以绿藻门(Chlorophyta)和硅藻门(Bacillariophyta)为主。从浮游植物种类组成分析,净化系统水体中浮游植物种类数显著大于集装箱养殖水体中的种类数($r=0.918, P<0.01$)。

调查期间, $Y \geq 0.02$ 的浮游植物有19种(表3),主要为绿藻门的被甲栅藻(*Scenedesmus armatus*)、顶锥十字藻(*Crucigenia apiculata*)、二形栅藻(*Scenedesmus dimorphus*)、平壁克里藻(*Klebsormidium scopulinum*)、小空星藻(*Coelastrum microporum*)等,硅藻门的颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)及蓝藻门的细小平裂藻(*Merismopedia minima*)、类颤鱼腥藻(*Anabaena oscillarioides*)等。其中,养殖水体浮游植物优势种为类颤鱼腥藻和颗粒直链藻极狭变种等,生态净化塘水体浮游植物优势种为栅藻(*Scenedesmus*)、变异直链藻(*Melosira varians*)、尖针杆藻、细小平裂藻等。

2.3 浮游植物丰度与生物量

如图2所示,调查期间,集装箱养殖水体浮游植物细胞丰度为 2.816×10^5 cells·L⁻¹,净化系统水体细胞丰度范围为 $1.023 \times 10^6 \sim 1.229 \times 10^6$ cells·L⁻¹,平均值为 1.135×10^6 cells·L⁻¹,净化系统JH-1、JH-2、JH-3浮游植物细胞丰度显著高于养殖系统($P<0.01$)。浮游植物

表1 集装箱养殖水体与生态净化系统水体水质因子情况

Table 1 Water quality factors of aquaculture tail water in the land-based container and ecological purification pond

组别 Treatment	溶解氧 DO/ (mg·L ⁻¹)	pH	水温 WT/℃	总氮 TN/ (mg·L ⁻¹)	总磷 TP/ (mg·L ⁻¹)	氨氮 NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	亚硝态氮 NO ₂ -N/ (mg·L ⁻¹)	化学需氧量 COD/ (mg·L ⁻¹)	叶绿素a Chl.a/ (μg·L ⁻¹)
YS-1	7.8	7.60	18.5	1.849	0.056	1.276	0.276	0.124	16	5.8
JH-1	6.4	7.76	18.1	1.804	0.250	1.223	0.571	0.255	50	98.5
JH-2	8.6	7.87	18.5	1.983	0.098	0.676	0.490	0.125	17	43.7
JH-3	9.6	8.37	18.6	1.907	0.053	0.626	0.420	0.066	22	116.0

表2 集装箱养殖尾水与生态净化塘系统水体中浮游植物主要种类组成

Table 2 Species composition of phytoplankton of aquaculture tail water in the land-based container and ecological purification

组别 Treatment	硅藻门 Bacillariophyta		甲藻门 Dinophyta		金藻门 Chrysophyta		蓝藻门 Cyanophyta		裸藻门 Euglenophyta		绿藻门 Chlorophyta		隐藻门 Cryptophyta		黄藻门 Xanthophyta		合计 Total	
	属	种	属	种	属	种	属	种	属	种	属	种	属	种	属	种	属	种
	Genus	Species	Genus	Species	Genus	Species	Genus	Species	Genus	Species	Genus	Species	Genus	Species	Genus	Species	Genus	Species
YS-1	8	9	0	0	1	1	1	1	0	0	7	10	0	0	0	0	17	21
JH-1	10	18	1	1	1	1	2	2	4	4	17	30	1	2	2	2	38	60
JH-2	11	22	1	1	1	1	2	2	4	4	20	36	1	2	2	2	42	71
JH-3	7	12	1	1	0	0	1	1	1	2	14	27	1	2	1	1	26	46

表 3 集装箱养殖尾水与净化系统水体中浮游植物优势种组成

Table 3 Composition of phytoplankton dominant species in aquaculture tail water of the land-based container and purification pond					
编号 number	优势种 dominant species	YS-1	JH-1	JH-2	JH-3
绿藻门 Chlorophyta					
1	被甲栅藻 <i>Scenedesmus armatus</i>	0.015	0.036	0.023	0.013
2	扁盘栅藻 <i>Scenedesmus platydiscus</i>	0.029			
3	顶锥十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>		0.020	0.026	0.040
4	二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i>		0.054	0.044	0.034
5	平壁克里藻 <i>Klebsormidium scopulinum</i>	0.125	0.106		
6	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>		0.018	0.017	
7	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	0.015			
8	蹄形藻 <i>Kirchneriella lunaris</i>		0.016		
9	纤细月牙藻 <i>Selenastrum gracile</i>	0.015			
10	小空星藻 <i>Coelastrum microporum</i>	0.022		0.015	
硅藻门 Bacillariophyta					
11	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>		0.018	0.024	
12	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.037	0.036	0.040	0.017
13	短小舟形藻 <i>Navicula exigua</i>	0.022			
14	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	0.114			
蓝藻门 Cyanophyta					
15	类颤鱼腥藻 <i>Anabaena oscillarioides</i>	0.278			
16	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>		0.209	0.161	0.070
隐藻门 Cryptophyta					
17	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>		0.029	0.023	
18	啮蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>		0.010		0.030
金藻门 Chrysophyta					
19	分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>	0.066			

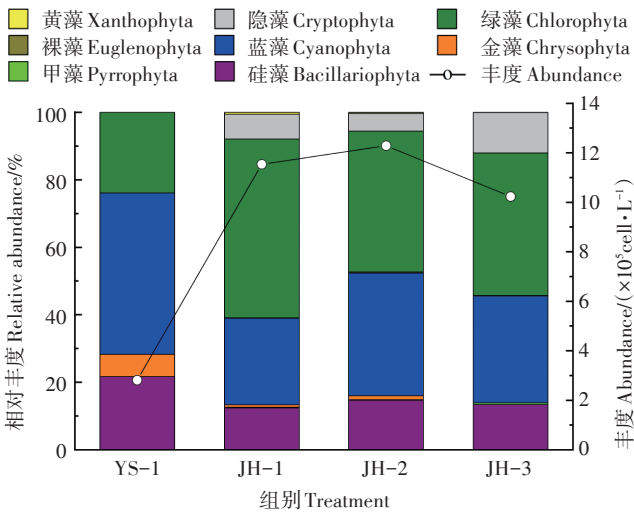


图 2 集装箱养殖水体与生态净化系统水体中浮游植物丰度
Figure 2 Phytoplankton density in the land-based container water and ecological purification pond

细胞丰度在一级净化塘内开始升高,三级净化塘中略有下降,净化系统水体中浮游植物细胞丰度总体变化

趋势为 JH-2>JH-1>JH-3。从浮游植物细胞丰度组成类群可以看出,养殖水体浮游植物细胞丰度主要由蓝藻门、绿藻门与硅藻门类群构成;净化系统水体浮游植物细胞丰度主体为绿藻门、蓝藻门、硅藻门、隐藻门类群。

如图 3 所示,调查期间,集装箱养殖系统水体中浮游植物生物量为 0.021 mg·L⁻¹,净化系统水体中浮游植物生物量范围为 0.703~0.821 mg·L⁻¹,平均值为 0.763 mg·L⁻¹,净化系统 JH-1、JH-2、JH-3 浮游植物生物量显著高于养殖系统 ($P<0.01$)。浮游植物生物量在生态净化塘水体内的变化趋势为 JH-3>JH-1>JH-2。从浮游植物生物量主要组成类群分析,集装箱养殖系统水体中浮游植物生物量主要类群为硅藻门、绿藻门与金藻门类群,而净化系统水体中浮游植物生物量主体为硅藻门、绿藻门与隐藻门类群。

2.4 浮游植物多样性指数

多样性指数分析结果显示(图 4),集装箱养殖系统水体中浮游植物的 D 值显著低于净化系统水体

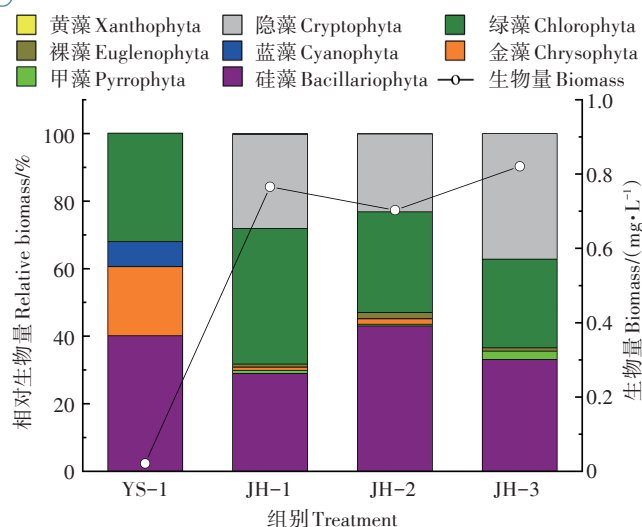


图3 集装箱养殖水体与生态净化系统水体中浮游植物的生物量

Figure 3 Phytoplankton biomass in the land-based container water and ecological purification pond

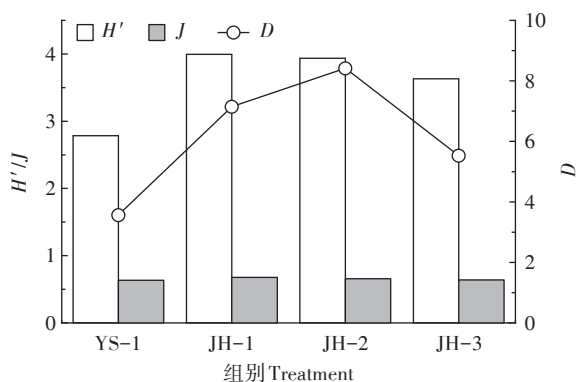
图4 集装箱养殖水体与生态净化系统水体中浮游植物 α 多样性指数

Figure 4 Phytoplankton alpha diversity indexes in the land-based container water and ecological purification pond

($P < 0.05$), 净化系统样点间浮游植物 H' 、 J 差异不显著 ($P > 0.05$)。调查期间, 集装箱与净化系统水体 H' 的范围为 2.78~4.00, D 的范围为 3.57~8.42, J 的范围为 0.63~0.68, 其中 H' 和 J 的最大值均出现在净化系统 JH-1, D 最大值出现在 JH-2。综上分析, 养殖系统水体中 D 、 H' 、 J 均低于净化系统水体。结合多样性指数与均匀度指数所指示的水质状况分析, 养殖水体水质为 β -中污染水平, 净化系统水质为轻污染水平, 净化系统水质总体优于养殖水体水质。

2.5 浮游植物群落相似性

为掌握样点间浮游植物种群差异程度与亲缘关

系的远近, 用样点间的浮游植物群落相似性指数进行判别分析。根据 Venny 相似性系数得出不同样点间相似性值, 结果显示 (图 5): JH-2 浮游植物群落相似性最高, 为 37.8%; 其次为 JH-1, 相似度为 35.0%; JH-3 相似度为 24.5%; YS-1 相似度最低, 为 11.2%; JH-1 与 JH-2 浮游植物相似性为 1.6%, JH-2 与 JH-3、YS-1 与 JH-1 之间相似性均为 1.1%, JH-1 与 JH-3 相似性为 1.6%。上述分析说明样点空间格局的差异会影响浮游植物群落结构的组成。

2.6 浮游植物与环境因子的相关性分析

为进一步明确影响浮游植物群落分布的环境因子, 将浮游植物物种与环境因子进行 RDA 分析。结果表明 (图 6), 影响养殖系统与净化系统水体中浮游植物群落结构的主要环境因子为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DO、SPC、Cond、pH 与 ORP 等, 其中, 影响浮游植物丰度组成的主要因子为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、SPC、pH 等, 影响浮游植物生物量结构的主要环境因子为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DO 与 ORP。与净化系统 JH-1、JH-2 浮游植物群落丰度及生物量组成有显著性相关的环境因子为 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($P < 0.05$)。浮游植物丰度分布分析表明, RDA1 轴的解释量为 72.5%, RDA2 轴的解释量为 18.9%; 在生物量分布分析中, RDA1 轴的解释量为 51.7%, RDA2 轴的解释量为 38.2%。其中, 在浮游植物丰度结构中, RDA1 与 pH 正相关, 相关系数为 0.958, RDA2 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 正相关, 相关系数为 0.917; 在浮游植物生物量分布分析中, RDA1 与 DO 正相关, 相关系数为 0.936, RDA2 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 负相关性最大 (-0.896), 与 ORP 正相关性最大 (0.898)。

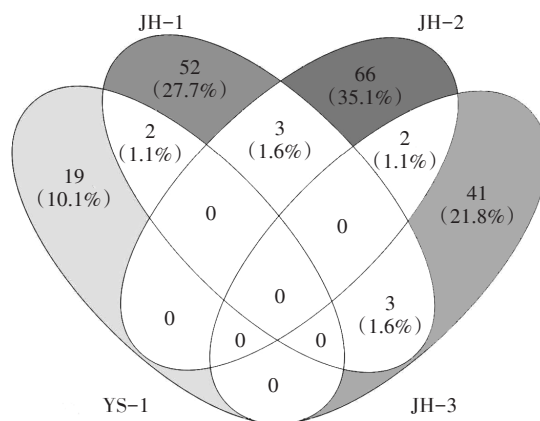
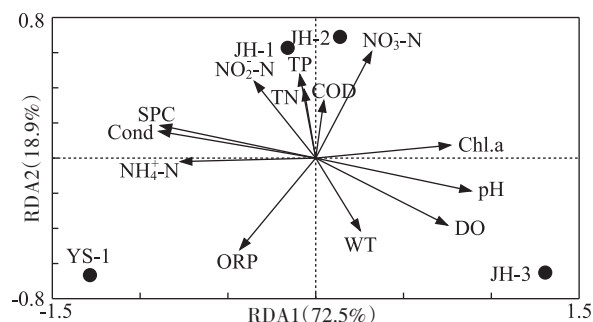
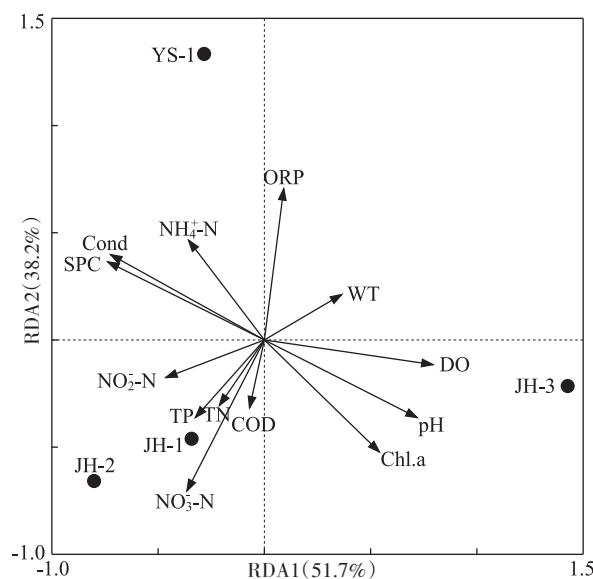


图5 集装箱养殖水体与净化系统水体中浮游植物群落结构相似性分析

Figure 5 Analysis of phytoplankton community similarity by Venny in the land-based container water and ecological purification pond



a. 样点浮游植物丰度与环境因子分析
Phytoplankton density and environmental factors



b. 样点浮游植物生物量与环境因子分析
Phytoplankton biomass and environmental factors

图6 集装箱养殖水及净化系统浮游植物群落与理化因子RDA分析

Figure 6 RDA of phytoplankton community and physico-chemical factors in the land-based container water and purification pond

3 讨论

3.1 养殖系统与净化系统水体中浮游植物群落结构特征

浮游植物优势种类及其数量对浮游植物群落结构的稳定性存在一定的影响^[17]。本研究中,养殖系统与净化系统水体中浮游植物群落优势类群有明显区别,以浮游植物丰度计算优势类群,与养殖系统水体中的蓝藻门类群(累积物种相对丰度占比为47.79%)相比较,净化系统水体的优势类群为绿藻门、蓝藻门与硅藻门等,其中绿藻门物种相对丰度占比均超过41%,净化系统水体中浮游植物优势类群较

多,群落结构趋于稳定状态。有研究表明浮游植物优势类群占比可以用于指示水体的污染状态,蓝-绿藻型是水质营养化程度较高的表征^[18],由此可见,集装箱养殖系统水质营养程度较高。本研究养殖系统水体中的浮游植物主要功能群为鱼腥藻(*Anabaena*)和直链藻(*Melosira*)等,其可以适应水体长期混合搅动、低含氮量、光限制等生态习性^[19-20];且养殖对象中华鲟营底栖的生态习性对底层水体搅动与水循环扰动等因素可能是养殖系统水体中浮游植物群落以蓝藻类群为主的原因,这也进一步说明养殖系统水体营养程度较高。

湿地净化技术是目前水产养殖尾水处理应用较为有效的方法之一^[21],该技术主要利用多功能生态系统的物理过滤、化学吸附、沉淀、植物过滤等方法^[22],可有效去除水产养殖尾水中氮、磷等营养元素^[23-24]。本研究结果表明,净化系统JH-2浮游植物物种属数和优势种较多,且均优于养殖系统。有研究表明生态浮床可以有效去除系统中的营养物质,与浮游植物生长形成竞争,通过上行效应调控浮游植物群落结构组成,达到改善浮游植物群落结构、提高系统稳定性等的效果^[25],这一结论在本研究中得到证明。

3.2 净化系统水体中浮游植物群落多样性

浮游植物群落 α 多样性指数与水质状况有明显相关性,是反映群落结构稳定性的主要指标^[26-27],一般情况下, α 多样性指数越高,说明水体健康状况越好^[28]。有研究表明在鱼菜共生池塘设置生态浮床能显著提升浮游植物Shannon-Wiener指数与均匀度指数^[29];在草鱼养殖池塘设置陶粒浮床具有改善水质、提高浮游植物Shannon-Wiener指数与Simpson指数的作用^[30];在泥鳅养殖池塘,有浮床组的浮游植物物种数明显高于对照组^[31]。上述结论都充分说明生态浮床通过营养盐竞争、根系附着微生物降解等促进了浮游植物物种丰富度,使其群落结构趋于稳定。在本研究中,净化系统水体中浮游植物丰富度指数、多样性指数与均匀度指数均高于养殖系统水体,这与上述研究结论相似,也进一步说明净化系统水体中浮游植物群落结构稳定,水质趋于健康。

多样性指数是群落结构稳定性的主要指标,也与水体健康状况相关^[32]。本研究结果发现,养殖系统水体中浮游植物多样性较低,各指数较低;净化系统从前段到后端,水体中浮游植物多样性指数变化趋势基本一致,Shannon-Wiener指数与Pielou均匀度指数均表现为JH-1>JH-2>JH-3>YS-1,依据Shannon-Wie-

ner多样性指标对水质状况的评价标准,净化系统水体中浮游植物多样性指数均高于养殖系统,表明水质经过净化系统后得到改善。从多样性指数对水质指标指示状况分析可知,养殖系统水质为 β -中污染水平,净化系统水质为轻污染水平,说明净化系统对于集装箱养殖尾水的生态调控效果较好。

3.3 净化系统水体中浮游植物群落结构与环境因子的关系

浮游植物类群具有不同的生理特征,因此适宜生存的环境也有所差异,当水体被扰动时系统中的浮游植物群落结构会受到显著影响^[33]。浮游植物物种与丰度主要与水体营养盐、WT、光照、pH等因素有关^[34]。有研究表明,不同浮游植物种类生长繁殖所适宜的pH范围不同,弱碱性水体中浮游植物的光合作用效率较高^[35],因此浮游植物对营养盐的利用效率受水体pH影响,且浮游植物光合作用可以进一步提高水体pH^[36]。本研究冗余分析结果显示pH、SPC、DO与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是影响净化系统水体中浮游植物群落结构的环境因子,浮游植物丰度及生物量与pH、DO呈显著的正相关关系,说明浮游植物数量、生物量等指标与水体pH为同向性关系,这一结果在太湖流域浮游植物功能类群研究中也得到验证^[37]。

已有研究表明,水体氮、磷营养盐元素是浮游植物生长必需的大量元素,因此水体氮、磷营养元素含量会影响浮游植物群落结构^[38-39]。综合本研究RDA排序结果可知,净化系统JH-1、JH-2浮游植物优势类群为直链藻(*Melosira*)、针杆藻(*Synedra*)、栅藻(*Scenedesmus*)等,丰度及生物量均与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 显著正相关。有研究表明浮游植物对不同质量浓度及形态氮源的利用效率不同^[40],相比较其他形式的氮源,硅藻类群更倾向硝酸盐浓度较高的水体^[41-42]。本研究结果也验证了这一结论。有研究表明硅藻类群偏好低温环境^[43],试验期间,净化系统水体的平均WT为18℃左右,这可能是净化系统水体中硅藻类群为主要优势种的另一原因。

光照是浮游植物光合作用的必需资源,不同浮游植物类群对光强的耐受性和光照变化等衍生出不同生理、生态适应性策略等习性,进而影响浮游植物的种群动态与种间竞争^[44]。本研究表明,净化系统水体中浮游植物丰度与生物量相较于养殖系统水体均有显著增加,可能由于集装箱内光照条件限制和高密度的鲢鱼养殖活动对水体悬浮物的扰动等,抑制了浮游植物的光合作用。有研究发现,蓝藻为低光照耐受型

浮游植物,栅藻为高光强耐受类浮游植物^[45-46],因此集装箱养殖系统水体中优势类群为蓝藻,而净化系统水体中优势类群为绿藻。

4 结论

(1)养殖系统水体中浮游植物优势类群为鱼腥藻(*Anabaena*)、直链藻(*Melosira*),净化系统水体中主要为直链藻(*Melosira*)、针杆藻(*Synedra*)、栅藻(*Scenedesmus*)等。

(2)净化系统能增加陆基集装箱养殖尾水中的浮游植物种类,并提高优势类群的多样性,降低养殖尾水的营养化程度,有利于水质稳定。

(3)养殖与净化系统水体中浮游植物丰度、生物量主要与水体pH、比电导率、溶解氧、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等影响因素有关。在实际生产运行中,可通过调控水体理化因子控制养殖与净化系统水体中浮游植物群落结构组成,维护集装箱循环水养殖系统良好运行。

参考文献:

- [1] TAKEUCHI T. Application of recirculating aquaculture systems in Japan[M]//Overview of land-based recirculating aquaculture, Tokyo: Springer Nature Press, 2017.
- [2] YANG P, ZHAO G H, TONG C, et al. Assessing nutrient budgets and environmental impacts of coastal land-based aquaculture system in southeastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 322: 107662.
- [3] 贾松鹏, 郭晓瑞, 张岚, 等. 投喂频率对陆基推水集装箱养殖大口黑鲈生长的影响[J]. *淡水渔业*, 2021, 51(6): 70-76. JIA S P, GUO X R, ZHANG L, et al. Effects of feeding frequency on the growth of *Micropterus salmoides* cultured in land-based water push container[J]. *Freshwater Fisheries*, 2021, 51(6): 70-76.
- [4] REN C Y, WANG Z M, ZHANG B, et al. Remote monitoring of expansion of aquaculture ponds along coastal region of the Yellow River delta from 1983 to 2015[J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(3): 430-442.
- [5] BADIOLA M, ALBAUM B, CURTIN R, et al. Land based on-growing of Atlantic cod (*Gadus morhua*) using recirculating aquaculture systems: a case study from the Basque region (Northern Spain)[J]. *Aquaculture*, 2017, 468: 428-441.
- [6] 王雅丽, 王语同, 孙晶, 等. 可控式集装箱养殖模式对乌鳢营养组成、组织形态及肠道菌群的影响[J]. *海洋渔业*, 2021, 43(5): 573-585. WANG Y L, WANG Y T, SUN J, et al. Comparison between different *Channa argus* farming modes: analysis of nutritional tissue morphology and intestinal flora[J]. *Marine Fisheries*, 2021, 43(5): 573-585.
- [7] 刘月月, 傅子昕, 张慧娟, 等. 集装箱式与池塘养殖草鱼营养品质的分析比较[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(1): 193-202. LIU Y Y,

- FU Z X, ZHANG H J, et al. Quality comparison of grass carp cultured in containers and ponds[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(1):193-202.
- [8] 周以琳, 周钦, 王扬, 等. 集装箱和溪流养殖马口鱼的营养品质评估[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(1):12-15, 19. ZHOU Y L, ZHOU Q, WANG Y, et al. Nutritional assessment of *Opsariichthys bidens* cultured in containers and streams[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(1):12-15, 19.
- [9] NORBERT K, JORGE N, MOURAD H, et al. Land-based salmon aquacultures change the quality and bacterial degradation of riverine dissolved organic matter[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:43739.
- [10] 冯丽娟, 肖耿锋, 程香菊, 等. 基于 AQUATOX 模型的集装箱养殖尾水净化塘生态系统模拟及调控预测[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(5):1525-1536. FENG L J, XIAO G F, CHENG X J, et al. Simulation and regulation prediction of container aquaculture wastewater-ponds ecosystem based on AQUATOX model[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(5):1525-1536.
- [11] JIANG W W, TIAN X L, LI L, et al. Temporal bacterial community succession during the start-up process of biofilters in a cold-freshwater recirculating aquaculture system. [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 287:121441.
- [12] REBECCA J L, LEONARDO M, ROCKY D N, et al. Correction: Algal bioremediation of waste waters from land-based aquaculture using *Ulva*: selecting target species and strains[J]. *PLoS One*, 2020, 15(3):e0231281.
- [13] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [14] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991. ZHANG Z S, HUANG X F. The method of freshwater algae [M]. Beijing: Environmental Science Press, 1991.
- [15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. JIN X C, TU Q Y. Specification for investigation of lake eutrophication[M]. 2 Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [16] 赵秀侠, 卢文轩, 季索非, 等. 黄河故道安徽段浮游植物群落结构特征及其与环境因子关系[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(7):1297-1306. ZHAO X X, LU W X, JI S F, et al. Relationships between phytoplankton community structure and environmental factors in the old course of Yellow River at Anhui Section[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(7):1297-1306.
- [17] YANG J R, LV H, ISABWE A, et al. Disturbance-induced phytoplankton regime shifts and recovery of cyanobacteria dominance in two subtropical reservoirs[J]. *Water Research*, 2017, 120:52-63.
- [18] BASUMATARY R R, DAS M. Seasonal variation of freshwater blue green algae in Fossaigaon subdivision under Kokrajhar district[J]. *Journal of Global Resources*, 2021, 7:148.
- [19] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1):11-23. HU R, LAN Y Q, XIAO L J, et al. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1):11-23.
- [20] SULASTRI, AKHDIANA I. Phytoplankton diversity and functional group in three urban lakes of Cibinong, West Java, Indonesia[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 744(1):012083.
- [21] DALSGAARD J, AHNEN M V, NAAS C, et al. Nutrient removal in a constructed wetland treating aquaculture effluent at short hydraulic retention time[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2018, 10:329-343.
- [22] GORITO A M, RIBEIRO A R, GOMES C R, et al. Constructed wetland microcosms for the removal of organic micropollutants from freshwater aquaculture effluents[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644:1171-1180.
- [23] 肖茂华, 李亚杰, 汪小昆, 等. 水产养殖尾水处理技术与装备的研究进展[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(1):1-13. XIAO M H, LI Y J, WANG X C, et al. Research progress of aquaculture tail water treatment technology and equipment[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(1):1-13.
- [24] 刘雪, 刘兴国, 曹娟, 等. 一种模块化潜流湿地的构建及其对水产养殖废水处理效果研究[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(5):137-138. LIU X, LIU X G, CAO J, et al. Construction of a modular subsurface wetland and its effect on treatment of aquaculture wastewater [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(5):137-138.
- [25] 袁新程, 施永海, 徐嘉波, 等. 光合细菌与水生植物联合作用对暗纹东方鲀养殖尾水的净化效果[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(4):1311-1320. YUAN X C, SHI Y H, XU J B, et al. Purification efficiency of Takifugu obscurus aquaculture tail water by combination of photosynthetic bacteria and aquatic plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4):1311-1320.
- [26] FONTANA S, THOMAS M K, MOLDOVEAMU M, et al. Individual-level trait diversity predicts phytoplankton community properties better than species richness or evenness[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(2):356-366.
- [27] SHERRY P R, MARCHEE P, JOJE M, et al. Phytoplankton diversity and macroinvertebrate assemblage as pollution indicators in sapangdaku river, Toledo City, Cebu, Philippines[J]. *International Journal of Biosciences*, 2021, 18(3):38-46.
- [28] DING Y T, PAN B Z, ZHAO G N, et al. Geo-climatic factors weaken the effectiveness of phytoplankton diversity as a water quality indicator in a large sediment-laden river[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 792:148346.
- [29] 温晴宇, 李文红, 徐鹏, 等. 强降雨对鱼菜共生池塘水质和浮游植物及细菌群落结构的影响[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(3):632-639. WEN Q Y, LI W H, XU P, et al. Effect of heavy rainfall on water quality, phytoplankton and bacterioplankton communities in aquaponics system[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(3):632-639.
- [30] 李晓莉, 陶玲, 张世羊, 等. 陶粒浮床对草鱼养殖池塘水质和浮游植物的影响[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(3):507-516. LI X L, TAO L, ZHANG S Y, et al. The effects of a new ceramsite ecological

- floating bed on the water quality and phytoplankton in grass carp culture ponds[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(3):507-516.
- [31] 杜兴华, 王妹, 蔡新华, 等. 生物浮床在泥鳅养殖中对水体生境的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2018(1):129-134. DU X H, WANG M, CAI X H, et al. Influence of floating plant bed on habitat of cultured loach (*Paramisgurnus dabryanus*)[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(1):129-134.
- [32] AMIT K S, VISHAL K, ARVIND K S. Water quality and its impact on phytoplankton diversity: a case study of tehri reservoir, Garhwal Himalayas[J]. *Science Archives*, 2021, 1(3):166-173.
- [33] MULYANI L S, MARDIANI R, ARDIANA C, et al. Relationship between distribution of phytoplankton with Cimanuk river water quality [J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2021, 1098(5):052020.
- [34] MATHEUS V S, JASCIELI C B, SUSICLEY J. The phytoplankton community as a descriptor of environmental variability: a case study in five reservoirs of the Paraná River basin[J]. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2022.
- [35] MOURA L C S, DOS SANTOS S M, DESOUSA C A, et al. Phytoplankton richness and abundance in response to seasonality and spatiality in a tropical reservoir[J]. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2021, 33:1-12.
- [36] 龚进玲, 李学梅, 何勇凤, 等. 青鱼-鲢-鳙生态池塘浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 水产科学, 2022, 41(4):517-526. GONG J L, LI X M, HE Y F, et al. Relationship between plankton community structure and environmental factors in ecological culture ponds of black carp *Mylopharyngodon piceus*-silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* and bighead carp *Aristichthys nobilis*[J]. *Fisheries Science*, 2022, 41(4):517-526.
- [37] 罗敏纳, 孙蓓丽, 朱冰川, 等. 太湖流域浮游植物功能类群分布特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5):1471-1488. LUO M N, SUN B L, ZHU B C, et al. Distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in Taihu basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2022, 34(5):1471-1488.
- [38] DOHEE K, JU-HEE L, YEWON C, et al. Phytoplankton nutrient use and CO₂ dynamics responding to long-term changes in riverine N and P availability[J]. *Water Research*, 2021, 203:117510.
- [39] TRIYANA E, WIDOWATI, PUTRO S P. Locally stability analysis of the phytoplankton-nitrogen-phosphate-sediment dynamical system: a study case at Karimunjawa aquaculture system, Central Java[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1397:012066.
- [40] JIE S, QIAN L, ZHU J Y, et al. Influences of nutrient sources on the alternation of nutrient limitations and phytoplankton community in Ji-aoshou Bay, southern Yellow Sea of China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6):2224.
- [41] 郭夏青, 杨悦, 于洋, 等. 2019年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区浮游植物结构特征及其环境影响因素[J]. 天津科技大学学报, 2021, 36(1):48-55. GUO X Q, YANG Y, YU Y, et al. Structural characteristics of and environmental impact on phytoplankton in Changli Gold Coast National Nature Reserve in summer 2019[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2021, 36(1):48-55.
- [42] 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. ZHANG X L, WANG Q, ZHANG G Q, et al. Spatial variation of phytoplankton community structure of in-pond raceway system[J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(3):36-45.
- [43] XIAO W P, LIU X, ANDREW J I, et al. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates[J]. *Water Research*, 2018, 128:206-216.
- [44] REYNOLDS C S. The ecology of fresh water phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984:380-386.
- [45] 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 等. 降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7):3108-3117. WENG C S, LIU D F, ZHANG J L, et al. Influence of rainfall on the *in situ* growth of dominant algae species in Xiangxi River[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7):3108-3117.
- [46] 龚川, 贡丹丹, 刘德富, 等. 不同光照强度下香溪河浮游植物演替过程研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5):1214-1224. GONG C, GONG D D, LIU D F, et al. Phytoplankton succession process in Xiangxi River under different light intensity[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5):1214-1224.

(责任编辑:李丹)