



生态与农村环境学报  
*Journal of Ecology and Rural Environment*  
ISSN 1673-4831, CN 32-1766/X

## 《生态与农村环境学报》网络首发论文

题目: 白莲崖水库浮游植物群落时空分布及其对水质的指示作用  
作者: 陈玉翠, 刘思磊, 陈锦云  
DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2026.0328  
收稿日期: 2026-04-21  
网络首发日期: 2026-08-13  
引用格式: 陈玉翠, 刘思磊, 陈锦云. 白莲崖水库浮游植物群落时空分布及其对水质的指示作用[J/OL]. 生态与农村环境学报.  
<https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2026.0328>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2026.0328

# 白莲崖水库浮游植物群落时空分布及其对水质的指示作用

陈玉翠<sup>1</sup>, 刘思磊<sup>2</sup>, 陈锦云<sup>1①</sup> (1. 淮南师范学院, 资源与环境生物技术安徽普通高校重点实验室, 安徽 淮南 232038; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081)

**摘要:** 白莲崖水库是漫水河上游重要的饮用水源保护地和蒙古红鲢国家级水产种质资源保护区, 评估其水生态系统健康状况尤为关键。为揭示鱼类关键生活史时期(繁殖期与索饵期)浮游植物群落的时空动态及其水质指示作用, 于2022~2024年每年的5月和9月对库区6个点位进行连续定点监测, 运用生物多样性指数、综合营养状态指数(TLI)和典范对应分析(CCA)开展研究。结果表明, 共鉴定出浮游植物6门35科112种(属), 以硅藻(48.21%)、绿藻(29.5%)和蓝藻(12.5%)为主。优势种呈显著的季节分化: 索饵期以直链藻属(*Melosira* sp.)和假鱼腥藻属(*Pseudanabaena* sp.)为主, 繁殖期以小球藻(*Chlorella vulgaris*)和衣藻属(*Chlamydomonas* sp.)为主。时间上, 浮游植物的种类数、丰度和生物量均表现为索饵期>繁殖期, 硅藻门占比最高; 空间上, 细胞丰度从库尾向库首递减, 生物量高值集中于库尾。CCA分析表明, TP、SD、COD<sub>Mn</sub>、pH是驱动群落结构的关键因子, 繁殖期主要受TP、pH的影响, 索饵期主要受SD、COD<sub>Mn</sub>影响。生物多样性指数评价结果低于综合营养状态指数(TLI), 库区整体处于中营养水平, 营养盐分布呈库尾>库中>库首的空间梯度, 库尾有向轻度富营养化发展的趋势。

**关键词:** 白莲崖水库; 浮游植物; 群落特征; 时空分布; 水质指示

**中图分类号:** X171 **文献标识码:** A

**The spatio-temporal distribution of phytoplankton communities in Bailianya Reservoir and their indicative role for water quality.** CHEN Yu-cui<sup>1</sup>, LIU Si-lei<sup>2</sup>, CHEN Jin-yun<sup>1①</sup> (1. Anhui Key Laboratory of Resources and Environmental Biotechnology, Huainan Normal University, Anhui 232038, China; 2. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi, Jiangsu 214081, China)

**Abstract:** The Bailianya Reservoir is an important drinking water source protection area in the upper reaches of the Manshui River and a national aquatic germplasm resource protection area for Mongolian red culter. It is particularly critical to evaluate the health status of its aquatic ecosystem. In order to reveal the temporal and spatial dynamics of phytoplankton communities and their water quality indicators during the key life history periods of fish (breeding period and baiting period), continuous fixed-point monitoring will be carried out at 6 points in the reservoir area in May and September every year from 2022 to 2024, using biodiversity index, comprehensive trophic state index (TLI) and canonical correspondence analysis (CCA) to carry out research. The results showed that

收稿日期: 2026-04-21

基金项目: 安徽省重点水域水生生物资源监测项目(2024BFAFZ02936); 安徽省自然科学基金(1408085MC51); 淮南师范学院科学研究项目(2019XJYB01)

①通讯作者 E-mail: jinyunchen@163.com.

112 species (genera) of phytoplankton, 35 families and 6 phyla, were identified, of which diatoms (48.21%), green algae (29.5%) and cyanobacteria (12.5%) were the main species. The dominant species showed significant seasonal differentiation: *Melosira* sp. and *Pseudanabaena* sp. were predominant during the baiting period, and *Chlorella vulgaris* and *Chlamydomonas* sp. were predominant during the breeding period. In terms of time, the species number, abundance and biomass of phytoplankton showed that the baiting period > the breeding period, and the proportion of diatoms; Spatially, cell abundance decreased from the tail of the reservoir to the first of the reservoir, and the high value of biomass concentrated in the tail of the reservoir. CCA analysis showed that TP, SD, COD<sub>Mn</sub> and pH were the key factors driving community structure. The reproductive period was mainly affected by TP and pH, and the rope-bait period was mainly affected by SD and COD<sub>Mn</sub>. The biodiversity index was lower than the comprehensive nutrient state index (TLI), the reservoir area was in the middle nutrient level, and the nutrient distribution showed a spatial gradient from the tail of the reservoir to the middle of the reservoir, and the tail of the reservoir tended to be slightly eutrophic.

**Keywords:** Bailianya Reservoir; phytoplankton; community characteristics; spatio-temporal distribution; water quality indicator

浮游植物作为水生生态系统中的初级生产者,是水库水生生态系统中的重要组成部分<sup>[1]</sup>,对水环境变化极为敏感,是指示水体营养状态、污染程度和评价水生态系统健康状况的重要参考指标<sup>[2]</sup>,其群落结构和功能特征、种类组成和数量变化能够快速反映水体的营养状况和污染程度,常被用作水质评价的指示生物<sup>[3]</sup>。物种多样性指数是生物多样性指数中应用最广泛的一类评价指标,运用浮游植物多样性评价水质状况弥补了理化监测的局限<sup>[4]</sup>。

水库作为重要的淡水生态系统,在防洪调蓄、供水安全等方面发挥着不可替代的作用<sup>[5]</sup>。近年来,在气候变化与人类活动的双重影响下,部分水库面临着营养盐堆积、藻类异常增殖水生生态功能退化等问题<sup>[6]</sup>,水库水体中浮游植物群落结构特征与河流湖泊不同,研究浮游植物群落特征及其水质状况,是评估水库的水生态健康状况和可持续发展的重要途径,不仅对河道型水库的运行管理具有重要的支撑作用,还可以为分析水库生态系统状况的长期变化趋势及生态修复提供参考依据。因此,耦合分析浮游植物多样性指数与综合营养状态指数之间的响应关系,构建生物-理化协同评价体系,形成群落特征与营养状态的研究视角,评价水生态系统健康状况和指示水体营养状态、污染程度,对维持水库生态系统的稳定和保障水库生态安全具有重要意义。

漫水河流域发源于安徽省霍山县、岳西县、湖北省英山县三县交界的大别山北麓,干流全长79.5km,总流域面积约为760km<sup>2</sup>。该流域属亚热带大陆性季风气候,常年平均降水量约1469mm,是淮河流域淠河水系上游的重要支流,水文特征时空差异明显,流域内水生生物群落呈现梯度分布。白莲崖水库位于该河上游,总库容为4.60亿m<sup>3</sup>,是水利枢纽调蓄型梯级水库,同时承担着漫水河干流上重要的饮用水源保护和蒙古红鲃国家级水产种质资源保护的双重功能,其水环境质量直接影响着区域供水安全与水生态系统的稳定健康和可持续发展。该保护区主要保护对象为蒙古红鲃,库区同时还分布有鲢、鳙、鲤、鲫等为主的经济鱼类<sup>[7]</sup>。从食性看,鲢、鳙是滤食性鱼类,以浮游动植物为主要饵料;鲤、鲫为杂食性鱼类;蒙古红鲃为肉食性鱼类,幼鱼以浮游动物为饵料,成鱼以小型鱼类为食,其繁殖期和索饵盛期集中于5月前后和9月。这些不同食性鱼类在这两个关键时期通过摄食压力与活动扰动对浮游植物群落施加直接或间接调控。河流建库后,水文调控改变了原有河流生态系统的功能<sup>[8]</sup>,但当前淮河流域的相关研究多集中于水质与渔业资源调查,对鱼类饵料生物与水质联合评价的关注较少<sup>[9-11]</sup>,与鱼类生活史需求为监测框架的浮游植物群落研究尤为匮乏。现有水库浮游植

物研究多以水文季节为采样框架,较少耦合鱼类生活史节律需求<sup>[2]</sup>,难以精准识别鱼类关键生命活动的水生态风险。为此,以鱼类群落整体生活史需求为监测体系,将采样时间设置在鱼类关键生活史时期,空间布设依据河道型水库纵向水动力梯度和生境异质性特征,揭示库区浮游植物群落动态与重点保护鱼类生活史的耦合机制,对评估库区水生态系统健康状况尤为关键。

本研究以库区鱼类优势类群的生活史节律作为时间划分依据,选取繁殖期(5月)和索饵期(9月)作为监测窗口,基于连续3年定点监测数据,耦合理化指标、生物多样性指数及CCA分析,旨在构建鱼类生活史需求—浮游植物响应—水质健康预警的框架,重点探讨鱼类繁殖期与索饵期浮游植物群落的演替规律差异、不同生活史阶段的关键环境驱动因子识别,以及浮游植物优势种对鱼类饵料基础稳定性和栖息地质量的指标效应,以期推动水库生态监测从水质评价向鱼类生活史耦合动态预警转变,为水库水环境治理、生态管护及水产种质资源保护区的适应性管理提供科学依据,亦为同类多功能水库生态研究提供参考。

# 1 材料与amp;方法

## 1.1 采样点布设和样品采集

分别于2022~2024年在漫水河蒙古红鲌国家级水产种质资源保护区—白莲崖水库(116° 04' 35" E~116° 10' 50" E, 31° 11' 48" N~31° 15' 47" N)核心区和实验区,依据河道型水库纵向水动力梯度、营养盐输移规律、浮游植物空间异质性和鱼类生境需求布设6个采样点,库首(下游)到库尾(上游)依次为M1~M6(图1)。采样空间分别布设在水库上游中心区入库端附近(M6)、河流汇合处(M3)、中游主库区(M4)、大型库湾静水区(M2、M5)及下游坝前区附近(M1),覆盖库区河流段—过渡段—湖泊段的纵向梯度和主库、库湾等多类典型功能水域。采样时间结合库区鱼类优势类群的关键生活史时期—繁殖期(5月)和索饵期(9月)开展定点监测:繁殖期鱼类对水质、生境和饵料较为敏感,浮游植物群落反映栖息生境质量;索饵期鱼类摄食活动旺盛,藻类群落反映饵料供给水平。同时,5月和9月分别为春夏、夏秋季节交替期,库区水环境、营养盐循环和浮游植物群落演替的重要转折期,可系统体现浮游植物季节动态与水体营养变化特征。连续监测3年,每年采样2次,共获得6期监测数据。

水质采集方法参考《水质:湖泊和水库采样技术指导》(GB/T14581-1993),水质采样时,离水面0.5m处取水,采样时间均在上午8:00~10:00之间进行。

浮游植物定性样品采集时,依照《水环境监测规范》(SL219-2013)使用25号浮游生物网(网孔0.064mm)在各采样点表层水按“∞”字形拖动3~5分钟,然后从水中缓慢提出,将水样集中到网底收集管,打开收集管活塞,把样品转存至浓缩样品瓶中,立即用鲁哥氏液固定,用量为水样体积的1%;浮游植物定量样品采集时,使用1L有机玻璃采水器分别在上层、中层和底层垂向分层采样,各层水样等量混匀后取其1L,立即加入水样量1%的鲁哥氏液固定。静置24h~36h,定量样品定容到30~50mL带回实验室鉴定和计数。

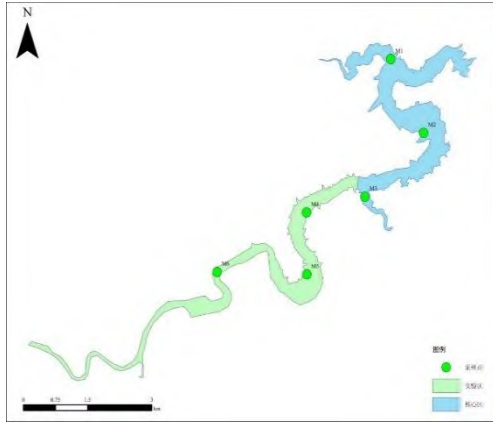


图 1 白莲崖水库监测采样点分布

Fig.1 Distribution of monitoring sampling points in Bailianya Reservoir

## 1.2 样品分析与方法

### 1.2.1 水样

pH、溶解氧 (DO)、浊度 (Tur)、水深 (H) 和水温 (WT) 等水体理化指标, 由YSI 便携式水质监测仪在采样现场进行测定, 透明度 (SD) 使用塞斯盘测定。总氮 (TN)、总磷 (TP)、溶解态总氮(DTN)、溶解态总磷(DTP)、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )、铵盐、叶绿素a (Chl-a)、高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ )、氨氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、石油类、挥发酚和铜(Cu)的实验室分析指标测定均参考《水和废水监测分析方法》<sup>[12]</sup>。

### 1.2.2 浮游植物样品

所有浮游植物样品均在正置显微镜 (Zeiss Imager A2) 下进行种类鉴定。种类鉴定参照《中国淡水藻类—系统、分类及生态》<sup>[13]</sup>进行; 生物量采用细胞体积法进行估算<sup>[14]</sup>; 细胞计数参照《淡水浮游生物调查技术规范》(SC/T 9402-2010)。1L水样中的浮游植物个数(密度)用下列公式计算:

$$N = N_0/N_1 \times V_1/V_0 \times P_n \quad (1)$$

式中,  $N$ —1L水样中浮游植物的数量, 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $N_0$ —计数框总格数;  $N_1$ —计数过的方格数;  $V_1$ —1L水样经浓缩后的体积, mL;  $V_0$ —计数框容积, mL;  $P_n$ —计数的浮游植物个数。

分别采用Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、Margalef丰富度指数( $d$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )<sup>[15-17]</sup>、Simpson优势度指数( $D$ )<sup>[1]</sup>和优势度 ( $Y$ )<sup>[18-19]</sup>分析浮游植物群落特征多样性。各参数用下列公式计算:

$$H' = -\sum p_i \ln p_i \quad (2)$$

$$d = (S-1)/\ln N \quad (3)$$

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

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (5)$$

$$Y = f_i \times P_i \quad (6)$$

$$p_i = n_i/N \quad (7)$$

式中,  $S$  为浮游植物总种数;  $N$  为群落中浮游植物个体总数;  $n_i$  为第  $i$  种浮游植物个体数;  $f_i$  为第  $i$  种浮游植物在各采样点出现频率;  $P_i$  为第  $i$  种个体数量占总个体数量的比例;  $Y \geq 0.02$  的种类确定为优势种<sup>[3]</sup>。

1.2.3 水体营养状态评价方法 分别采用生物学指标和综合营养状态指数评价库区水体营养状态。综合营养状态指数 (TLI) 法, 参照《地表水环境质量评价办法》中的营养状态评价<sup>[20-21]</sup> (表1)。其计算公式如下:

$$TLI(\sum)=\sum_{j=1}^mW_j\times TLI(j)$$

(8)

式中，式中， $TLI(j)$ 表示第  $j$  种参数的营养状态指数； $W_j$ 为第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重。

生物学指标采用浮游植物  $H'$ 、 $d$ 、 $J$  多样性指数评价水体营养状态<sup>[22-23]</sup>（表 1）。Simpson 优势度指数（ $D$ ），当  $D<0.1$  时，群落多样性较高，分布较均匀；当  $0.1\leq D\leq 0.5$  时，中等优势度，可能存在一个或多个优势种；当  $D>0.5$  时，高度集中，优势种占据绝对主导地位<sup>[1]</sup>。

1.2.4 统计分析

使用 ArcGIS10.8 绘制采样图，采用单因素方差分析（One-way ANOVA）和 permanova 检验比较不同季节和不同年份的水环境因子与浮游植物群落的差异显著性，采用物种—环境典范对应分析（CCA）分析浮游植物与环境因子的关系，CCA 分析在 Canoco5.0 软件中完成。期中，除 pH 外所有理化数据在 CCA 分析前均进行了  $\lg(x+1)$  转换。其他基础数据分析在 Excel 2019 中完成。描述性统计值用均值±标准差(Mean±SD)表示。

表1 水体营养化评价标准

Tab.1 Water body nutrient evaluation standards

| 评价指标           | 极贫营养 | 贫营养     | 贫中营养 | 中营养     | 中富营养    | 富营养   | 超富营养 |
|----------------|------|---------|------|---------|---------|-------|------|
| 多样性指数( $H'$ )  |      | >3      |      | 2~3     | 1~2     | 0~1   |      |
| 丰富度 ( $d$ )    | >6   |         | 4~6  | 2~4     | 1~2     | <1    |      |
| 均匀度 ( $J$ )    | >0.8 | 0.5~0.8 |      | 0.3~0.5 | 0.2~0.3 | <0.2  |      |
| 综合营养状态指数 (TLI) |      | <30     |      | 30~50   | 50~60   | 60~70 | >70  |

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构时空特征

2.1.1 种类组成

2022~2024 年在白莲崖水库共调查 6 次，共鉴定出浮游植物 6 门 35 科 112 种(属) (包括变种和变型)，主要以硅藻 (48.21%) 为主，其次为绿藻 (29.5%) 和蓝藻 (12.5%)（表 2）。2022 年调查共鉴定出浮游植物 6 门 28 科 81 种(属)，硅藻门物种数最多，达 42 种(属)，占浮游植物总物种数的 51.9%，其中繁殖期和索饵期分别占 40.9%和 53.1%。2023 年调查共鉴定出浮游植物 6 门 33 科 108 种(属)，硅藻门物种数最多，共 52 种(属)，占浮游植物总物种数的 48.1%，其中繁殖期和索饵期分别占 37.9%和 53.3%。相比 2022 年 81 种（属），2023 年增加 27 种，增幅达 33.3%。2024 年调查共鉴定出浮游植物 6 门 31 科 97 种(属)，硅藻门物种数最多，共 48 种(属)，占浮游植物总物种数的 49.5%，其中繁殖期和索饵期分别占 46.4%和 55.8%。相比 2023 年 108 种（属），2024 年减少 11 种，减幅为 10.2%。种类数季节差异明显，索饵期种类数高于繁殖期，且各期硅藻门的种类数所占比例最高。

表 2 2022~2024 年白莲崖水库浮游植物种类组成

Tab.2 Phytoplankton species composition of Bailianya Reservoir (2022–2024)

| 时间（年）     | 蓝藻门 | 绿藻门 | 硅藻门 | 裸藻门 | 隐藻门 | 甲藻门 | 合计  |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2022~2024 | 14  | 33  | 54  | 4   | 4   | 3   | 112 |
| 2022      | 12  | 21  | 42  | 2   | 2   | 2   | 81  |
| 2023      | 14  | 31  | 52  | 4   | 4   | 3   | 108 |
| 2024      | 13  | 28  | 48  | 3   | 3   | 2   | 97  |

2.1.2 浮游植物细胞丰度和生物量

从浮游植物细胞丰度看，5月各采样点范围为 $(0.94\sim 2.94)\times 10^6\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ ，均值为 $2.15\times 10^6\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ ；9月各采样点范围为 $(2.20\sim 3.71)\times 10^6\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ ，均值为 $3.14\times 10^6\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2023年繁殖期浮游植物细胞丰度均值比2022年上升3.79%，2024年繁殖期浮游植物细胞丰度均值比2023年下降2.74%；2023年索饵期浮游植物细胞丰度均值比2022年上升6.95%，2024年索饵期浮游植物细胞丰度均值比2023年下降2.17%；硅藻门的丰度占比最大，其次是绿藻门和蓝藻门（图2）。浮游植物细胞丰度存在显著季节差异，索饵期丰度显著高于繁殖期（ $p<0.05$ ）。年际间丰度波动较小，库区浮游植物群落整体保持稳定。由图2(b)和图2(c)可见，库区各采样点浮游植物细胞丰度从库尾到库首呈现下降趋势，库尾在繁殖期和索饵期均处于最高水平。

2022~2024年各采样时期浮游植物生物量分布情况如图2所示。5月生物量各采样点均值最高出现在2023年M6，为 $0.71$ ，最低出现在2022年M1，为 $0.61\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；9月生物量各采样点均值最高出现在2023年M6，为 $0.79\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，最低出现在2022年M2，为 $0.65\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图2(e)和图2(f)可见，硅藻门生物量最高，绿藻门次之；各采样点生物量最高值分布在库尾，库尾在繁殖期和索饵期均处于最高水平，且索饵期生物量高于繁殖期（ $p<0.05$ ）。

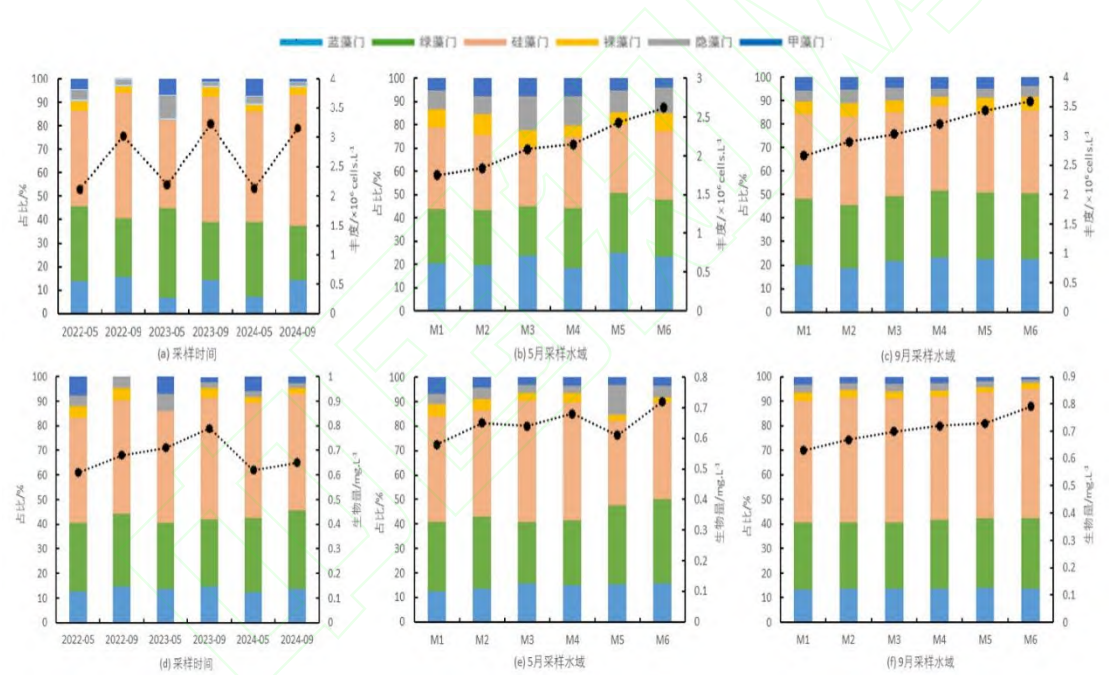


图2 白莲崖水库浮游植物群落结构丰度和生物量时空分布特征（2022~2024）

Fig.2 The spatio-temporal distribution characteristics of Phytoplankton abundance and biomass in Bailianya Reservoir (2022-2024)

2.1.3 浮游植物群落优势种

以优势度指数 $Y\geq 0.02$ 定位优势种，优势度指数 $Y>0.1$ 为绝对优势种。监测结果显示，2022年浮游植物优势种共9种(属)，主要为蓝藻门、绿藻门和硅藻门；2023年浮游植物优势种共18种，主要为蓝藻门和硅藻门；2024年浮游植物优势种共14种(属)，主要为蓝藻门、绿藻门和硅藻门（表3）。优势种在索饵期主要为直链藻属(*Melosira* sp.)和假鱼腥藻属(*Pseudanabaena* sp.)，繁殖期主要为小球藻(*Chlorella vulgaris*)和衣藻属(*Chlamydomonas* sp.)。假鱼腥藻属、衣藻属、小球藻等优势种在调查期间的出现频率都较高，多数为中营养-轻度富营养指示种。

2023年相比2022年，库区浮游植物优势种物种数增加9种；2024年相比2023年，库区浮游植物优势种物种数减少4种。假鱼腥藻属、小球藻、衣藻属、尖针杆藻(*Synedra acus*)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var.*angustissima*)和直链藻属为全年优势种。

表3 2022~2024年白莲崖水库浮游植物优势种及优势度

| Tab.3Dominant species and dominance degree of phytoplankton in Bailianya Reservoir (2022-2024) |     |                                                                                       |        |       |        |       |        |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 门类                                                                                             | 编号  | 优势种                                                                                   | 2022 年 |       | 2023 年 |       | 2024 年 |       |
|                                                                                                |     |                                                                                       | 5 月    | 9 月   | 5 月    | 9 月   | 5 月    | 9 月   |
| 蓝藻门<br>Cyanophyta                                                                              | n5  | 小型色球藻 <i>Chroococcus minor</i>                                                        | 0.027  | -     | -      | -     | -      | -     |
|                                                                                                | n6  | 假鱼腥藻属 <i>Pseudanabaena</i> sp.                                                        | -      | 0.043 | -      | 0.071 | -      | 0.042 |
|                                                                                                | n7  | 阿氏浮丝藻 <i>Planktothrix agardhii</i>                                                    | -      | -     | -      | 0.065 | -      | 0.029 |
|                                                                                                | n9  | 鱼腥藻属 <i>Anabaena</i> sp.                                                              | -      | -     | 0.045  | -     | 0.022  | -     |
|                                                                                                | n11 | 长孢藻属 <i>Dolichospermum</i> sp.                                                        | -      | -     | -      | 0.030 | -      | -     |
|                                                                                                | n12 | 爬行颤藻 <i>Oscillatoria animalis</i>                                                     | -      | -     | -      | 0.027 | -      | -     |
|                                                                                                | n13 | 链状假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena catenate</i>                                                  | -      | -     | -      | 0.022 | -      | -     |
| 绿藻门<br>Chlorophyta                                                                             | n14 | 拉氏拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>                                          | -      | -     | -      | 0.024 | 0.052  | 0.020 |
|                                                                                                | n1  | 小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>                                                         | 0.068  | -     | 0.050  | -     | 0.097  | -     |
|                                                                                                | n2  | 四棘藻属 <i>Attheya zachariasii</i> sp.                                                   | -      | 0.025 | -      | -     | -      | 0.020 |
|                                                                                                | n3  | 纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i> sp.                                                        | -      | -     | 0.026  | -     | 0.023  | -     |
| 硅藻门<br>Bacillariophyta                                                                         | n4  | 衣藻属 <i>Chlamydomonas</i> sp.                                                          | 0.096  | -     | 0.075  | -     | 0.116  | -     |
|                                                                                                | n8  | 尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>                                                              | 0.028  | -     | 0.032  | -     | 0.021  | -     |
|                                                                                                | n10 | 针杆藻属 <i>Synedra</i> sp.                                                               | -      | -     | 0.063  | -     | -      | -     |
|                                                                                                | n15 | 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>                                                       | -      | 0.024 | -      | 0.058 | 0.026  | 0.038 |
|                                                                                                | n16 | 颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>                          | -      | 0.029 | -      | 0.032 | -      | 0.021 |
|                                                                                                | n17 | 直链藻属 <i>Melosira</i> sp.                                                              | -      | 0.022 | 0.042  | 0.097 | 0.086  | -     |
|                                                                                                | n18 | 变异直链藻 <i>Melosira varians</i>                                                         | -      | -     | -      | 0.022 | 0.024  | -     |
| 隐藻门<br>Cryptophyta                                                                             | n19 | 颗粒直链藻极狭变种螺旋变型 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> f. <i>spiralis</i> . | -      | -     | -      | 0.035 | -      | -     |
|                                                                                                | n20 | 隐藻属 <i>Cryptomonas</i> sp.                                                            | -      | -     | 0.038  | -     | 0.024  | -     |

“-”表示优势度<0.02。

2.1.4 浮游植物群落多样性

监测结果显示（图 3），2022~2024 年浮游植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $d$ )和 Pielou 均匀度指数( $J$ )的均值范围分别为 2.88~2.96、2.34~2.69 和 0.73~0.81。2023 年相比 2022 年，该库区浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数下降 0.84%；2024 年相比 2023 年，浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数下降 2.04%。根据湖泊营养状态评价（表 1）， $H'$ 表明该水体的营养状态均为中营养； $d$  表明该水体的营养状态为中营养； $J$  表明该水体的营养状态均为贫营养。Simpson 优势度指数( $D$ )均值范围为 0.06~0.18，依据评价方法<sup>[1]</sup>，表明库区水体浮游植物群落多样性中等。

通过ANOVA单因素方差分析和Tukey HSD多重比较验证调查期间库区水体浮游植物多样性指数的差异性，结果表明，同一采样点不同时期Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )总体存在显著差异 ( $p<0.05$ )，且在索饵期均显著高于繁殖期 ( $p<0.05$ )，其中2023年索饵期与2023年、2024年繁殖期差异显著 ( $p<0.05$ )；不同时期丰富度指数总体存在极显著差异 ( $p<0.001$ )，且在索饵期均显著高于繁殖期 ( $p<0.05$ )，其中2023年索饵期与2022年和2023年其他各期均

差异极显著 ( $p<0.001$ )；Pielou均匀度指数( $J$ )和Simpson优势度指数( $D$ )在索饵期与繁殖期之间均无明显差异 ( $p>0.05$ )。各采样点 $H'$ 、 $J$ 、 $d$ 、 $D$ 的差异不明显。

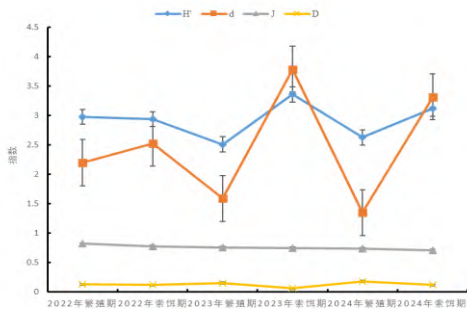


图 3 白莲崖水库浮游植物多样性指数时间特征 (2022~2024)  
Fig.3 Temporal characteristics of phytoplankton diversity index in Bailianya Reservoir (2022-2024)

2.2 浮游植物群落与环境因子的关系

2.2.1 多样性指数与环境因子的关系

结果如表4所示，营养盐是影响浮游植物多样性指数的主要因素。丰富度指数( $d$ )与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  ( $r=0.78$ ) 呈显著的正相关关系，表明较高的营养盐可能导致浮游植物多样性升高。香农多样性指数( $H'$ )与 $\text{DO}$ 、 $\text{SD}$ 正相关 ( $r=0.6$ )，表明溶解氧高、透明度好的水体多样性更高，但均不显著 ( $p>0.05$ )。均匀度指数( $J$ )与 $\text{Chl-}a$ 呈负相关 ( $r=-0.67$ )，表明浮游植物生物量升高会降低群落的均匀度。

表4 浮游植物多样性与环境因子的相关性

| Tab.4 Correlation between phytoplankton diversity and environmental factors |      |    |                             |                          |                |                          |                        |       |      |      |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|----|-----------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|------------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 指数                                                                          | TN   | TP | $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ | $\text{Chl-}a$ | $\text{COD}_{\text{Mn}}$ | $\text{NO}_2\text{-N}$ | WT    | DO   | SD   | SPC   | ORP   | pH    |
| $H'$                                                                        | 0.39 | -  | 0.55                        | -0.27                    | -0.32          | -0.29                    | -0.21                  | 0.08  | 0.65 | 0.56 | 0.11  | -0.05 | -0.08 |
| $J$                                                                         | -    | -  | -0.23                       | -0.28                    | -0.67*         | -0.32                    | -0.12                  | -0.18 | 0.31 | 0.25 | -0.08 | 0.12  | 0.05  |
| $d$                                                                         | 0.65 | -  | 0.78*                       | -0.49                    | -0.42          | -0.45                    | 0.25                   | 0.11  | 0.59 | 0.62 | 0.18  | -0.10 | -0.15 |

\*  $p<0.05$ .

2.2.2 浮游植物优势种与环境因子的关系

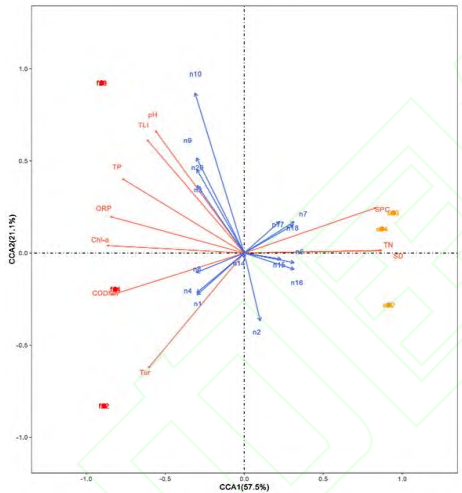
在 2022~2024 年调查结果中，共筛选出优势种 18 种属(表 3)，与 TN、TP、TLI、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  等 13 项环境因子进行 DCA 分析。DCA 分析结果显示，排序轴的最长梯度长度为 3.79，大于 3.0，适于采用典范对应分析(CCA)。CCA 排序图中，第一轴(CCA1)、第二轴(CCA2)的特征值分别为 0.791 和 0.324，累计解释了物种—环境关系总变异的 78.6%(CCA1 为 57.5%，CCA2 为 21.1%)，表明排序图能较好地反映鱼类繁殖期、索饵期浮游植物群落与环境因子之间关系的核心规律(图 4)。采用前向选择法结合蒙特卡洛(Monte Carlo)置换检验筛选环境因子，TP、SD、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、pH、Tur5 个因子对浮游植物群落结构影响显著 ( $p<0.05$ )，条件效应累计解释群落总变异的 71%。各因子条件效应依次为 TP 42% ( $p=0.001$ ,  $F=14.9$ )、SD 37% ( $p=0.002$ ,  $F=12.8$ )、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  29% ( $p=0.004$ ,  $F=9.7$ )、PH 23% ( $p=0.015$ ,  $F=7.5$ )、Tur 20% ( $p=0.021$ ,  $F=6.3$ )。CCA 前两轴的蒙特卡洛置换检验显著 ( $p<0.05$ )，表明排序轴具有统计学意义，TP、SD、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、pH、Tur 是驱动白莲崖水库浮游植物群落结构的主要环境因子。

CCA 分析结果显示(图 4)，用于分析的浮游植物优势种样品分为两大组(繁殖期和索饵期)，每大组分三小组(2022 年、2023 年、2024 年)。繁殖期和索饵期优势种差异明

显 ( $p=0.001$ ,  $F=18.7$ ), 是最主要的群落分隔因素。繁殖期样品沿 CCA1 负向分布, 与 TP、Chl-*a*、pH 高度耦合, 表明磷 (贡献率 59%)、pH 值 (贡献率 32%) 是繁殖期的核心驱动因子; 索饵期样品沿 CCA1 正向分布, SD 与 COD<sub>Mn</sub> 呈显著负相关 ( $\rho=-0.81$ ), 表明透明度 (贡献率 52%)、高锰酸钾指数 (贡献率 41%) 是索饵期的核心驱动因子。TP、pH、Chl-*a*、ORP、TLI 与 n1 (小球藻属)、n4 (衣藻属)、n10 (针杆藻属) 呈显著正相关; SD、TN、SPC 与 n2 (四棘藻属)、n6 (假鱼腥藻属)、n9 (鱼腥藻属) 呈显著正相关; COD<sub>Mn</sub>、Tur 与 n16 (颗粒直链藻极狭变种) 呈显著正相关。

CCA 分析环境因子驱动的年际差异, 发现 TP、TLI、pH、SD、COD<sub>Mn</sub> 的年际波动最大, 与浮游植物群落 CCA 排序图第一轴高度耦合 ( $|r| \geq 0.70$ ,  $p < 0.01$ ), 是驱动群落结构变化的关键因子。用双向 permanova 检验, 2022~2024 年浮游植物群落结构在整体上存在差异, 年际差异极显著 ( $p=0.002$ ,  $F=4.21$ ), 且年际变化在不同季节差异也显著 ( $p=0.018$ ,  $F=2.41$ ), 说明库区存在年份-季节耦合效应。结合用单因素 permanova 检验年际间差异, 结果表明该库区年际差异主要是由环境梯度驱动主导的。因此, 库区年际差异主要由环境梯度驱动, 环境影响因子以 TP、TLI、pH、SD、COD<sub>Mn</sub> 为主。

综上所述, 本研究 CCA 排序图较好地解释浮游植物群落与环境因子之间关系的核心规律, 主要是通过主导环境因子的季节性更替驱动了浮游植物群落时空变化, 是该水库生态系统季节演替的核心特征。



繁殖期样品 A (f22-f24), 索饵期样品 B (s22-s24), 2022 年样品 (f22、s22), 2023 样品 (f23、s23), 2024 年样品 (f24、s24)

图 4 浮游植物优势种与环境因子的 CCA 排序

Fig.4 CCA ranking of dominant phytoplankton species and environmental factors

### 2.3 水体营养盐状态

#### 2.3.1 水质理化指标

2022~2024 年白莲崖水库各时期采样点水体水质理化参数均值见表 5。监测结果显示, 水体 Chl-*a* 最高值出现在 2022 年繁殖期, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 最高值出现在 2022 年索饵期; pH、ORP 最高值出现在 2023 年繁殖期, TN、DTN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 最高值出现在 2023 年索饵期; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、COD<sub>Mn</sub>、DO 最高值出现在 2024 年繁殖期, SD 最高值出现在 2024 年索饵期。总体上, 不同的理化指标在鱼类繁殖期和索饵期存在差异, 索饵期水体 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 显著高于繁殖期 ( $p < 0.05$ ); 不同时期水体的 TN、DTN、TP、DTP、pH 含量差异均不显著 ( $p > 0.05$ ), 但仍存在一定波动。

结果表明 (图 5), 2022~2024 年 TN/TP 均值分别为 17.0, 15.25 和 13.3, 表明该库区水体

适合藻类生长增殖；高锰酸盐指数、总磷、总氮均值均符合《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类水质标准。

表5 白莲崖水库水体理化参数均值（2022~2024）

Tab.5 Average values of physical and chemical parameters of water body in Bailianya Reservoir (2022–2024)

| 环境因子                                                | 2022 年       |             | 2023 年       |             | 2024 年      |             |
|-----------------------------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|                                                     | 5 月          | 9 月         | 5 月          | 9 月         | 5 月         | 9 月         |
| TN/mg. L <sup>-1</sup>                              | 0.25±0.04    | 0.26±0.04   | 0.27±0.04    | 0.37±0.07   | 0.26±0.04   | 0.24±0.09   |
| DTN/mg. L <sup>-1</sup>                             | 0.11±0.08    | 0.21±0.07   | 0.10±0.07    | 0.26±0.10   | 0.10±0.04   | 0.11±0.04   |
| TP /mg. L <sup>-1</sup>                             | 0.02±0.00    | 0.01±0.00   | 0.02±0.00    | 0.02±0.00   | 0.02±0.00   | 0.02±0.00   |
| DTP/mg. L <sup>-1</sup>                             | 0.02±0.00    | 0.01±0.00   | 0.04±0.01    | 0.01±0.03   | 0.03±0.01   | 0.01±0.00   |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> P/mg. L <sup>-1</sup> | 0.08±0.01    | 0.02±0.01   | 0.07±0.01    | 0.27±0.57   | 0.01±0.00   | 0.02±0.00   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg. L <sup>-1</sup> | 0.02±0.00    | 0.02±0.00   | 0.01±0.00    | 0.01±0.00   | 0.06±0.04   | 0.04±0.04   |
| Chl- <i>a</i> /μg. L <sup>-1</sup>                  | 2.83±0.75    | 1.00±0.00   | 2.50±0.55    | 2.01±0.58   | 2.33±0.47   | 2.00±0.58   |
| COD <sub>Mn</sub> /mg. L <sup>-1</sup>              | 2.43±0.08    | 2.22±0.24   | 2.43±0.08    | 1.09±0.01   | 2.93±0.20   | 2.02±0.13   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/mg. L <sup>-1</sup> | 0.01±0.00    | 0.03±0.04   | 0.01±0.00    | 0.01±0.00   | 0.01±0.00   | 0.01±0.00   |
| WT/°C                                               | 20.45±1.78   | 25.63±0.31  | 21.18±7.91   | 24.76±0.46  | 19.30±0.40  | 26.32±1.18  |
| DO/mg. L <sup>-1</sup>                              | 8.87±2.09    | 6.67±0.27   | 8.86±2.10    | 10.91±1.32  | 10.97±1.1   | 10.70±0.64  |
| Tur/ NTU                                            | 5.58±1.23    | 5.12±0.47   | 5.07±0.50    | 4.27±0.36   | 5.52±0.37   | 5.55±2.29   |
| SPC/μs.cm <sup>-1</sup>                             | 114.33±7.09  | 127.3±31.11 | 119.17±30.02 | 135.83±29.9 | 110.8±16.72 | 133.01±28.6 |
| ORP/mv                                              | 297.17±11.05 | 229.75±13.2 | 306.67±17.35 | 227.50±7.16 | 294.02±11.0 | 229.50±8.60 |
| SD/m                                                | 2.61±0.22    | 2.82±0.15   | 2.63±0.16    | 2.89±0.14   | 2.83±0.07   | 2.93±0.69   |
| pH                                                  | 7.36±0.28    | 7.43±0.19   | 7.62±0.24    | 7.21±0.15   | 7.49±0.17   | 7.50±0.20   |

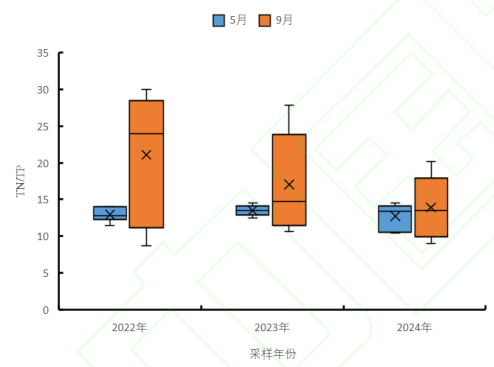


图 5 白莲崖水库水体 N/P 值的时间特征（2022~2024）

Fig.5 Temporal characteristics of N/P value of water body in Bailianya Reservoir (2022–2024)

### 2. 3. 2 水体综合营养状态评价

2022年5月和9月，综合营养状态指数（TLI）均值分别为35.69和27.39；2023年5月和9月，均值分别为40.58和38.14；2024年5月和9月，均值分别为39.25和37.92。从采样时间看，2022年索饵期水体的综合营养状态指数（TLI）最低，是调查期间库区出现水质状况最好的时期，而其他年份较2022年升高（图6a），且索饵期低于繁殖期（ $p < 0.05$ ）。从采样空间看（图6b），库尾（M6）水体的综合营养状态指数（TLI）呈现出库尾>库中>库首的显著递减趋势（ $p < 0.05$ ），与水体浮游植物丰度分布格局一致。总体上，2022~2024年库区水体综合营养状态指数（TLI）均值分别为31.54，39.36和38.59，表明库区水体整体处于中营养状态水平。

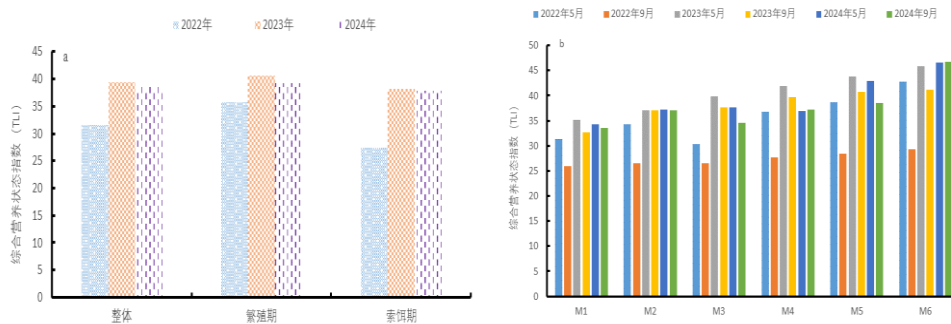


图 6 白莲崖水库水体综合营养状态指数时空特征（2022~2024）

Fig.6 Spatiotemporal characteristics of comprehensive nutritional status index of water body in Bailianya Reservoir (2022–2024)

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落结构时空变化

2022~2024年白莲崖水库的浮游植物群落结构具有较为明显的季节性变化特征。库区浮游植物共检出6门112种（属），硅藻门物种数最多，在种类数和丰度方面均占据显著优势。种类组成以硅藻门、蓝藻门和绿藻门为主，与邱阳棱等<sup>[10]</sup>和朱为菊等<sup>[24]</sup>研究淮河流域结果一致。GINDE RS等<sup>[25]</sup>和JAKOBSEN等<sup>[26]</sup>研究发现，硅藻门在浮游植物群落中占据主导地位，绿藻门和蓝藻门次之。其他地区如新安江流域<sup>[27]</sup>和香溪河<sup>[28]</sup>也出现相似的浮游植物群落特征，硅藻密度和生物量占比均达60%以上。

本研究中，同一采样点不同时期的浮游植物种类数、物种丰度和生物量差异显著，整体呈现鱼类索饵期明显高于繁殖期的规律和较一致的季节性变化趋势。在索饵期，库区水体透明度高，光照充足，水温保持在15~25℃，适宜直链藻属等硅藻快速繁殖，而蓝藻、绿藻等喜高温藻类（最适25~35℃）<sup>[29]</sup>，竞争力弱于硅藻，表明水温的季节性变化是浮游植物群落演替的影响因素之一<sup>[30]</sup>。不同时期的库区水文条件和水动力因子也不同，后汛期水文过程与鱼类索饵期在时间上高度耦合，较低的流速适宜比重大的硅藻类生长，使水体中硅藻丰度进一步升高<sup>[31]</sup>，特别是2023年和2024年索饵期的细胞丰度占比明显升高，繁殖期绿藻门丰度占比也不同程度的升高。另外，水库的蓄水、放水、水位调控和库底底质类型都会升高硅藻的优势<sup>[6]</sup>，且该库区底质多为泥沙质，富含硅酸盐（石英岩风化产物），泥沙颗粒能吸附营养盐，为硅藻生长繁殖提供额外资源。

本研究发现，不同采样点的浮游植物丰度和生物量也存在明显差异。各采样点的浮游植物丰度和生物量最高值均分布在库尾区域，且索饵期高于繁殖期，与魏念等<sup>[31]</sup>研究结果一致。一方面，库尾是漫水河的上游，是入库河流的入流区域，河流入流和河流沿岸人类活动带来高浓度的营养盐，满足更多不同营养需求的浮游植物物种生长和繁殖<sup>[7]</sup>，且水流速度缓慢，水动力不足，沉积物堆积厚，导致悬浮颗粒等物质沉降<sup>[30]</sup>，适宜藻类生长繁殖，从而导致库尾区域浮游植物丰度和生物量高。另一方面，库区在长江十年禁鱼计划实施前，曾大规模养殖鲢、鳙等鱼类<sup>[7]</sup>。滤食性鱼类进入索饵期，大量捕食浮游动物，对浮游植物的捕食压力减少，也促进了浮游植物大量繁殖，细胞丰度上升，而在鱼类繁殖期捕食强度降低，浮游动物对浮游植物捕食压力增强，从而反映了浮游动物捕食是控制浮游植物生物量的关键因素<sup>[32]</sup>，因而抑制了浮游植物生物量。

优势种在不同时期也表现出明显的差异。在鱼类索饵期，水温适宜，库尾入流区域营养盐相对较高，假鱼腥藻属等耐污类群占据优势，导致藻类丰度、生物量均达峰值，这与库尾

的高生物量一致,同时为鱼类提供充足的饵料;而在鱼类繁殖期,库区浮游植物优势类群转变为小球藻和衣藻等中-富营养指示种,同时受幼鱼摄食压力、环境筛选及水文条件变化影响,藻类种类数、丰度和生物量显著降低,群落整体明显低于索饵期,这与周晗等<sup>[33]</sup>研究结果一致。因此,氮磷营养盐和有机物等环境因子的季节性波动,导致不同藻类在鱼类不同生活史时期交替为优势而存在显著性差异。同时季节性气候差异和生物营养级联效应,改变库区的水文滞留时间、营养盐输入量和循环,干扰与阻止单一优势种形成,使库区呈现季节异质性的持续波动,从而影响到群落结构的年际变化。

### 3.2 水环境对浮游植物群落的驱动与评价分异

浮游植物群落结构受水环境因子驱动,筛选出驱动群落结构变化的环境因子的组成与分布直接反映营养状态<sup>[4]</sup>。CCA排序不仅较好地解释了物种与环境之间的内在联系,同时也反映出物种的生态分化现象<sup>[27]</sup>。CCA分析结果显示,TP、pH是驱动浮游植物群落的主要环境因子,TP和pH与小球藻、衣藻呈显著正相关,TN与假鱼腥藻属、鱼腥藻属呈显著正相关,表明了蓝藻和绿藻类群更适宜在氮磷充足和酸碱度适中的水环境中占据优势。COD<sub>Mn</sub>是驱动鱼类索饵期的主要环境影响因子,与颗粒直链藻极狭变种呈显著正相关,有机负荷的提升促进了该硅藻利用高分子有机物生长增殖<sup>[19]</sup>。

营养盐是影响浮游植物多样性的主要因素。PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P与丰富度指数(*d*)呈显著的正相关关系,表明活性磷能提供更多的营养盐,促进浮游植物生长繁殖,较高的营养盐可能伴随群落多样性升高。研究表明,最适合藻类生长的TN/TP为16<sup>[34]</sup>,库区的TN/TP均值为15.2,表明该库区水体氮磷比协调,为不同类型藻类生长繁殖和优势种更替提供了营养条件,有效缓解了浮游植物种间竞争;pH7.0-7.5时小球藻和衣藻影响最大<sup>[35]</sup>,库区的平均pH为7.44,水体呈弱碱性,小球藻细胞内的光合作用酶活性高,有利于小球藻、衣藻高效固定大气中CO<sub>2</sub>,并吸收氮磷等物质,从而具有较高的初级生产力<sup>[26]</sup>;库区在鱼类繁殖期的水体平均水温为20.3℃,适宜硅藻类生长繁殖<sup>[29]</sup>,索饵期平均水温达25.6℃,光照充足,有利于促进光合作用,良好的光照和水温促使蓝藻、绿藻等喜高温藻类大量繁殖。另外,水库的调蓄运行,使氮磷等营养盐时空分布发生了改变,特别是蓄水后使库容增加,改变了河流原有生态的连通性和水文节律,从而导致库区水体存在季节性水位波动。因此,硅藻、蓝藻、绿藻的生态位分化、环境因子的季节波动调节、水文条件变化以及生物相互作用,使库区呈现出三者共同优势的群落结构,这与赵乐乐等<sup>[19]</sup>研究汾河水库浮游植物种群特征结果一致。

随水体营养水平由贫营养向富营养过渡,*H'*、*d*、*J*的变化趋势并不完全一致,各指数对营养状态变化的响应存在显著分异<sup>[36]</sup>。结果表明,2022~2024年库区浮游植物*H'*、*d*、*J*的年均值分别为2.96/2.37/0.80,2.94/2.69/0.76和2.88/2.34/0.73,年际间无显著差异。依据评价标准<sup>[22-23]</sup>,*H'*、*d*指示中营养,*J*指示贫营养,评价结果有分歧,这与三峡水库<sup>[37]</sup>和对淮河流域<sup>[9]</sup>浮游植物群落研究的评价结果相似。评价分歧源于各指数的生态指示内涵与响应机制不同,优势种硅藻(48.21%)存在垄断使*J*偏低。现有多样性指数分级标准多基于经典湖泊研究建立,应用于水动力活跃、空间梯度显著的河道型水库可能存在适配偏差。因此,在实际水库管理中,建议以*H'*作为判断水体营养状态与生态系统质量评价的主要参考指标,而*d*和*J*分别作为监测优势种垄断风险、预警富营养化早期信号和作为验证物种丰富度变化趋势的辅助指标。有关研究发现,调蓄型水库水文、营养、气候等环境因子的季节性波动和空间差异,驱动浮游植物群落结构变化,导致多样性指数呈现不同的变化趋势<sup>[37]</sup>,从而使*H'*、*d*、*J*的评价结果不一致。本研究中,2022~2024年库区水体综合营养状态指数(TLI)均值分别为31.54,39.36和38.59,评价结果均为中营养状态,年际间也无显著差异,但季节性波动明显,与*H'*评价结果一致。因此,生物多样性指数评价结果低于综合营养状态指数(TLI)评价,其他水体<sup>[38-39]</sup>评价结果也存在相同情况。生物指标的长期生态累积效应与理化指标即时营养水平表征的本质不同,库区的优势种群季节演替进一步加剧了偏差。河道型水库受到闸坝的调控,

水文动力条件改变,入库径流很大程度上改变浮游植物群落特征,单纯依赖理化参数指标如偶然性的降雨会减低水体营养盐浓度,或单一生物指数均易造成误判<sup>[40]</sup>。因此,本研究采用 $H'$ 作为主要参考指标,以TLI进行理化交叉验证,构建生物—理化协同的多层次评价,判定库区整体水体处于中营养水平。

### 3.3 浮游植物水质指示及管控启示

水库水质与浮游植物群落多样性指数之间并非简单的线性关联。水质通过改变水体营养盐水平、生境稳定性等条件,直接影响浮游植物群落的物种组成、优势度和丰富度,从而反映在多样性指数的变化上<sup>[41]</sup>,且多样性指数对水质的指示作用受多种因素的影响。本研究 $H'$ 与 $d$ 评价为中营养、 $J$ 评价为贫营养的等级偏离,已指示群落优势种存在垄断倾向,说明单一多样性指数难于全面反映库区水质状况,需结合群落结构与优势种生态属性综合判断。CCA分析表明,TP、pH、SD、COD<sub>Mn</sub>为库区浮游植物群落结构的主导驱动因子,从统计上验证了季节转换的驱动机制。繁殖期与索饵期在CCA1轴上呈显著分离,表明环境梯度驱动了群落分异,水质指示须依赖物种组成与环境梯度耦合进行分析。因此,库区浮游植物优势种的季节更替具有明确的营养指示意义:繁殖期小球藻、衣藻属的优势地位反映了春季外源营养盐脉冲输入的快速响应信号,可作为外源营养盐补给敏感期的有效指示类群,揭示了库区营养状态受外部输入主导的初始驱动特征<sup>[35]</sup>;索饵期的直链藻属、假鱼腥藻属共优势指示了库区营养状态发生了变化,其中假鱼腥藻的出现标志着富营养化前兆风险,是内源营养盐释放的风险信号,也是营养指示与水质预警的关键时段<sup>[42]</sup>。CCA排序进一步说明了物种分布与环境因子的响应关系,假鱼腥藻属、衣藻属、小球藻等中-富营养化指示类群已在不同时期占据优势,且与TN、TP、pH等因子显著正相关,使季节演替从定性描述向定量响应关系转变。空间上,细胞丰度与TLI均呈库尾>库中>库首的显著递减趋势( $p<0.05$ ),表明库尾承受外源冲击负荷,而库首作为深水区,具有营养盐沉降滞留功能。这空间格局指示了上游面源污染是主要驱动源,与库区纵向水动力梯度对营养盐空间分异的调控作用一致。

从生态指示意义来讲,浮游植物群落的组成变化不仅直接指示滤食性鱼类饵料资源的可利用性,而且通过食物网级联效应间接预示肉食性鱼类食物来源的潜在波动。具体来说,索饵期优势种向大颗粒藻类偏移,不仅削弱滤食效率,更通过上行效应抑制浮游动物种群增长,同时高生物量加剧库尾底层夜间溶氧亏缺风险,因而浮游植物成为食物网稳定性和鱼类栖息地适应性的前哨预警信号,其群落变化对水质的响应早于鱼类种群的可观测变动<sup>[30]</sup>。当前库尾蓝藻占比达25%,接近富营养化阈值(30%)<sup>[30]</sup>;  $H'$ 与 $d$ 评价为中营养、 $J$ 评价为贫营养的等级偏离,指示群落优势种存在垄断倾向,系统稳定性呈下降趋势,生物量高值集中,已表现出向轻度富营养化发展的趋势。CCA结果也支持这一预警:索饵期样品三年均位于CCA1正端,与富营养化指标种向量重合且位置高度聚集,表明趋势具有持续性。尽管营养盐总量未达到富营养化阈值,且库区调蓄运行与鱼类摄食抑制了藻类生物量的爆发,但浮游植物群落的组成偏移与优势种更替已对营养环境变化做出早期预警和响应,表明群落结构比单一营养盐指标更能捕捉生态系统的早期退化信号<sup>[43]</sup>。

因此,水库管理过程中建议将库尾段设为优先控制单元,持续监测藻类优势度变化,在索饵期加密监测TP与假鱼腥藻丰度联动变化,作为轻度富营养化的早期预警触发阈值,同步优化水库调度、削减外源有机物与氮磷营养盐输入,协同防控库尾向轻度富营养化转化;利用库区现有蒙古红鲃等顶级捕食者通过提高浮游动物对浮游植物的捕食效率,在营养盐水平可控条件下抑制藻类过度增殖<sup>[32]</sup>的鱼类营养级联效应,缓解藻类爆发;适度增加滤食性鱼类的投放,强化“鱼类—浮游动物—浮游植物”下行控制路径,协同防控库尾向轻度富营养化转化风险,同时控制库尾TP的输入,防止群落结构单一化。CCA揭示的因子-季节耦合模式为管理时序提供了定量依据:繁殖期TP、pH驱动提示春季应以控磷为主,索饵期SD、COD<sub>Mn</sub>主导提示秋季需关注内源有机质降解问题,从而实现时段精准管控。

本研究结果从时空尺度上综合分析了2022~2024年间白莲崖水库的浮游植物群落特征和水质数据信息,评估了库区水域年际与季节生态健康状况,为水库管理提供早期预警,对保护区生态与环境的维护与保护方法的研究具有重要的意义。

## 4 结论

(1) 白莲崖水库浮游植物调查共获得6门35科112种(属)(包括变种和变型),主要以硅藻(48.21%)、绿藻(29.5%)和蓝藻(12.5%)为主。优势种以硅藻门、绿藻门和蓝藻门为主,包括衣藻、小球藻、假鱼腥藻和直链藻属等,部分优势种为中-富养指示种。

(2) 库区群落多样性呈现明显的时空异质性季节变化规律,时间上随鱼类索饵-繁殖节律呈现显著季节差异,种类数、丰度和生物量均呈现索饵期>繁殖期的规律,空间上表现为库尾入流区域明显富集的分布特征。浮游植物群落结构受外源输入、环境梯度和鱼类生活史节律共同调控。TP、SD、COD<sub>Mn</sub>、pH是驱动库区浮游植物群落的环境决定因子,TP、PH是繁殖期的核心驱动因子,SD、COD<sub>Mn</sub>是索饵期的核心驱动因子。从年际变化看,TP、TLI、pH、SD、COD<sub>Mn</sub>的年际波动大,是驱动群落结构变化的主要因子。

(3) 库区浮游植物群落结构具有显著的季节节律、时空分异和年际波动特征,水体整体处于中营养状态,营养盐分布表现出库尾>库中>库首的空间梯度,但藻类优势类群与环境因子响应关系向轻度富营养化演变趋势明显,尤其库尾流入区生态风险突出。

## 参考文献:

- [1] KIM H G, HONG S, KIM D K, et al. Drivers shaping episodic and gradual changes in phytoplankton community succession: taxonomic versus functional groups [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,734: 138940.
- [2] 谢斌, 张硕, 李莉, 等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落结构特征及其与水质参数的关系[J]. *环境科学学报*, 2017,37(1):121-129. [XIE Bin, ZHANG Shuo, LI Li, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and their relationships with water quality parameters in a marine ranching of Haizhou Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017,37(1): 121-129.]
- [3] 杨洪允, 周雯, 乔永民, 等. 洱海浮游植物群落结构及其与环境因子分析[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(7):123-132. [YANG Hong-yun, ZHOU Wen, QIAO Yong-min, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors in Lake Erhai [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(7): 123-132.]
- [4] LI Y, FANG L C, CAO G R, et al. Reservoir regulation-induced variations in water level impacts cyanobacterial bloom by the changing physiochemical conditions[J]. *Water Research*, 2024,259:121836.
- [5] 杨萌卓, 夏继红, 蔡旺炜, 等. 饮水型水库浮游植物功能群分布特征及环境驱动因子[J]. *水生态学杂志*, 2022,43(2):37-44. [YANG Meng-zhuo, XIA Ji-hong, CAI Wan-gwei, et al. Distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their environmental driving factors in drinking water reservoirs [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022,43(2):37-44.]
- [6] 张地继, 田楚铭, 高玉磊, 等. 乌东德水库浮游植物群落时空动态特征及其环境影响因素[J]. *水生态学杂志*, 2025, 46(4):174-184. [ZHANG Di-ji, TIAN Chu-ming, GAO Yu-lei, et al. Spatiotemporal dynamic characteristics of phytoplankton community and its environmental influencing factors in Wudongde Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2025,46(4): 174-184.]
- [7] 江群. 霍山县大水面生态渔业发展现状及对策[J]. *黑龙江水产*, 2023,5(42):386-389. [Jiang Qun. Current situation and countermeasures of large-water ecological fishery development in Huoshan County[J]. *Heilongjiang Fisheries*, 2023, 5(42): 386-389.]
- [8] 田楚铭, 张地继, 米武娟, 等. 向家坝水库浮游植物群落时空特征及其环境驱动因子[J]. *水生态学杂志*, 2025,46(2):194-203. [TIAN Chu-ming, ZHANG Di-ji, MI Wu-juan, et al. Spatiotemporal characteristics of phytoplankton community and its environmental driving factors in Xiangjiaba Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2025,46(2): 194-203.]
- [9] 张珊, 商乃萱, 张金羽, 等. 淮河流域西淝河浮游植物群落结构特征[J]. *水生态学杂志*, 2020,41(4):81-89. [ZHANG Shan, SHANG Nai-xuan, ZHANG Jin-yu, et al. Characteristics of phytoplankton community structure in Xifei River of the Huaihe River Basin [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020,41(4): 81-89.]
- [10] 吴奇丽, 林志, 汪晨琛, 等. 淮河上游典型支流浮游植物群落结构特征[J]. *生物学杂志*, 2018,35(4):67-71. [WU Qi-li, LIN, Zhi WANG Chen-chen, et al. Characteristics of phytoplankton community structure in typical tributaries of the upper Huaihe River [J]. *Journal of Biology*, 2018,35(4): 67-71.]
- [11] 邱阳凌, 林育青, 刘俊杰, 等. 淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价[J]. *环境科学学报*, 2018,38(4):1665-1672. [QIU Yang-ling, LIN Yu-qing, LIU Jun-jie, et al. Biodiversity assessment of phytoplankton community in the main stream and major tributaries of the Huaihe River in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(4): 1665-1672.]
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法-第4版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:88-438.
- [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, 2006,1-1046. [HU H J, WEI Y X. *Freshwater Algae of China: Systematics, Classification and Ecology* [M]. Beijing: Science Press, 2006,1-1046.]

- [14] WÄNGBERG S Å, HEYMAN U, BLANCK H. Long-term and short-term arsenate toxicity to freshwater phytoplankton and periphyton in limnocorrals[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1991,48(2):281-290.
- [15] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication. [M]. Urbana: University of Illinois Press,1949:1-144.
- [16] MARGALEF R. Information theory in ecology[J]. Genes and Genetic Systems,1958,3:36-71.
- [17] PIELOU E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology,1966,13:131-143.
- [18] 袁鸿,罗华辉,肖亚琴,等.平水期南洞庭湖浮游植物群落特征及其与水环境因子的关系[J].湿地科学,2024,22(2):245-253. [YUAN Hong, LUO Hua-hui, XIAO Ya-qin, et al. Characteristics of phytoplankton community and its relationship with water environmental factors in South Dongting Lake during normal water period [J]. Wetland Science, 2024,22(2): 245–253.]
- [19] 赵乐乐,耿志远,贺芷慧,等.汾河水库浮游植物种群变化及其与水环境因子的关系[J].湿地科学,2024,22(4):526-535. [ZHAO Le-le, GENG Zhi-yuan, HE Zhi-hui, et al. Changes in phytoplankton population and their relationship with water environmental factors in Fenhe Reservoir [J]. Wetland Science, 2024, 22(4): 526–535.]
- [20] 中华人民共和国环境保护部办公厅.地表水环境质量评价办法:环办(2011)22 号[S/OL].(2011-03-09).
- [21] 于丹,刘红磊,邵晓龙,等.北方大型居住区景观水体富营养化特征研究[J].环境工程,2017,35(5):53-57. [YU Dan, LIU Hong-lei, SHAO X L, et al. Study on eutrophication characteristics of landscape water in large residential areas in northern China [J]. Environmental Engineering, 2017,35(5): 53–57.]
- [22] 胡俊,杨玉霞,池仕运,等.邛山提灌站浮游植物群落结构空间变化对环境因子的响应[J]. 生态学报,2017,37(3):1054-1062. [HU Jun, YANG Yu-xia, CHI Shi-yuan, et al. Spatial variation of phytoplankton community structure in response to environmental factors at Mangshan Pumping Station [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(3): 1054–1062.]
- [23] 王世欢,张生,武蓉,等.寒旱区湖泊浮游植物特征及其对营养状态的指示作用[J].中国环境科学,2023,43(1):311-320. [WANG Shi-huan, ZHANG Sheng, WU Rong, et al. Phytoplankton characteristics of lakes in cold and arid regions and their indicative effect on trophic status [J]. China Environmental Science, 2023,43(1): 311–320.]
- [24] 朱为菊,庞婉婷,尤庆敏,等.淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价[J].湖泊科学,2017,29(3):637-645. [ZHU Wei-ji, PANG Wan-ting, YOU Qing-min, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and water quality assessment in the Huaihe River Basin during spring [J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(3): 637–645.]
- [25] GINDERS S, DEATH R G, HAWES I, et al. Influence of hydrological connectivity on plankton communities in natural and reconstructed side-arms of a large New Zealand river[J]. River Research and Applications, 2016,32(9): 1675-1686.
- [26] JAKOBSEN H H, BLANDA E, STAEHR P A, et al. Development of phytoplankton communities: Implications of nutrient in jections on phytoplankton composition, pH and ecosystem production[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology,2015,473: 81-89.
- [27] 朱永辉,胡敏琦,庞钰,等.皖南片区水域浮游植物群落时空变化特征及其关键驱动因子[J].中国环境监测,2025,41(6):181-194. [ZHU Yong-hui, HU Min-qi, PANG Yu, et al. Spatiotemporal variation characteristics of phytoplankton community and its key driving factors in waters of southern Anhui region [J]. Environmental Monitoring in China, 2025,41(6): 181–194.]
- [28] 陈燕琴,申志新,刘玉婷,等.澜沧江囊谦段夏秋季浮游植物群落结构初步研究[J].水生态学杂志,2012,33(3):60-67. [CHEN Yan-qin, SHEN Zhi-xin, LIU Yu-ting, et al. A preliminary study on phytoplankton community structure in the Nangqian section of the Lancang River in summer and autumn [J]. Journal of Hydroecology, 2012,33(3): 60–67.]
- [29] 周铭浩,李彤,邓颖,等.不同水期东江干流浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J].中国环境监测, 2025,41(1):121-133. [ZHOU Ming-hao, LI Tong, DENG Ying, et al. Characteristics of phytoplankton community structure and its relationship with water environmental factors in the main stream of Dongjiang River in different water periods [J]. Environmental Monitoring in China, 2025,41(1): 121–133.]
- [30] PAERL H W, XU H, MCCARTHY M J, et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake: Lake Taihu, China [J]. Water Research,2011,45(7):1973-1983.
- [31] 魏念,余丽梅,杜开开,等.三峡库区干流浮游植物群落结构及环境影响因子相关性分析[J].长江流域资源与环境, 2022,31(3):615-623. [WEI Nian, YU Li-mei, DU Kai-kai, et al. Correlation Analysis of Phytoplankton Community Structure and Environmental Impact Factors in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir Area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(3): 615–623.]
- [32] KOZAK A, GOLDYN R, DONDAJEWSKA R. Phytoplankton Composition and Abundance in Restored Maltański Reservoir under the Influence of Physico-Chemical Variables and Zooplankton Grazing Pressure[J]. PLoS ONE, 2015, 10(4): e0124738.
- [33] 周晗,蔡梅,王元元,等.铜山源水库春夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J].生态与农村环境学报,2024,40(1):87-95. [ZHOU Han, CAI Mei, WANG Yuan-yuan, et al. Community characteristics of phytoplankton and their relationships with environmental factors in Tongshanyuan Reservoir in spring and summer[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(1): 87-95.]
- [34] LENTON T M, WATSON A J. Redfield revisited 1. Regulation of nitrate, phosphate, and oxygen in the ocean[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000,14(1): 225-248.
- [35] 夏品华,林陶,李存雄,等.红枫湖水库浮游植物群落结构与水质评价[J].生态学杂志, 2011,30(7):1459-1465. [Xia Pin-hua, Lin Tao, Li Cun-xiong, et al. Phytoplankton community structure and water quality evaluation in Hongfeng Lake Reservoir. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1459-1465.]
- [36] 徐沙,郭嘉伟,胡恩,等.汉江上游平水期浮游植物群落特征及水质生物评价[J].生态学杂志,2024,45(3):148-155. [XU Sha, GUO

- Jia-wei, HU En, et al. Phytoplankton community characteristics and bioassessment of water quality in the upper Hanjiang River during normal water period [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,45(3): 148–155.]
- [37]田楚铭,齐青松,张弛,等.三峡水库浮游植物群落结构特征及其水环境评价[J].武汉大学学报(理学版),2024,70(1):75-86. [TIAN Chu-ming, QI Qing-song, ZHANG Chi, et al. Phytoplankton community structure and water environment assessment in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2024,70(1): 75–86.]
- [38]吉正元,刘绍俊,施艳峰,等.抚仙湖浮游植物群落结构、影响因子及水质评价[J].中国环境监测,2019,35(4):67-77. [JI Zheng-yuan, LIU Shao-jun, SHI Yan-feng, et al. Phytoplankton community structure, influencing factors and water quality assessment in Fuxian Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2019,35(4): 67–77.]
- [39]陈琳荔,邹华,庄严,等.小溪港浮游植物群落特征及水质评价[J].环境科学研究,2014,27(9):1016-1023. [CHEN Lin-li, ZOU Hua, ZHUANG Yan, et al. Phytoplankton Community Characteristics and Water Quality Assessment in Xiaoxi Harbor [J]. Research of Environmental Sciences, 2014,27(9): 1016–1023.]
- [40]夏莹霏,胡晓东,徐季雄,等.太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价[J].湖泊科学,2019,31(1):134-146. [XIA Ying-fei, HU Xiao-dong, XU Ji-xiong, et al. Seasonal succession characteristics of phytoplankton functional groups and water quality assessment in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(1): 134–146.]
- [41]张辉,彭宇琼,邹贤妮,等.华南大型深水水库浮游植物群落特征及营养状态评价[J].环境科学与技术,2021, 44(4): 186-194. [ZHANG Hui, PENG Yu-qiong, ZOU Xian-ni, et al. Phytoplankton community characteristics and trophic status assessment of large deep-water reservoirs in South China [J]. Environmental Science & Technology, 2021,44(4): 186–194.]
- [42] LI L, ZHANG M, LV J, et al. The role of Pseudanabaena in the early warning of eutrophication in a shallow lake [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(15): 18489-18499.
- [43] CARUSO G. Phytoplankton as a biological indicator of water quality: A review [J]. Water, 2023, 15(12): 2259.

作者简介:陈玉翠(1977-),女,实验师,研究方向为渔业水环境资源保护工作。E-mail: yucuichen08@163.com。