

鲟鱼集约化养殖水生态环境因子相关性分析

徐甜甜^{1*}, 赵威^{2*}, 何志强³, 刘奕麟³, 于洪贤^{1#}, 柴方营³, 王洪成^{3#}

¹东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨

²内蒙古毕拉河国家级自然保护区管理局, 内蒙古 呼伦贝尔

³黑龙江科技大学, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年2月28日; 录用日期: 2022年3月15日; 发布日期: 2022年3月22日

摘要

为更好地了解鲟鱼集约化养殖水浮游生物种类、丰度、生物量等群落特征, 于2021年秋季在北京市鲟龙种业养殖场布设5个采样点, 对浮游生物样品进行采集与分析, 并采用Margalef物种丰富度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数对水质进行评价。通过调查分析, 进水口共采集到浮游植物2门16种、浮游动物3大类11种, 养殖鱼池共采集到浮游植物5门61种、采集到浮游动物2大类39种。通过浮游动植物的指示作用以及利用生物多样性指数进行水质评价, 得出水质处于清洁-中污状态, 而单因素理化指标显示养殖鱼池水质整体处于V类, 进行水质生态系统健康评价还需同时结合水体理化因子、浮游生物指示种等等进行系统的评价。此次调查为鲟鱼集约化养殖水水生生物研究积累了本底资料。

关键词

鲟鱼集约化养殖水, 浮游生物, 多样性指数, 水质

Correlation Analysis of Water Ecological Environment Factors in Sturgeon Intensive Culture

Tiantian Xu^{1*}, Wei Zhao^{2*}, Zhiqiang He³, Yilin Liu³, Hongxian Yu^{1#}, Fangying Chai³, Hongcheng Wang^{3#}

¹Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

*并列第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 徐甜甜, 赵威, 何志强, 刘奕麟, 于洪贤, 柴方营, 王洪成. 鲟鱼集约化养殖水生态环境因子相关性分析[J]. 海洋科学前沿, 2022, 9(1): 39-53. DOI: 10.12677/ams.2022.91006

²Administration of Bila River National Nature Reserve in Inner Mongolia, Hulun Buir Inner Mongolia

³Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang

Received: Feb. 28th, 2022; accepted: Mar. 15th, 2022; published: Mar. 22nd, 2022

Abstract

In order to better understand the community characteristics of plankton species, abundance and biomass in sturgeon intensive culture water, five sampling sites were set up in the sturgeon breeding farm in Beijing in the autumn of 2021 to collect and analyze plankton samples. Margalef species richness index (D), Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index were used to evaluate water quality. Through investigation and analysis, 16 species of phytoplankton in 2 phyla and 11 species of zooplankton in 3 categories were collected in the intake, 61 species of phytoplankton in 5 phyla and 39 species of zooplankton in 2 categories were collected in the aquaculture pond. By indicating the function of planktonic animals and plants and the use of biological diversity index of water quality assessment, it is concluded that the water quality is in clean-corrupt state, and single factor in physical and chemical indicators suggests farmed fish pond water quality whole V class, ecosystem health also needs to evaluate the water quality in water physical and chemical factors of combination, system of evaluation on the plankton indicator species, and so on. This survey accumulated background data for the research of aquatic organisms in sturgeon intensive culture water.

Keywords

Sturgeon Intensive Farming Water, Plankton, Diversity Index, Water Quality

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

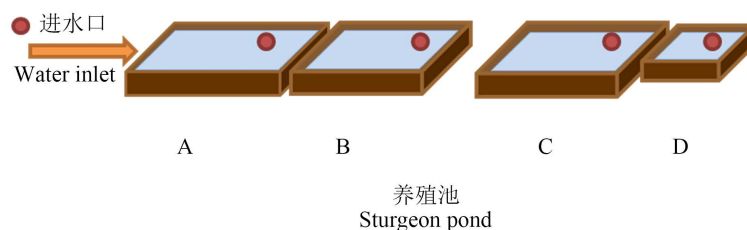
鲟鱼是大约 2 亿年前出现的鲟形目鱼类，隶属于硬骨鱼纲辐鳍亚纲、软骨硬鳞总目鲟形目、鲟科、鲟属，是现存最古老的脊椎动物之一，有活化石之称[1] [2]。在二十世纪，由于偷猎、环境污染、栖息地退化和建造水坝等人类活动干扰鲟鱼产卵迁徙，许多鲟鱼物种都处于极度濒危状态[3]。野生鲟鱼物种越来越少，全世界都在努力恢复鲟鱼的数量。目前，鲟鱼的繁殖主要依赖于人工繁殖，以补充野生种群，自 2000 年以来，中国已成为世界上最大的鲟鱼养殖区[4] [5] [6] [7]。本研究以北京市鲟龙种业养殖场为实验基地，该养殖场孵化全国 80% 的鲟鱼苗种，对水产养殖业的贡献无可比拟，为国家水产养殖做出巨大贡献，这与养殖场池塘区位、水源、地形、沟渠走向、养殖品种等有关。虽然目前已有较多对鲟鱼的野生环境和仿生态环境的研究，但尚未见对养殖鲟鱼生长环境中水生生物群落的报道。目前，基于水生生物群落特征与水环境关系来阐述水体生态状况，指导水体生态修复的研究主要集中于江、河、湖、水库等淡水生态系统中，对于集约化养殖水体的研究工作，仍有待深入。

本研究对鲟鱼集约化养殖水体浮游生物群落分布格局进行系统研究，基于多元统计分析，阐述鲟鱼集约化养殖水体浮游生物群落格局与水体环境因子的相互关系，为我国鲟鱼集约化养殖水生态系统水生生物群落提供基于浮游生物群落的基础生态学依据。

2. 材料与方法

2.1. 采样点布设

2021年9月15日,在北京市鲟龙种业养殖场共设置5个浮游生物采样点,分别为进水口、A池、B池、C池、D池;并记录不同池塘大小、养殖种类、养殖数目状况。浮游生物采样点分布如图1所示。



(A池:长22.5 m、宽8 m、水深1.4 m、池深1.8 m,达氏鳇4尾、俄罗斯鲟40尾、施氏鲟50尾、西伯利亚鲟350尾;B池:长17.5 m、宽8 m、水深1.5 m、池深1.8 m,达氏鳇50尾、西伯利亚鲟160尾;C池:长20 m、宽8.5 m、水深1.4 m、池深2 m,施氏鲟300尾;D池:长5.5 m、宽4.5 m、水深1.4 m、池深1.8 m,施氏鲟50尾。)

Figure 1. Location of sampling sites

图 1. 采样点分布图

2.2. 样品采集与处理

2.2.1. 水环境因子测定

在各采样点使用多参数水质分析测定仪(YSI ProPlus)现场测定水体温度(WT)、溶解氧(DO)、pH、氨氮(NH₃-N)、叶绿素 a (Chl-a)。使用 DR1900 便携式分光光度计测定水体总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)。

2.2.2. 浮游植物的采集、鉴定与计数

浮游植物样品的定性采集用25号浮游植物网采集,在选定的采样点于水面0.5 m深处以每秒20~30 cm的速度作∞形循环缓慢拖动,时长5~10分钟左右,打开活塞,收集浓缩样0~40 ml。带回实验室在10×40倍光学显微镜下观察分类;浮游植物样品的定量采集利用5000 mL采水器,在水深小于3 m的采样点,在水面下约0.5 m处,停留片刻,采集水样;在水深超过3 m的采样点,除了在水面下0.5 m处采集水样外,还需在离水底0.5 m处,再采集一次水样,取得混合水样1000 mL,然后,向采集到的水样中加入15 mL鲁哥氏液,进行固定,经过48 h静置沉淀后,用3~5 mm的橡皮管,虹吸抽掉上清液,余20~25 ml沉淀物转到30 ml的定量瓶,用上清液清洗容器壁,并放入定量瓶中,定容至30 ml。然后摇匀取出0.1 ml水样,利用浮游植物计数框在10×40倍光学显微镜下观察计数,计数时观察100个视野,每个样品观察2片,2片计数之差不大于15%,即视为有效结果,取其平均值,最后换算成每升水样藻类的细胞密度(个/L) [8]。藻类生物量采用细胞体积法推算,单细胞藻类的生物量主要根据藻类个体形状测量而得[9]。浮游植物的分类鉴定均依照《中国淡水藻类—系统、分类及生态》[10]。

2.2.3. 浮游动物的采集、鉴定与计数

浮游动物定性采用13#浮游生物网(孔径为0.112 mm)在水面下0.5 m处划“∞”型大约5~10 min,将滤出液放入样品瓶中并加入4%的甲醛溶液进行现场固定;定量采集使用1 L有机玻璃采水器在不同水层采集10 L的水样,并用25#浮游生物网过滤、收集到样品瓶中,加入4%的甲醛溶液进行现场固定,带回

实验室静置沉淀 48 h 后, 浓缩至 30 mL 的样品瓶中, 参照《原生动植物学》、《淡水浮游生物图谱》[11] [12] 进行样品分类鉴定及生物量换算。

2.3. 数据分析与评价标准

浮游生物群落结构参数计算运用 Margalef 物种丰富度指数(D)、Shannon 物种多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J) (公式 1~4) 及浮游生物优势度等参数分析浮游生物群落结构特征[13] [14] [15]。优势度值 $Y \geq 0.02$ 的浮游生物定为优势种。各参数计算公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^s \frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N} \quad (1)$$

$$D = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

$$Y = \frac{N_i}{N} \times f_i \quad (4)$$

式中: S 为浮游生物总种数; N 为浮游生物个体总数; N_i 为第 i 种浮游生物个体数; f_i 为第 i 种浮游生物各采样点出现频率。

利用 SPSS20.0 软件进行相关性分析; 利用 Canoco5 软件包对浮游生物和环境数据进行冗余分析 (RDA)。浮游生物分级评价标准见表 1。

Table 1. The evaluation standard of plankton biodiversity assessment

表 1. 浮游生物分级评价标准

评价指数	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
Margalef 物种丰富度指数 D	>5	4~5	3~4	0~3
Shannon-Wiener 多样性指数 H'	>3	2~3	1~2	0~1
Pielou 均匀度指数 J	>0.8	0.5~0.8	0.3~0.5	0~0.3

3. 结果与分析

3.1. 浮游植物群落特征

3.1.1. 物种组成及优势种

本次调查进水口共采集到浮游植物 2 门 16 种(表 2), 其中绿藻门种类最多, 有 10 种(占 62.50%); 其次为硅藻门, 有 6 种(占 37.50%)。

养殖池共采集到浮游植物 5 门 61 种(表 3), 其中硅藻门种类最多, 有 36 种(占 59.02%); 其次为绿藻门, 有 17 种(占 27.86%); 蓝藻门种类 4 种(占 6.56%); 再其次为裸藻门, 物种数为 3 种(占 4.91%); 甲藻门最少, 为 1 种(占 1.64%)。硅藻门、绿藻门合计占鉴定总数 86.88%, 是秋季鲟鱼养殖池浮游植物的主要组成类群。如图 2 所示, A 号池浮游植物种类数最多, 为 34 种, 而 B 号池物种数较少, 为 24 种。根据优势度的计算结果, 鲟鱼养殖池浮游植物优势种主要有 11 种, 分别为硅藻门的中型脆杆藻($Y = 0.107$)、谷皮菱形藻($Y = 0.085$)、短小舟形藻($Y = 0.227$)、短肋羽纹藻($Y = 0.208$)、尖针杆藻($Y = 0.229$)、湖北小环藻($Y = 0.068$)、近缘桥弯藻($Y = 0.208$)、普通等片藻($Y = 0.127$); 绿藻门的短鼓藻($Y = 0.046$)、小球藻($Y = 0.052$); 裸藻门的旋转囊裸藻($Y = 0.033$)。

Table 2. The list of phytoplankton in intake**表 2.** 进水口浮游植物名录

门	种	拉丁名
绿藻门	小球藻	<i>Chlorella vulgaris</i>
	衣藻属	<i>Chlamydomonas sp.</i>
	短鼓藻	<i>Cosmarium abbreviatum</i>
	近膨胀鼓藻	<i>Cosmarium subtumidum</i>
	双眼鼓藻	<i>Cosmarium bioculatum</i>
	二叉四角藻	<i>Tetraëdron bifurcatum</i>
	英克斯四棘鼓藻	<i>Arthrodesmus incus</i>
	具尾四角藻	<i>Tetraëdron caudatum</i>
	螺旋弓形藻	<i>Schroederia spiralis</i>
	水溪绿球藻	<i>Chlorococcum infusionum</i>
	硅藻门	谷皮菱形藻
尖针杆藻		<i>Synedra acus</i>
肘状针杆藻		<i>Synedra ulna</i>
近缘桥弯藻		<i>Cymbella affinis</i>
平片针杆藻		<i>Synedra tabulata</i>
普通等片藻		<i>Diatoma vulgare</i>

Table 3. The list of phytoplankton in sturgeon ponds**表 3.** 鲟鱼养殖池浮游植物名录

门类	种类	拉丁名
硅藻门	北方羽纹藻	<i>Pinnularia borealis</i>
	扁圆卵形藻	<i>Cocconeis placentula</i>
	变绿脆杆藻	<i>Fragilaria virescens</i>
	变异直链藻	<i>Melosira vaians</i>
	短肋羽纹藻	<i>Pinnularia brevicostata</i>
	短小舟形藻	<i>Navicula exigua</i>
	钝脆杆藻	<i>Fragilaria capucina</i>
	高雅羽纹藻	<i>Pinnularia gentilis</i>
	谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>
	湖北小环藻	<i>Cyclotella hubeiana</i>
	尖辐节藻	<i>Stauroneis acuta</i>
	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>
	近缘桥弯藻	<i>Cymbella affinis</i>
	近缘曲壳藻	<i>Achnanthes affinis</i>
	颗粒直链藻极狭变种螺旋变型	<i>Melosira granulata var. angustissima f. spiralis</i>
	库津小环藻	<i>Cyclotella kuetzingiana</i>
	两头针杆藻	<i>Synedra amphicephala</i>
	卵圆双眉藻	<i>Amphora ovalis</i>
	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>

Continued

	膨胀桥弯藻	<i>Cymbella tumida</i>
	平片针杆藻	<i>Synedra tabulata</i>
	普通等片藻	<i>Diatoma vulgare</i>
	普通肋缝藻	<i>Frustulia vulgaris</i>
	强壮短缝藻	<i>Eunotia valida</i>
	双尖菱板藻	<i>Hantzschia amphioxys</i>
	双头辐节藻	<i>Stauroneis anceps</i>
	瞳孔舟形藻矩形变种	<i>Navicula pupula</i> var. <i>rectangularia</i>
	尾裸藻	<i>Euglena caudata</i>
	系带舟形藻	<i>Navicula cincta</i>
	线形菱形藻	<i>Nitzschia linearis</i>
	线性舟形藻	<i>Navicula graciloides</i>
	箱形桥弯藻	<i>Cymbella cistula</i>
	缢缩异极藻	<i>Gomphonema constrictum</i>
	缢缩异极藻头状变种	<i>Gomphonema constrictum</i> var. <i>capitatum</i>
	隐头舟形藻	<i>Navicula cryptocephala</i>
	中型脆杆藻	<i>Fragilaria intermedia</i>
蓝藻门	拟短形颤藻	<i>Oscillatoria subbrevis</i>
	栖霞席藻	<i>Phormidium diguetii</i>
	水华束丝藻	<i>Aphanizomenon flosaquae</i>
	开氏念珠藻	<i>Nostoc kihlmani</i>
裸藻门	不定囊裸藻	<i>Trachelomonas incertissima</i>
	相似囊裸藻	<i>Trachelomonas similis</i>
	旋转囊裸藻	<i>Trachelomonas volvocina</i>
绿藻门	不显著辐射鼓藻	<i>Actinotaenium inconspicuum</i>
	丛球韦斯藻	<i>Westella botryoides</i>
	短鼓藻	<i>Cosmarium abbreviatum</i>
	鼓藻属	<i>Cosmarium</i> sp.
	尖形栅藻	<i>Scenedesmus acutiformis</i>
	卷曲纤维藻	<i>Ankistrodesmus bernardii</i>
	雷尼鼓藻	<i>Cosmarium regnellii</i>
	螺旋弓形藻	<i>Schroederia spiralis</i>
	似囊衣藻	<i>Chlamydomonas pseudagloe</i>
	四足十字藻	<i>Crucigenia tetrapedia</i>
	椭圆卵囊藻	<i>Oocystis elliptica</i>
	线纹新月藻	<i>Closterium sriolaum</i>
	线性拟韦斯藻	<i>Westellopsis linearis</i>
	小球藻	<i>Chlorella vulgaris</i>
	小新月藻	<i>Closterium venus</i>
	衣藻属	<i>Chlamydomonas</i> sp.
	硬弓形藻	<i>Schroederia robusta</i>
甲藻门	角甲藻	<i>Ceratium hirundinella</i>

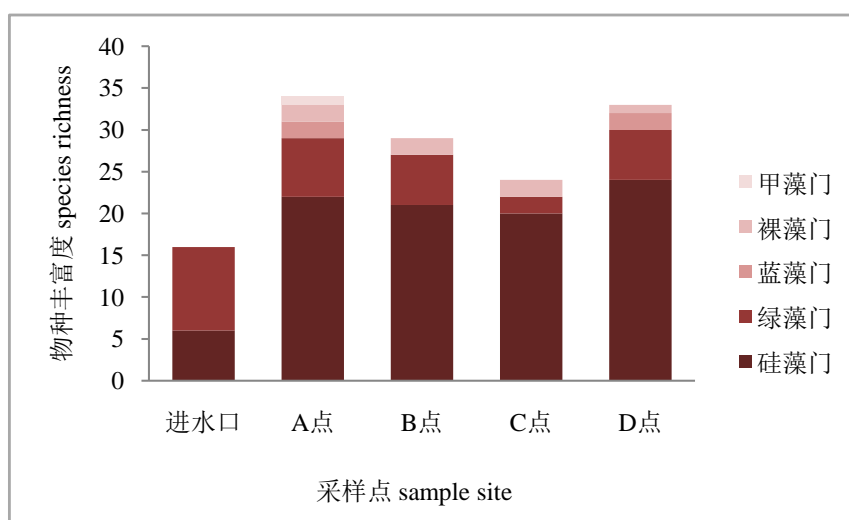


Figure 2. The phytoplankton species composition at different sampling sites
图 2. 各采样点浮游植物种类组成

3.1.2. 丰度和生物量

本次调查进水口浮游植物丰度为 7.8×10^5 cells/L, 游植物总的生物量 1.564 mg/L。鲟鱼养殖池各采样点浮游植物丰度为 $13.2 \times 10^5 \sim 21.36 \times 10^5$ cells/L, 浮游植物平均丰度为 16.86×10^5 cells/L; 浮游植物总的生物量为 18.284 mg/L, 平均生物量为 4.571 mg/L。各采样点浮游植物丰度和生物量有显著差异 ($p < 0.01$), 如图 3 所示, 浮游植物丰度最高点位于 D 池, 生物量最高点位于 A 池。从浮游植物相对丰度和相对生物量来看, 均是硅藻门占绝对优势, 其次是绿藻门占优势。

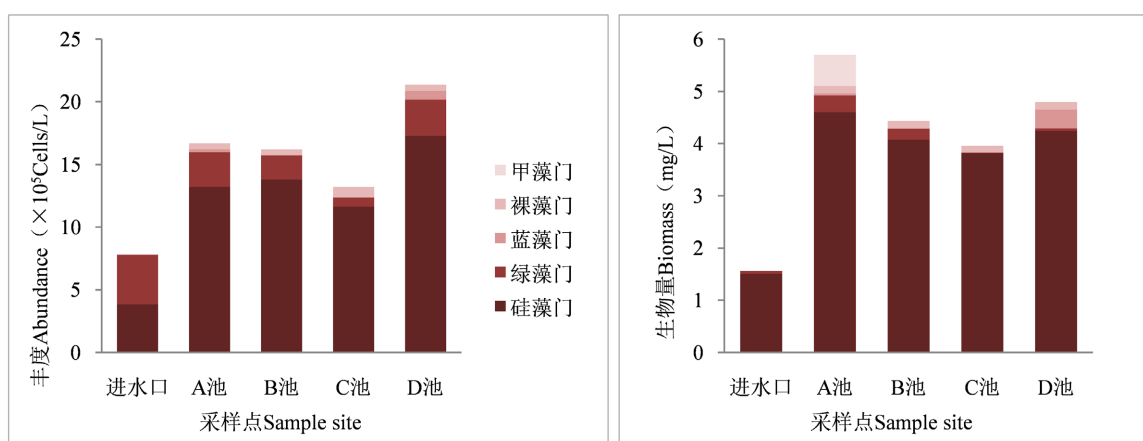


Figure 3. Abundance and biomass of phytoplankton in water intake and aquaculture pond
图 3. 进水口、养殖池各采样点浮游植物丰度和生物量分布

3.1.3. 浮游植物群落多样性

本次调查进水口浮游植物 Margalef 物种丰富度指数 (D) 为 3.59、Shannon 物种多样性指数 (H') 为 3.46、Pielou 均匀度指数 (J) 为 1.25。鲟鱼养殖池各采样点浮游植物 Margalef 物种丰富度指数 (D) 平均值约为 5.81, 介于 4.89~6.48, 最大值同样位于 D 池, 最小值位于 C 池。Shannon-Wiener 指数平均值约为 4.53, 各点无明显差异; Pielou 均匀度指数 (J) 平均值约为 1.34, 各点无明显差异 (如图 4)。

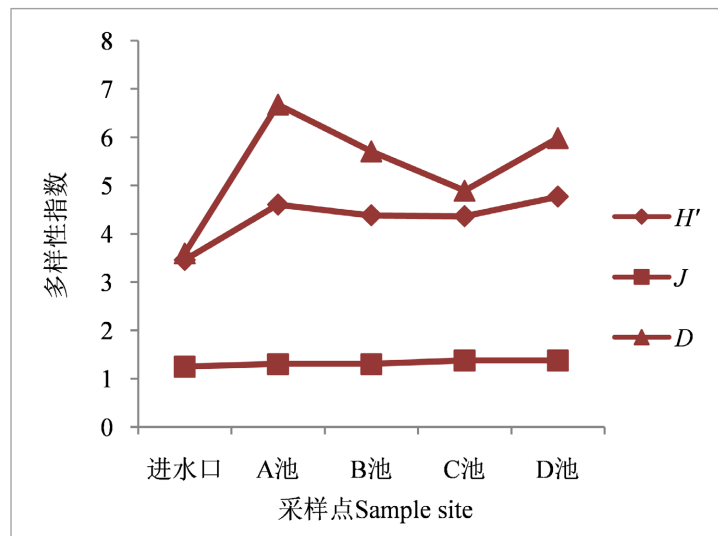


Figure 4. Distribution of diversity index of phytoplankton in water intake and aquaculture pond

图 4. 进水口、养殖池各采样点浮游植物多样性指数分布

3.2. 浮游动物群落特征

3.2.1. 物种组成及优势种

本次调查进水口鉴定出浮游动物 3 大类 11 种(表 4), 其中轮虫 8 种, 占浮游动物总物种数的 72.7%, 原生动物 2 种, 占 18.2%, 桡足类 1 种, 占 9.1%。养殖池鉴定出浮游动物 2 大类 39 种(表 5), 其中轮虫 23 种, 占浮游动物总物种数的 58.9%, 原生动物 16 种, 占 41.1%。根据优势度计算得出, 鲟鱼养殖池浮游动物优势种主要有 5 种, 分别为螺形龟甲轮虫($Y = 0.08$)、狭颈宿轮虫($Y = 0.06$)和原生动物中的白钟虫($Y = 0.04$)、尾草履虫($Y = 0.03$)、郝氏皱甲轮虫($Y = 0.02$)。

Table 4. The list of zooplankton in intake

表 4. 进水口浮游动物名录

门	种	拉丁名
轮虫	曲腿龟甲轮虫	<i>Keratella valga</i>
	螺形龟甲轮虫	<i>Keratella cochlearis</i>
	缘板龟甲轮虫	<i>Keratella ticinensis</i>
	团状聚花轮虫	<i>Conochilus hippocrepis</i>
	独角聚花轮虫	<i>Conochilus unicornis</i>
	缺刻镜轮虫	<i>Testudinella incisa</i>
	蒲达臂尾轮虫	<i>Brachionus budapestiensis</i>
	壮疆前翼轮虫	<i>Proales reinhardti</i>
原生动物	团球领鞭虫	<i>Sphaeroeca volvox</i>
	尾草履虫	<i>Paramecium caudatum</i>
桡足类	无节幼体	<i>Nauplius</i>

Table 5. The list of zooplankton in sturgeon ponds
表 5. 鲟鱼养殖池浮游动物名录

门	种	拉丁名
轮虫	半圆巨冠轮虫	<i>Sinantherina semibullata</i>
	叉角拟聚花轮虫	<i>Conochilloides dossuarius</i>
	独角聚花轮虫	<i>Conochilus unicornis</i>
	盖氏晶囊轮虫	<i>Asplanchna priodonta</i>
	沟痕泡轮虫	<i>Pompholyx sulcata</i>
	钩状狭甲轮虫	<i>Colurella uncinata</i>
	郝氏皱甲轮虫	<i>Ploesoma hudsoni</i>
	巨猎轮虫	<i>Rotaria macroceros</i>
	鳞状叶轮虫	<i>Notholca squamula</i>
	螺形龟甲轮虫	<i>Keratella cochlearis</i>
	盘镜轮虫	<i>Testudinella patina</i>
	缺刻镜轮虫	<i>Testudinella incisa</i>
	羣栖巨冠轮虫	<i>Sinantherina socialis</i>
	三翼鬚足轮虫	<i>Euchlanis triquetra</i>
	噬食箱轮虫	<i>Cupelopagis vorax</i>
	梳状疣毛轮虫	<i>Synchaeta pectinata</i>
	水生枝胃轮虫	<i>Enteroplea lacustris</i>
	狭颈宿轮虫	<i>Habrotrocha angusticollis</i>
	义角聚花轮虫	<i>Conochilus dossuarius</i>
	长柄巨冠轮虫	<i>Sinantherina procerata</i>
长圆腔轮虫	<i>Lecane ploenensis</i>	
真足哈林轮虫	<i>Harringia cupoda</i>	
原生动物	白钟虫	<i>Vorticella alba</i>
	杯钟虫	<i>Vorticella cupifera</i>
	巢居法帽虫	<i>Phryganella nidulus</i>
	池沼多核变形虫	<i>Pelomyxa palustris</i>
	池沼筒变虫	<i>Vahlkampfia lacustris</i>
	多小核草履虫	<i>Paramecium multimicronucleatum</i>
	筒筒变虫	<i>Vahlkampfia vahtkampfia</i>
	囊毛变形虫	<i>Trichamoeba osseosaccus</i>
	扭曲管叶虫	<i>Trachelophyllum sigmoides</i>
	奇观盖氏虫	<i>Glaeseria mira</i>
	蠕形长吻虫	<i>Lacrymaria vernicularis</i>
	瞳孔长吻虫	<i>Lacrymaria pupula</i>
	透明螺足虫	<i>Cochliopodium bilimbosum</i>
	尾草履虫	<i>Paramecium caudatum</i>
圆柱前管虫	<i>Prorodon teres</i>	
沼囊变形虫	<i>Saccamoeba limna</i>	

3.2.2. 丰度和生物量

本次调查进水口浮游动物丰度为 10.72 ind./L, 生物量为 0.0078 mg/L。养殖池各采样点浮游动物丰度为 9.38~22.11 ind./L, 浮游植物平均丰度为 13.23 cells/L; 浮游动物生物量范围为 0.0133~0.0347 mg/L, 平均生物量为 0.0227 mg/L。如图 5 所示, 浮游动物丰度的峰值出现在 A 池, 其他各点无明显差异; 其生物量峰值也出现在 A 池, 最低值出现在进水口。各采样点丰度和生物量大致呈现出丰度越高, 生物量也越高的趋势。从浮游动物相对丰度来看, 进水口、B 池、C 池主要是轮虫占优势, 而 A 池和 D 池中轮虫和浮游动物持平。从浮游动物相对生物量来看, 进水口是以桡足类占主要优势, 其余样点均为轮虫占主要优势。

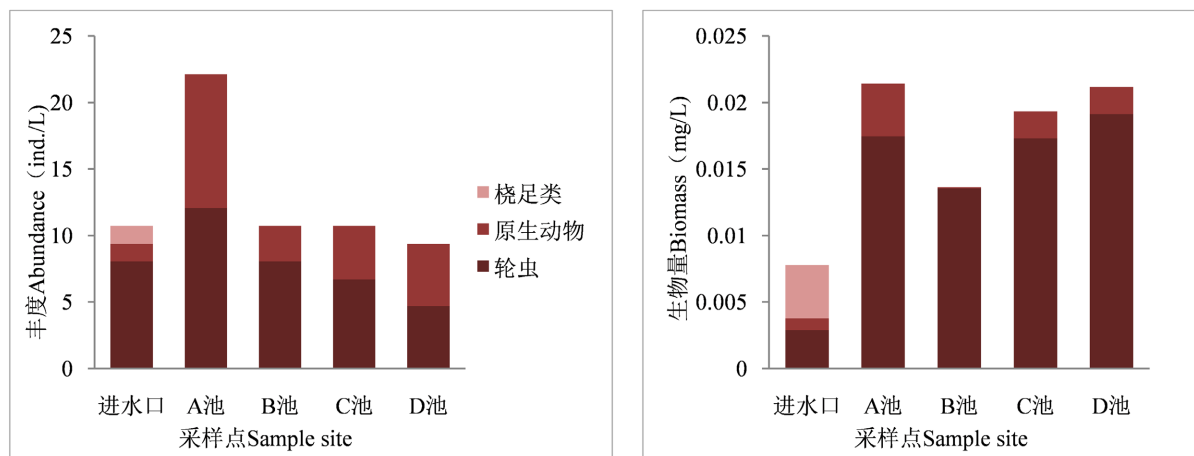


Figure 5. Abundance and biomass of zooplankton in water intake and aquaculture pond

图 5. 进水口、养殖池各采样点浮游动物丰度和生物量分布

3.2.3. 浮游动物多样性

本次调查进水口浮游动物 Margalef 物种丰富度指数(D)为 3.60、Shannon 物种多样性指数(H')为 3.63、Pielou 均匀度指数(J)为 1.51。鲟鱼养殖池各采样点浮游动物 Margalef 物种丰富度指数(D)平均值约为 4.18, 介于 3.60~5.72, 最大值位于 A 池, 其它各点无明显差异; Shannon-Wiener 指数平均值约为 3.54, 介于 3.32~4.16, 最大值位于 A 池, 其它各点无明显差异; Pielou 均匀度指数(J)平均值约为 1.38, 各点无明显差异(如图 6)。

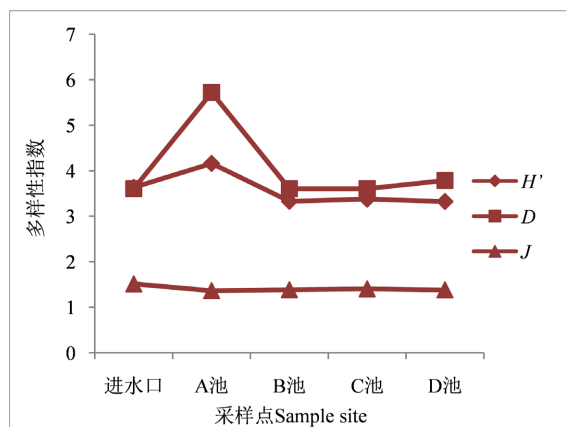


Figure 6. Distribution of diversity index of zooplankton in water intake and aquaculture pond

图 6. 进水口、养殖池各采样点浮游动物多样性指数分布

3.3. 环境因子

鲟鱼集约化养殖场调查过程中环境因子变化如表 6 所示。其中水温恒温, 为 16℃, 该温度最适宜鲟鱼生长; 各采样点整体偏碱性, 养殖池 pH 值均大于进水口; 叶绿素 Chl-a 进水口较低, 四个养殖池平均值为 1.975; 进水口总氮值为 1.2 mg/L, 四个养殖池平均值为 3.53 mg/L, 均较高; 进水口氨氮值为 0.108 mg/L, 四个养殖池平均值为 0.357 mg/L; 进水口总磷值为 0.025 mg/L, 四个养殖池平均值为 0.197 mg/L; 进水口溶解氧为 8.01 mg/L, 四个养殖池平均值为 9.30 mg/L; 化学需氧量 C 池最高, 为 7.4 mg/L, B 池化学需氧量最低, 为 5.4 mg/L。PH、总氮、氨氮、总磷值、溶解氧均为养殖池大于进水口。

Table 6. The main environmental parameters in water intake and aquaculture pond
表 6. 采进水口、养殖池各采样点的主要环境参数

环境因子 Environment factor	进水口	A 池	B 池	C 池	D 池
水温 WT/°C	16°C	16°C	16°C	16°C	16°C
酸碱度 PH	8.2	8.45	8.59	8.58	8.55
叶绿素 Chl-a	0.2	1.9	1.7	2.2	2.1
总氮 TN/(mg/L)	1.2	3.0	3.6	3.4	4.1
氨氮 NH ₃ -N/(mg/L)	0.108	0.369	0.312	0.378	0.369
总磷 TP/(mg/L)	0.025	0.213	0.158	0.187	0.231
化学需氧量 COD/(mg/L)	6.6	5.9	5.4	7.4	5.9
溶解氧 DO/(mg/L)	8.01	9.01	9.59	9.47	9.12

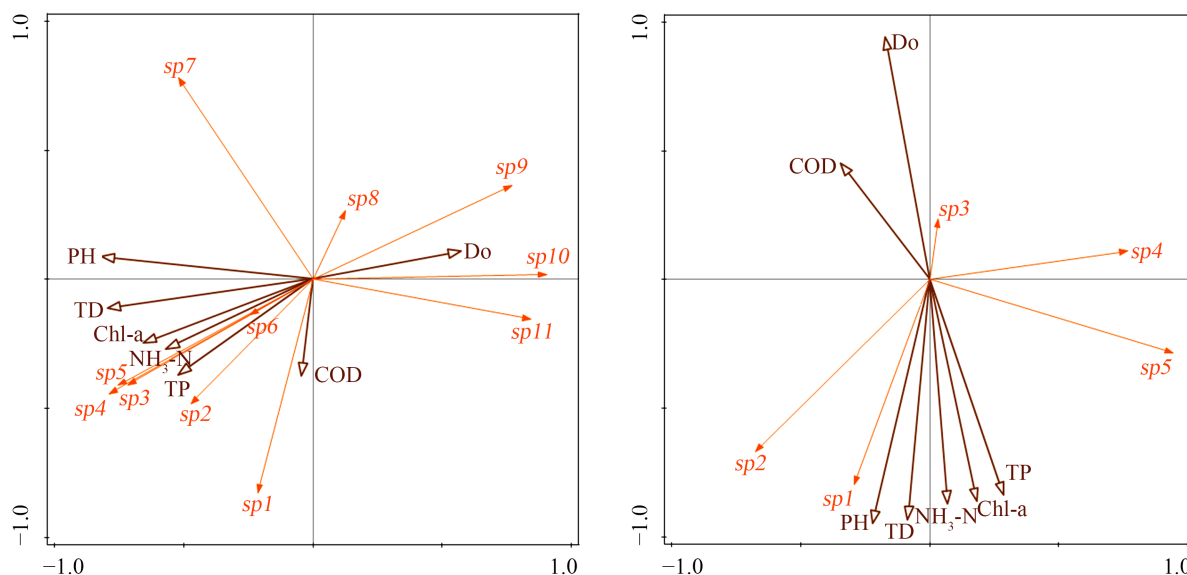
3.4. 浮游生物与环境因子的 RDA 分析

选取鲟鱼集约化养殖场各样点 16 种浮游生物优势种($Y \geq 0.02$)与的 8 个环境因子首先进行 DCA 分析, 结果显示最大梯度长度为 1, 小于 3, 因此对物种数据与环境因子数据作 RDA 分析, 研究浮游生物丰度与环境因子间的关系。结果显示: 浮游植物前两个轴的特征值分别为 0.485 和 0.266, 共解释了群落变异程度的 75.09%, 物种和环境因子相关系数均达到 1; 浮游动物前两个轴的特征值分别为 0.628 和 0.231, 共解释了群落变异程度的 85.86%, 物种和环境因子相关系数均达到 1。上述数据表明排序能够很好地反映浮游生物丰度与环境因子之间的关系。由图 7 (左)可知, 鲟鱼集约化养殖场浮游植物的大部分物种分布在第二排序轴的左侧, 与 TN、TP、NH₃-N、PH、COD、叶绿素 Chl-a 呈正相关, 与溶解氧呈负相关; 谷皮菱形藻、短鼓藻、针尖杆藻、小球藻 TN、TP、NH₃-N、PH、叶绿素 Chl-a 呈负相关, 与溶解氧呈正相关; 普通等片藻与 PH、TD 呈正相关。浮游动物优势种中, 白钟虫、狭颈宿轮虫、郝氏披甲轮虫与 TN、TP、NH₃-N、PH、叶绿素 Chl-a 呈正相关, 与 COD、DO 具有负相关性; 螺形龟甲轮虫与 COD、DO 具有正相关性, 与 TN、TP、NH₃-N、PH、叶绿素 Chl-a 负相关; 尾草履虫与 DO 呈正相关性。

4. 讨论

4.1. 鲟鱼集约化养殖水浮游生物群落分布特征

此次调查进水口共采集到浮游植物 2 门 16 种, 其中绿藻门种类占多, 其次为硅藻门; 采集到浮游动物 3 大类 11 种, 其中种类数轮虫 > 原生动物 > 桡足类。养殖池共采集到浮游植物 5 门 61 种, 其中种类数硅藻门 > 绿藻门 > 蓝藻门 > 裸藻门 > 甲藻门; 共采集到浮游动物 2 大类 39 种, 其中轮虫种类占多, 其次为原生动物。进水口与养殖池浮游生物种类组成差别较大, A、B、C、D 四个鱼池的浮游生



(左图: sp1 中型脆杆藻 *Fragilaria intermedia*, sp2 近缘桥弯藻 *Cymbella affinis*, sp3 短小舟形藻 *Navicula exigua*, sp4 旋转裸囊藻 *Trachelomonas volvocina*, sp5 短肋羽纹藻 *Pinnularia brevicostata*, sp6 湖北小环藻 *Cyclotella hubeiana*, sp7 普通等片藻 *Diatoma vulgare*, sp8 谷皮菱形藻 *Nitzschia palea*, sp9 短鼓藻 *Cosmarium abbreviatum*, sp10 针尖杆藻 *Synedra acus*, sp11 小球藻 *Chlorella vulgaris*。右图: sp1 白钟虫 *Vorticella alba*, sp2 狭颈宿轮虫 *Habrotrocha angusticollis*, sp3 螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*, sp4 尾草履虫 *Paramecium caudatum*, sp5 郝氏披甲轮虫 *Ploesoma hudsoni*)

Figure 7. RDA sequence of phytoplankton (left), zooplankton (right) and environmental factor

图 7. 浮游植物(左)、浮游动物(右)与环境因子的 RDA 排序图

物也具有差异,这说明养殖业对水质的影响较大,且养殖池水质与养殖物种、养殖数目、鱼池大小存在重要的关联。研究表明,中国河流水体浮游植物主要以硅藻、绿藻为主[16] [17] [18] [19],本研究也得到同样的结果。进水口处于山涧溪流水生态系统,温度较低、透明度较高、水流速度较快,适合硅藻生存[20]。养殖鱼池硅藻大多为尖杆藻、脆杆藻等有毒性藻类,鱼类滤食掉部分可食用藻类,造成硅藻数远大于绿藻的现象。养殖鱼池浮游动物群落以小型浮游动物轮虫和原生动物为主,大型浮游动物较少,表明下级营养级捕食压力较大,而轮虫和原生动物种外竞争压力较小[21]。进水口存在少量的无节幼体,可能是水温较低造成的[22],而养殖鱼池中不存在无节幼体,无节幼体主要以滤食细菌为主,低温不利于细菌的生长繁殖,且养殖鱼池定期进行消毒消杀,更无法为无节幼体提供丰富的食物来源。

4.2. 鲟鱼集约化养殖水浮游生物多样性与水质状况

生物多样性指数是通过浮游生物的种类、丰度、生物量等客观反映水体环境对生物产生的综合叠加效应[22],一般来讲,生物多样性指数越高,代表群落结构越稳定、水质状况越好。进水口浮游生物 Margalef 物种丰富度指数评价显示水体呈现中度污染水平,浮游生物 Pielou 均匀度指数和 Shannon-Wiener 指数评价显示水体呈现清洁状态;而养殖鱼池 Margalef 物种丰富度指数评价显示水体整体呈现清洁 - 中度污染水平,浮游生物 Pielou 均匀度指数和 Shannon-Wiener 指数评价显示水体呈现清洁状态。养殖鱼池水虽为活水,但养殖生物高密度聚集,养殖生物可排泄大量的含氮化合物和含磷化合物,且饵料投喂过程中,只有 20%~30%的氮、15%~30%的磷被鱼体吸收利用,其余的则直接排入水体[23] [24] [25],而单因素理化指标显示养殖鱼池水质 TN、TP 均偏高,根据《地表水环境质量标准》[26],养殖鱼池水质整体处于 V 类,从中足以看出不同的水质评价指标体系显示出不同的评价结果[27],但反观其浮游植物物种组成,却

发现大多为有害种, 因此各个多样性指数较好只能说明其生态系统处于较稳定的状态, 进行水质生态系统健康评价还需更系统、更全面的去考虑, 需同时结合水体理化因子、浮游生物指示种、浮游生物生物量及丰度的评价结果[28]。

4.3. 环境因子对浮游生物群落结构的影响

浮游生物群落结构受多种环境因子的综合影响, 比如水温、pH、溶氧、透明度和是影响浮游动物群落的直接因子, N、P 等营养盐类可通过影响浮游植物群落结构分布和种类组成发生改变而间接影响浮游动物, 浮游动物对浮游植物的下行控制效应, 对浮游生物的群落结构有重要的影响[29] [30] [31] [32] [33]。本研究 RDA 分析表明硅藻种大多数种类与 TN 含量关系密切, 硅藻种大多数种类为淡水水域生境广布种, 耐受于中污性水体, 常附着在水底岩石或有机碎屑表面, 喜欢在营养盐相对较高的水体环境中生活, 通常高浓度的氮含量有利于维持其的持续生长[34] [35]。而谷皮菱形藻、针尖杆藻等与 TN、TP 呈负相关, 相关研究表明, 在一些淡水水体中, 氮磷等营养盐在特定环境下对浮游动植物的生长也存在抑制作用[36] [37]。从 RDA 排序图可知, 大多数浮游动植物生物量与 Chl-a 关系密切, 已有研究表明 Chl-a 的浓度变化可反映水体中浮游植物现存量的变化[38]。TN、TP、NH₃-N 与白钟虫、狭颈宿轮虫、郝氏披甲轮虫呈正相关, 螺形龟甲轮虫、尾草履虫呈负相关, 说明营养盐类会直接影响浮游动物群落结构分布, 且浮游动物滤食浮游植物, 营养盐和 Chl-a 通过改变浮游植物群落结构, 从而间接影响浮游动物的群落结构[31] [39]。RDA 排序图不仅可全面阐述物种和环境因子间的关系, 还能反映各个物种在生活习性上的差异。短小舟形藻、旋转裸囊藻、短肋羽纹藻、湖北小环藻在排序图中位置十分接近, 表明它们对生态环境的适应能力接近; 而中型脆杆藻与谷皮菱形藻虽都为硅藻门, 但是两者在排序图位置较远, 即二者对生态环境的依赖差异较大[40]。

5. 结论

通过对鲟鱼集约化养殖水浮游生物多样性调查与分析, 得出以下结论:

1) 进水口共采集到浮游植物 2 门 16 种, 养殖鱼池共采集到浮游植物 5 门 61 种, 其中硅藻门和绿藻门在种类上占有优势, 优势种种类丰富。

2) 进水口采集到浮游动物 3 大类 11 种, 养殖鱼池共采集浮游动物 2 大类 39 种, 其中轮虫种类占多, 其次为原生动动物。

3) 通过浮游动植物的指示作用以及利用生物多样性指数进行水质评价, 得出水质处于清洁 - 中污状态, 而单因素理化指标显示养殖鱼池水质整体处于 V 类, 因此进行水质生态系统健康评价还需同时结合水体理化因子、浮游生物指示种、浮游生物生物量及丰度等进行系统的评价。

4) 影响鲟鱼集约化养殖水浮游动植物群落结构的环境因子包括 TN、TP、NH₃-N、PH、COD、叶绿素 Chl-a、COD。综合考虑鲟鱼集约化养殖水浮游动植物与环境因子相互影响的关系, 还需建立长期的监测系统, 对维持养殖鱼池生态系统的平衡稳定、评定养殖物种的健康状况等具有重大意义。

基金项目

中央支持高水平人才项目《冷水鱼资源产业化可持续利用集成技术创新》, 项目编号: GSP202014。

参考文献

- [1] Bemis, W.E., Findeis, E.K. and Grande, L. (1997) An Overview of Acipenseriformes. *Environmental Biology of Fishes*, 48, 25-71. <https://doi.org/10.1023/A:1007370213924>
- [2] 张涛, 章龙珍, 赵峰, 等. 西伯利亚鲟不同性别与卵巢发育时期血液性类固醇激素的差异与判别分析[J]. 海洋渔

- 业, 2008, 30(1): 19-25.
- [3] Rushbrooke, M., Jangid, A., Alwis, C.D., *et al.* (2020) The IUCN Red List of Threatened Species.
- [4] Wei, Q.J., *et al.* (2010) Status of Sturgeon Aquaculture and Sturgeon Trade in China: A Review Based on Two Recent Nationwide Surveys. *Journal of Applied Ichthyology*, **20**, 321-332. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2004.00593.x>
- [5] Bronzi, P., Chebanov, M., Michaels, J.T., *et al.* (2019) Sturgeon Meat and Caviar Production: Global Update 2017. *Journal of Applied Ichthyology*, **35**, 257-266. <https://doi.org/10.1111/jai.13870>
- [6] Mahmud, A., Abraha, B., Yang, F., *et al.* (2019) Quality Evaluation of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*) Protein Concentrate Supplemented Noodles. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, **28**, 910-921. <https://doi.org/10.1080/10498850.2019.1663570>
- [7] Billard, R. and Lecointre, G. (2000) Biology and Conservation of Sturgeon and Paddlefish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **10**, 355-392. <https://doi.org/10.1023/A:1012231526151>
- [8] 梁正其, 姚俊杰, 李燕梅. 锦江河国家级水产种质资源保护区浮游植物群落时空变化[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(6): 23-29.
- [9] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 浮游植物生物量研究 I.浮游植物生物量细胞体积转化法[J]. 海洋学报(中文版), 1999(2): 75-85.
- [10] 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: 125-127.
- [11] 沈韞芬, 汪建国. 原生动物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 30-705.
- [12] 韩茂森. 淡水浮游生物图谱[M]. 北京: 农业出版社, 1980: 44-107.
- [13] 赵秀侠, 方婷, 杨坤, 李静, 梁阳阳, 卢文轩. 安徽沱湖夏季浮游植物群落结构特征与环境因子关系[J]. 植物科学学报, 2018, 36(5): 687-695.
- [14] Lampitt, R.S., Wishner, K.F., Turley, C.M. and Angel, M.V. (1993) Marine Snow Studies in the Northeast Atlantic: Distribution, Composition and Role as a Food Source for Migrating Plankton. *Marine Biology*, **116**, 689-702. <https://doi.org/10.1007/BF00355486>
- [15] Belaoussoff, S., Kevan, P.G., Murphy, S. and Swanton, C. (2003) Assessing Tillage Disturbance on Assemblages of Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae) by Using a Range of Ecological Indices. *Biodiversity & Conservation*, **12**, 851-882. <https://doi.org/10.1023/A:1022811010951>
- [16] 孙玉平, 于恒国, 周钦, 刘婷, 李亚运, 马增岭. 典型富营养化城市河流——浙江温瑞塘河的浮游植物群落类型与季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 375-384.
- [17] 王汨, 杨柏贺, 马思琦, 殷旭旺, 徐宗学. 北运河水系浮游植物功能群与水体环境因子的关系[J]. 水产学杂志, 2020, 33(2): 70-76.
- [18] 张丽芳, 李婉丽, 孙倩, 周蕾, 韩雪, 陈明林. 芜湖市花津河浮游植物多样性[J]. 湿地科学, 2017, 15(3): 442-449.
- [19] 王晓玉, 黄雁琳, 白贝贝, 陈明林. 海安市河流和水渠水体中浮游植物群落结构特征[J]. 湿地科学, 2020, 18(4): 446-453.
- [20] 殷燕, 刘玉飞, 陈跃军, 马祺聪, 詹益超, 林文英, 施伟强, 徐露凝. 夏季松阴溪松阳段浮游生物多样性调查与分析[J]. 环境生态学, 2021, 3(8): 33-40.
- [21] 李小艳, 董艳珍, 刘小龙, 亓东明, 杨红. 2018年春季邳海浮游动物群落组成与水质状况研究[J]. 湿地科学, 2020, 18(5): 623-632.
- [22] 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 徐镇, 金春华. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 水生生物学报, 2014, 38(4): 720-728.
- [23] 袁宇, 朱京海, 侯永顺, 胡筱敏. 辽东湾入海污染物调查及海域水质安全分析[J]. 中国安全科学学报, 2008(2): 12-16.
- [24] 张俊新, 刘长发, 魏海峰, 赵不凋, 周小燕. 水力负荷对处理海水和养殖废水的无纺布过滤器性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008(1): 323-326.
- [25] 王华, 刘长发, 秦传新. 用火山石载体生物膜和角叉菜去除水中氮和磷的效果[J]. 大连水产学院学报, 2007(6): 421-425.
- [26] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学, 2020.
- [27] 邢冰伟, 徐季雄, 曹玥, 邓贵平, 庞婉婷, 王全喜. 九寨沟国家级自然保护区长海夏季浮游植物群落结构及生态评价[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1088-1099.

- [28] 杨薇, 田艺苑, 张兆衡, 刘强, 赵彦伟. 近 60 年来白洋淀浮游植物群落演变及生物完整性评价[J]. 环境生态学, 2019, 1(8): 1-9.
- [29] 林海, 王源, 李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7583-7591.
- [30] 李喆, 霍堂斌, 唐富江, 王念民. 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, 2014, 27(6): 44-50.
- [31] 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇. 三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2303-2312.
- [32] 侯兴, 高亚平, 杜美荣, 姜妮妮, 李凤雪, 董世鹏, 李文豪, 孟珊, 王军威, 张义涛, 蒋增杰. 桑沟湾浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 18-27.
- [33] Nydick, K.R., Lafrancois, B.M., Baron, J.S. and Johnson, B.M. (2004) Nitrogen Regulation of Algal Biomass, Productivity, and Composition in Shallow Mountain Lakes, Snowy Range, Wyoming, USA. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **61**, 1256-1268. <https://doi.org/10.1139/f04-085>
- [34] 李春青, 叶闽, 普红平. 汉江水华的影响因素分析及控制方法初探[J]. 环境科学导刊, 2007(2): 26-28.
- [35] 孙晓梅, 刘绍平, 段辛斌, 陈大庆, 韦金明, 于琪, 王珂. 长江中游江段浮游生物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 淡水渔业, 2021, 51(3): 3-12.
- [36] Albay, M. and Akcaalan, R. (2003) Factors Influencing the Phytoplankton Steady State Assemblages in a Drinking-Water Reservoir (Ömerli Reservoir, Istanbul). *Hydrobiologia*, **502**, 85-95. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000004272.38702.c3>
- [37] 竦勇, 霍达, 姜智飞, 周文礼, 乔之怡. 海河入海口表层水体浮游生物群落特征及与环境因子的相关性研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(4): 647-655.
- [38] 刘朋超, 王卫军, 骆启豪, 李彬, 孙国华, 赵强, 张金浩, 杨建敏. 山东半岛南北两侧海域真核浮游生物群落特征及与环境因子的相关性分析[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(4): 876-885.
- [39] 杨雪. 长江中段荆江航道整治工程对浮游生物和底栖动物群落的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
- [40] 陈昕, 李喆, 唐富江, 齐妍, 高文燕, 鲁万桥. 连环湖两水体浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(6): 89-97.