J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(2):000-000
DOI 10.18307/2027.0211
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

金沙江下游梯级水库浮游植物群落时空分布特征及驱动因素*

尹开朗[1,2]，李姗泽[2**]，王雨春[2]，黄　伟[2]，许旭明[2]，王烜[3]，包宇飞[2]，温　洁[2]，尹春雪[2,4]，陈晴空[1**]

(1：重庆交通大学，环境水利工程重庆市工程实验室，重庆 400074)

(2：中国水利水电科学研究院，流域水循环与水安全全国重点实验室，北京 100038)

(3：北京师范大学环境学院，北京 100875)

(4：华北电力大学/环境科学与工程学院，北京 102206)

摘　要：梯级水库联合调度改变河流水动力过程、营养盐输移及生境结构，进而影响浮游植物群落结构，而金沙江下游梯级水库群尺度下浮游植物群落结构时空分布特征及其关键环境驱动因子仍需进一步明确。本研究于 2025 年枯、丰水期在金沙江下游四座梯级水库共 22 个采样点开展浮游植物调查，结合表层及坝前垂向分层采样，分析其种类组成、现存量、优势种及生态位等群落结构特征，并结合 Pearson 相关分析与冗余分析（RDA）探讨优势种与水环境因子的关系。结果表明，梯级水库共鉴定浮游植物 9 门 83 属 104 种，以绿藻门、硅藻门和蓝藻门为主。丰水期总物种数显著高于枯水期，但在各库区间分布均匀。其密度及生物量在不同水文时期和库区间未表现出一致的变化趋势，而是呈现出空间异质性和季节变化特征。水电站坝前垂向尺度上，枯水期物种分布趋于均一，而丰水期呈现垂向差异且具库区特异性：乌东德与溪洛渡物种数随水深增加而上升，向家坝则呈递减趋势。密度及生物量总体呈现“表层富集、中深层递减”的特征。其中，枯水期溪洛渡坝前表层浮游植物密度与生物量显著高于其他库区。枯水期优势种以硅藻为主且生态位较窄，丰水期则表现为多门类共同占优、生态位宽度增大。其中小环藻在枯、丰水期均保持稳定优势，隐藻在丰水期优势度与生态位宽度同步提升。丰水期优势种生态位重叠度总体高于枯水期。枯水期高、中、低重叠优势种对分布较为均衡，而丰水期低重叠度优势种对占比增加。Pearson 与 RDA 结果表明，COD_{Mn}、pH 和 DO 是驱动优势种群落时空分布格局的关键环境因子。本研究揭示了金沙江下游梯级水库浮游植物群落结构的时空分布特征及其驱动因素，能够该区域水生态保护与管理提供科学支撑。

关键词：浮游植物；群落结构；优势种；生态位；环境变量；金沙江下游

Spatiotemporal distribution characteristics and driving factors of phytoplankton communities in cascade reservoirs of the lower Jinsha River*

Yin Kailang[1,2], Li Shanze[2**], Wang Yuchun[2], Huang Wei[2], Xu Xuming[2], Wang Xuan[3], Bao Yufei[2], Wen Jie[2], Yin Chunxue[2,4] & Chen Qingkong[1**]

(1: *Chongqing Engineering Laboratory of Environmental & Hydraulic Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100048, *P.R.China*)

(3: *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *P.R.China*)

(4: *College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *P.R.China*)

Abstract: Abstract: Cascade reservoir joint operation alters river hydrodynamic conditions, nutrient transport processes, and habitat structures, and consequently regulates phytoplankton community composition. However, the spatiotemporal patterns of phytoplankton communities and their key environmental drivers remain unclear for the entire cascade reservoir system in the lower Jinsha River. In

* 2026-01-23 收稿；2026-06-04 收修改稿；2026-06-08 录用。
国家重点研发计划（2023YFC3205900）；国家自然科学基金联合基金（U2340222）；流域水循环与水安全全国重点实验室资助（SKL2025TDGG08）；中国科协第八届青托工程项目(2022QNRC001)资助。
** 通信作者, E-mail：chenqingkong@cqjtu.edu.cn，lishanze@126.com。

this study, phytoplankton communities were investigated at 22 sampling sites across four cascade reservoirs during the dry and wet seasons of 2025. Both surface water sampling and vertical stratified sampling in front of dam sites were conducted to analyze community characteristics, including species composition, standing stock, dominant species, and ecological niche traits. Pearson correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were applied to quantify the relationships between dominant phytoplankton species and aquatic environmental factors. A total of 104 phytoplankton species belonging to 83 genera and 9 phyla were identified in the cascade reservoirs, with Chlorophyta, Bacillariophyta, and Cyanophyta being the dominant groups. Phytoplankton species richness was significantly higher in the wet season than in the dry season, while species distribution showed minor differences among individual reservoirs. Phytoplankton density and biomass did not exhibit consistent variations across hydrological periods or reservoirs, but showed distinct spatial heterogeneity and seasonal dynamics. In the vertical profile of dam-front waters, species distribution was relatively uniform in the dry season, whereas clear vertical differences and reservoir-specific distribution patterns were observed in the wet season. Species richness increased with water depth in the Wudongde and Xiluodu Reservoirs, but decreased with depth in the Xiangjiaba Reservoir. Phytoplankton density and biomass generally accumulated in the surface layer and gradually declined in the middle and deep layers. Notably, surface-layer phytoplankton density and biomass in the dam-front area of the Xiluodu Reservoir during the dry season were significantly higher than those in other reservoirs. Dry-season dominant species were mainly narrow-niche diatoms, while the wet season featured co-dominance of species from multiple phyla and expanded niche breadth. *Cyclotella* sp. maintained stable dominance across both seasons, whereas *Cryptomonas* sp. increased in dominance and niche breadth in the wet season. Overall, dominant species showed higher niche overlap in the wet season than in the dry season. Dry-season dominant species pairs were evenly distributed across high, medium, and low niche overlap levels, whereas the proportion of low-overlap pairs increased in the wet season. Pearson correlation analysis and RDA results indicated that COD_{Mn}, pH, and DO were the key environmental factors controlling the spatiotemporal distribution of dominant phytoplankton assemblages. This study clarifies the spatiotemporal distribution patterns and driving mechanisms of phytoplankton community structure in the lower Jinsha River cascade reservoirs, and provides scientific references for aquatic ecological conservation and watershed management in this region.
Keywords: Phytoplankton; community structure; dominant species; ecological niche; environmental factors; lower reaches of Jinsha river

金沙江下游河段自攀枝花（雅砻江汇入口）至宜宾（岷江汇入口），全长 768 km，总落差 719 m[1]。该河段位于青藏高原向云贵高原过渡带，穿越川滇交界峡谷区[2]，是长江上游水电资源富集的关键河段[3]。2022 年底白鹤滩水电站全面投产运行，标志着金沙江下游梯级水库群已全面建成[4]，并与三峡、葛洲坝水电站共同形成了全球规模最大的清洁能走廊之一[5]。同时，作为长江上游重要的生态屏障，该流域在水源涵养、水生物多样性保护及水土保持等方面承担着关键生态功能[6]，其生态状况将直接影响长江流域及更大尺度的生态格局。建设梯级水库群是高强度水资源开发的典型模式，其生态影响较单一水电工程更为显著，具有明显的叠加效应与系统性特征[7]。该过程可显著改变河流自然过程与生态系统服务功能，如水文情势调节与生物栖息地维持等[8]。串联大坝形成多重物理屏障，大幅降低河流纵向连通性[9]，促使生境类型单一化与结构简化[10]。此外，梯级水库联合调度进一步改变天然水文节律[11]，影响营养盐的输移转化与水质变化[12]，进而驱动水生生物群落演替调整[13]。

浮游植物作为水生态系统能量输入的核心来源，在物质循环与能量传递等过程中承担着关键作用[14-15]。其群落组成及结构特征能直接影响水体生态结构与功能[16]，并对生态系统稳定性与健康维持具有基础意义[17]。且浮游植物对水环境变化响应迅速，其群落组成可作为评价水生态状况的重要依据[18]。生态位表征物种在生境中的资源利用范围与功能角色，常采用生态位宽度和生态位重叠指数进行量化，用于解析种间竞争关系与资源利用策略[19]。

为加强长江流域生态环境保护和修复、保障生态安全，《中华人民共和国长江保护法》自 2021 年 3 月 1 日起施行。为落实长江保护法等有关规定及推动重要江河湖库生态保护治理的具体行动，生态环境部等五部门联合印发《重点流域水生态环境保护规划》。因此，在金沙江下游梯级水库开展浮游植物群落结构特征及影响因子研究具有现实必要性。回顾关于金沙江下游浮游植物调查研究，金沙江下游筑坝前

龚廷登等[20]曾针对向家坝水富段开展过初步的浮游植物本底调查。随着向家坝、溪洛渡、乌东德及白鹤滩水电站的相继建成投运，相关研究逐渐覆盖了该区域的整体及部分库区[21-30]。然而，在梯级水库群联合调度这一宏观背景下，梯级水库群尺度的浮游植物研究仍相对匮乏。且相较于以往研究多聚焦于表层水体，本研究不仅实现了对金沙江下游梯级水库群的全覆盖，且在坝前深库区引入垂向分层调查。这一多维度研究视角的切换，对于全面评估巨型梯级电站群的水生态效应具有重要的科学价值。

本研究以金沙江下游梯级水库群为对象，于 2025 年 3 月（枯水期）及 7 月（丰水期）开展野外调查。在对全库区布设常规表层采样点的基础上，针对性地在各电站坝前深水区增设了垂向分层采样。系统分析浮游植物的群落结构、现存量及生态位特征，并结合 Pearson 相关分析与 RDA 探讨了优势种与环境因子的关系，旨在为梯级水库群的生态修复与精细化管理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

本研究于 2025 年 3 月（枯水期）及同年 7 月（丰水期）两个典型水文时期在金沙江下游四座梯级水库内采集浮游植物样品并同步测定了相关水体理化参数。采样点的布设参照《水域生态系统观测规范》[31]，同时结合实地地形特征与野外操作可行性，在整个梯级水库共布设了 22 个采样点位（见图 1），W1~W4 位于乌东德库区内；B1~B4 位于白鹤滩库区内；XL1~XL5 位于溪洛渡库区内；XJ4~XJ9 位于向家坝库区内，XJ1~XJ3 位于向家坝坝下至宜宾段。这些点位覆盖了各个库区的库首、库中及库尾等典型水域，以保证空间代表性。

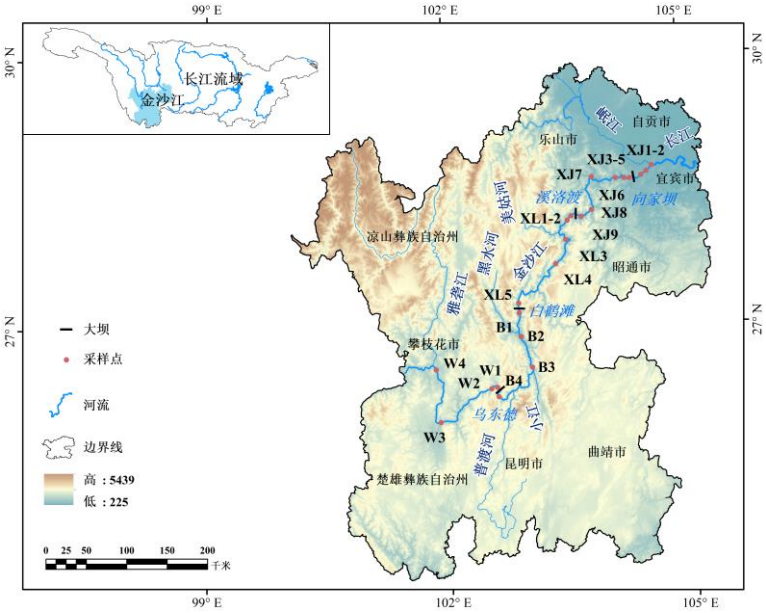

图 1 金沙江下游采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the lower Jinsha River

1.2 样品采集与处理

浮游植物样品采集与处理参照《淡水浮游生物调查技术规范》（SC/T 9402-2010）执行[32]，定量样品先于定性样品采集。定量样品采用 2.5 L 卡盖式采水器于同一水层取水样 10 L，混匀后取 1 L，加 10 ml 鲁哥试液固定。定性样品采用 25 号浮游植物网于水面下 0.5 m 处按“∞”字形缓慢拖网 5 min，收集浓缩样品于 50 ml 样品瓶中，加 0.5 ml 鲁哥试液固定。定性鉴定时，将样品摇匀后吸取 1～2 滴置于载玻片上，在 10×40 倍显微镜（Primostar 3）下观察至无新物种出现。种类鉴定主要参考《中国常见淡水浮游藻类图谱》和《中国淡水藻类：系统、分类与生态特性》等资料。定量样品静置沉淀 48 h 后虹吸浓缩

至 30 ml，计数前沿同一方向摇匀 2～3 min，吸取 0.1 ml 置于计数框中进行鉴定和计数。每个样品重复计数 2 次，若两次计数结果与平均值的相对偏差大于 15%，则补充第 3 次计数，并以 3 次计数结果的平均值作为最终结果。参照《水质 浮游植物的测定 0.1 ml 计数框 显微镜计数法》（HJ 1216-2021），确保每个样品计数不少于 500 个浮游植物细胞。对于低密度样品，若首次浓缩后仍不满足计数要求，则通过延长沉降时间和二次浓缩进一步富集，并结合全片计数和平行样重复计数提高定量精度。计数过程中发现的新种类，补充记录至定性鉴定结果中。

采集浮游植物样品的同时，于该采样点开展原位理化参数监测，使用 YSI 多参数水质仪同步测定水温（WT）、溶解氧（DO）、pH、电导率（EC）及总溶解性固体（TDS）。同时采集水样并酸化固定保存，参照《水和废水监测分析方法》[33]在实验室测定营养盐与有机物指标，包括总氮（TN）、硝酸盐氮（NO_3^--N）、氨氮（NH_4^+-N）、总磷（TP）和高锰酸盐指数（COD_{Mn}）。

1.3 数据处理

1.3.1 多样性指数　浮游植物多样性采用多指标综合评价，使用香农维纳指数（H'）和辛普森指数（D）表征多样性水平，丰富度指数（d）用以反映物种丰富度，均匀度指数（J）描述群落分布均匀性，计算公式如下[34-35]：

香农维纳指数（H'）、辛普森指数（D）、丰富度指数（d）均匀度指数和（J）计算公式分别为：

$$H' = -\sum_{i=1}^{s}(N_i / N)\ln(N_i / N) \tag{1}$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{s}\left(N_i / N\right)^2 \tag{2}$$

$$d = (\mathrm{S} - 1) / \ln \mathrm{N} \tag{3}$$

$$J = H' / \ln S \tag{4}$$

其中，S 表示样品中检出的浮游植物物种数；N_i 为第 i 个物种个体数量；N 代表所有物种的个体总数。

1.3.2 优势种　以优势度 Y 为依据筛选优势种，其计算公式[36]为：

$$Y = f_i \cdot \frac{n_i}{N} \tag{5}$$

其中，表示样点第 i 种浮游植物的个体数量；N 为该样点浮游植物个体总数；f_i 为该物种在全部采样点中出现的频次，当 Y＞0.02 为优势种。

1.3.3 生态位宽度　采用 Levins 指数测算梯级水库浮游植物优势种的生态位宽度 B_i，计算公式[37]为：

$$B_i = 1 / \left(\sum_{j=1}^{r} P_{ij}^2\right) \tag{6}$$

其中 P_{ij} 定义为物种 i 在第 j 个采样点的个体数量占该物种总个体数的比例，r 表示采样点的总数量。

1.3.4 生态位重叠　依据 Pianka 提出的生态位重叠指数 O_{ik} 进行评估，其计算公式[38]为:

$$O_{ik}=\sum_{j=1}^{r}(P_{ij}\cdot P_{kj})/\sqrt{\sum_{j=1}^{r}P_{ij}^{2}\cdot\sum_{j=1}^{r}P_{kj}^{2}} \tag{7}$$

其中，O_{ik}表示物种 i 和物种 k 间的生态位重叠系数，其数值介于 0 到 1 之间。O_{ik}越大表明两者对资源的利用方式或环境需求越相似，中间竞争可能越强。O_{ik}＞0.6 通常代表种间生态位重叠较为显著。

1.4 数据分析

浮游植物相关数据及同期水环境参数的整理、统计与图形绘制在 Origin 与 SPSS 中完成。除 pH 外，其余环境因子及物种数据均先进行 lg(x+1)变换，并进一步实施 Z-score 标准化处理以满足数据的正态性。浮游植物与水环境因子之间的关系采用 Canoco 5.0 平台开展冗余分析（RDA，Redundancy Analysis）进行分析[39]。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构

2.1.1 种类组成 通过定性和定量样本综合分析，2025 年 3 月（枯水期）和 7 月（丰水期）在金沙江下游四座梯级水库 22 个断面表层共检测出浮游植物 9 门 83 属 104 种，其中绿藻门（*Chlorophyta*）37 种，占总种类数的 35.58%；硅藻门（*Bacillariophyta*）34 种，占 32.69%；蓝藻门（*Cyanophyta*）17 种，占 16.35%；隐藻门（*Cryptophyta*）和金藻门（*Chrysophyta*）各 5 种，各占 4.81%；甲藻门（*Dinophyta*）3 种，占 2.88%；定鞭藻门（*Haptophyta*）、裸藻门（*Euglenophyta*）以及黄藻门（*Xanthophyta*）各 1 种，各占 0.96%。从时间上看，丰水期浮游植物种类数显著高于枯水期（P<0.01），7 月检出 9 门 79 属 95 种，3 月检出 8 门 40 属 50 种，2 次监测均以硅藻门、绿藻门、蓝藻门种类数较高，黄藻门仅在 7 月检出。从空间上看，上游的乌东德至下游的向家坝，浮游植物种类数总体分布较为平均(P＞0.05)。硅藻门和绿藻门在整个流域占据充分的优势，其种数高于隐藻、甲藻等其他门类（图 2）。

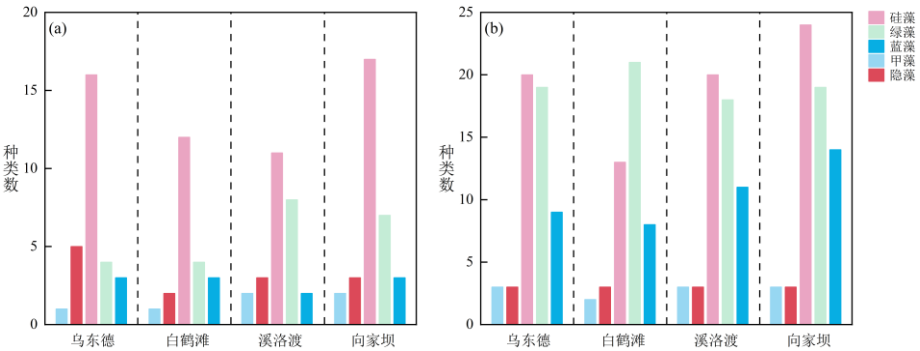

图 2 2025 年 3 月（a）和 7 月（b）金沙江下游梯级水库浮游植物各门类种数

Fig. 2 Number of species across phytoplankton taxa in the cascade reservoirs of the lower Jinsha River in March (a) and July (b) 2025

2.1.2 细胞密度与生物量 金沙江下游梯级水库内表层浮游植物调查结果（图 3），3 月梯级水库内浮游植物细胞密度变化范围为 0.14~362.37×10^5 cells/L,平均为 46.91×10^5 cells/L，生物量变化范围为 0.007~19.054 mg/L，平均为 2.617 mg/L；7 月梯级水库内细胞密度变化范围为 0.41~204.98×10^5 cells/L，平均为 38.96×10^5 cells/L，生物量变化范围为 0.037~11.194 mg/L，平均为 2.327 mg/L。由附表Ⅰ、Ⅱ可知，乌东德和白鹤滩库区浮游植物平均细胞密度及生物量均表现为丰水期高于枯水期，而溪洛渡和向家坝库区则表现为枯水期高于丰水期。枯水期浮游植物平均细胞密度和平均生物量均表现为溪洛渡＞向家坝＞白鹤滩＞乌东德；丰水期平均细胞密度表现为白鹤滩＞向家坝＞溪洛渡＞乌东德，平均生物量表现为白鹤滩＞乌东德＞溪洛渡＞向家坝。总体而言，浮游植物现存量在不同水文时期和库区间未表现出一

致的变化趋势，而呈现出一定的空间异质性和季节变化特征。

各个库区内 3 月和 7 月浮游植物相对密度变化（见图 4）：3 月枯水期上游两个库区蓝藻为占优，硅藻占比次之；而下游两个库区则以硅藻占优，隐藻为重要伴随类群。到了 7 月丰水期浮游植物群落发生明显季节性替代：乌东德库区内由蓝藻占优转为隐藻；白鹤滩由蓝藻主导转为硅藻占优；溪洛渡由硅藻单一优势转变为硅藻、绿藻、蓝藻共同占优的均衡结构；向家坝亦由硅藻主导转为硅藻与蓝藻并重，并伴随隐藻比例上升。相应地，总细胞密度的最大值由枯水期的溪洛渡转移至丰水期的白鹤滩，反映出丰水期来水补给和水体混合增强改善了营养盐与光热条件，削弱了单一类群优势并促进群落多样化和均匀化。总体而言，上游至下游梯度在枯水期呈现“上游蓝藻，下游硅藻”的分化格局，而丰水期则演替为“绿藻、隐藻与蓝藻占比共同上升、硅藻占比相对下降”的群落结构特征。

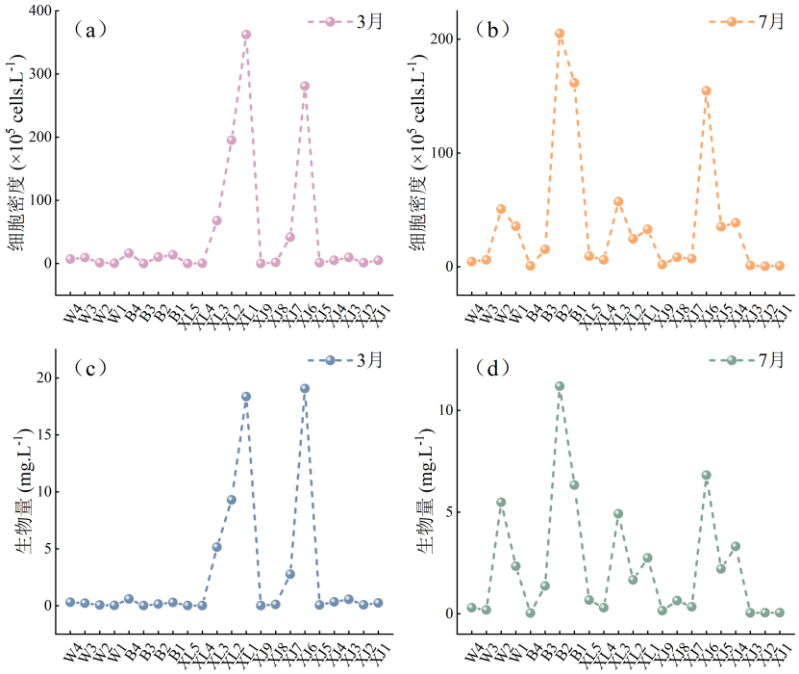

图 3 金沙江下游 3 月、7 月各采样点浮游植物细胞密度及生物量分布

Fig. 3 Distribution of phytoplankton cell density and biomass at various sampling sites in the lower reaches of the Jinsha River in March and July

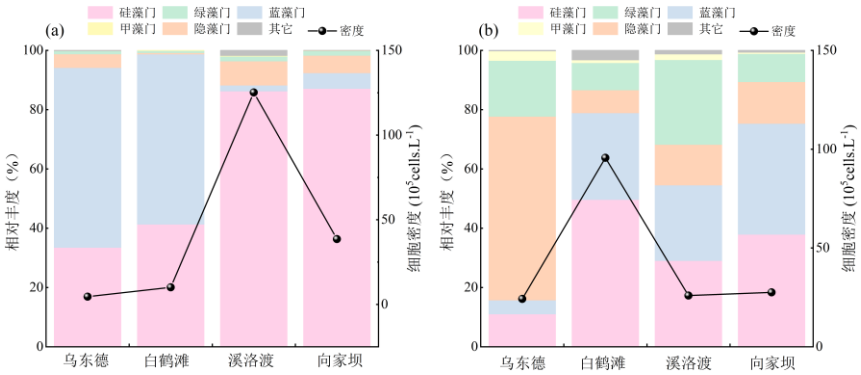

图 4 2025 年 3 月（a）和 7 月（b）金沙江下游梯级水库浮游植物细胞密度及相对丰度变化情况

Fig. 4 Changes in phytoplankton cell density and relative abundance in the lower Jinsha River cascade reservoirs in March (a) and July (b) 2025

2.1.3 各梯级水库浮游植物群落相似性特征　对金沙江下有四座梯级水库浮游植物 NMDS 分析（见图5），枯水期和丰水期二维排序的应力值（Stress）分别为 0.179 和 0.155，说明排序结果可较好反映样点间群落差异。枯水期各库区样点在排序空间中表现出一定分离趋势，但仍存在明显重叠；丰水期各库区样点重叠增强，群落分异减弱。ANOSIM 分析表明（见表 1），枯水期不同库区浮游植物群落组成存在显著差异（R=0.324，P=0.003），而丰水期差异不显著（R=-0.003，P=0.454）。各库区间比较结果进一步显示，枯水期仅溪洛渡与向家坝库区差异显著（P=0.043），乌东德与向家坝库区差异接近显著（P=0.054）；丰水期各库区两两比较均无显著差异（P>0.05）。

2.1.4 坝前深库区浮游植物垂向分布特征同时，在水电站坝前断面表层、中层、深层进行了浮游植物垂向采样，受现场采样条件限制，白鹤滩坝前深库区仅采集了表层水样（见表 2）。结果表明，坝前深库区浮游植物现存量存在明显的季节与垂向差异。乌东德、向家坝及白鹤滩坝前丰水期密度和生物量高于枯水期而溪洛渡则相反。垂向分布方面，除白鹤滩中深层数据缺失外，其余库区均呈现“表层富集、中深层递减”的特征。其中，3 月溪洛渡坝前表层浮游植物密度与生物量显著高于其他库区。

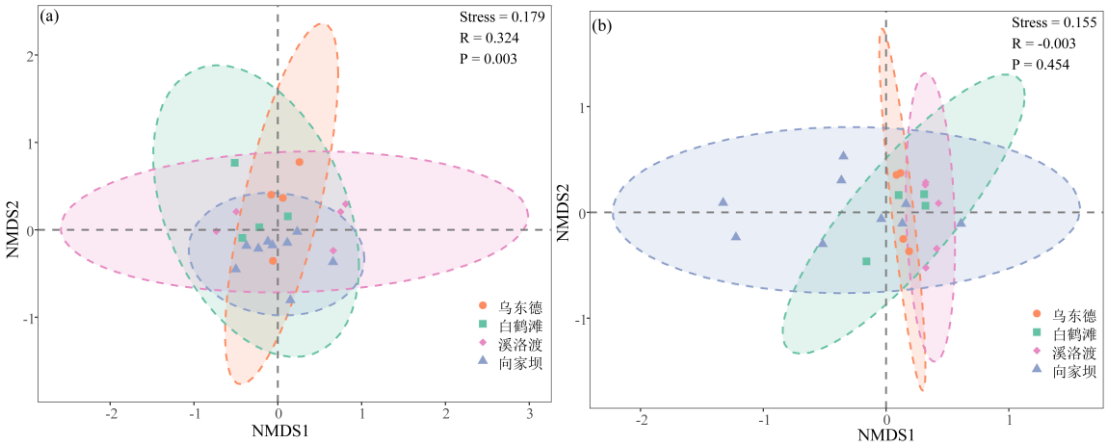

图 5 金沙江下游梯级水库 3 月（a）、7 月(b)浮游植物群落 NMDS 分析

Fig. 5 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) analysis of phytoplankton communities in the cascade reservoirs of the lower Jinsha River during the dry season (a) and wet season (b)

表 1 金沙江下游各库区相似性分析（ANOSIM）结果

Tab.1 Results of analysis of similarities (ANOSIM) among different reservoir areas in the lower Jinsha River

各个库区	P 值（枯水期）	P 值（丰水期）
乌东德 VS 白鹤滩	0.399	0.737
乌东德 VS 溪洛渡	0.265	0.518
乌东德 VS 向家坝	0.054	0.518
白鹤滩 VS 溪洛渡	0.291	0.518
白鹤滩 VS 向家坝	0.221	0.519
溪洛渡 VS 向家坝	0.043*	0.518

种类数也具有显著的时空分异特征。时间上，丰水期物种数整体高于枯水期，群落组成由枯水期以硅藻门为主转变为丰水期硅藻、绿藻、蓝藻等多门类共存的多样化格局。枯水期各水层总物种数普遍低于 14 种且垂向分布较为均匀。至丰水期，物种数显著增加，溪洛渡深层达到本次调查最高值 36 种，且绿藻与蓝藻门物种数在各库区及不同水层均呈上升趋势。垂向分布上，丰水期物种数呈现显著差异：乌东德与溪洛渡库区种类数随水深增加而上升；向家坝则表现出由表层向深层递减的趋势。此外，仅采集表层水样的白鹤滩库区，其物种数同样呈现丰水期显著高于枯水期的季节变化规律。

2.1.5 多样性指数分析　金沙江下游各库区浮游植物多样性指数如图 6 所示：香农维纳指数变化范围为 0.89~3.95，丰富指数变化范围为 0.43~2.61，均匀度指数变化范围为 0.24~0.84,辛普森指数变化范围为 0.24~0.92。采用单因素方差分析检验梯级水库多样性指数的时空差异。结果表明，四项多样性指数在库区间差异均不显著；时间尺度上，丰富度指数、香农维纳指数和辛普森指数在 7 月显著高于 3 月，而均匀度指数在两期之间差异不显著。综合多样性指数平均值的分布范围来看，金沙江下游总体属于 α~β 中污染状态。

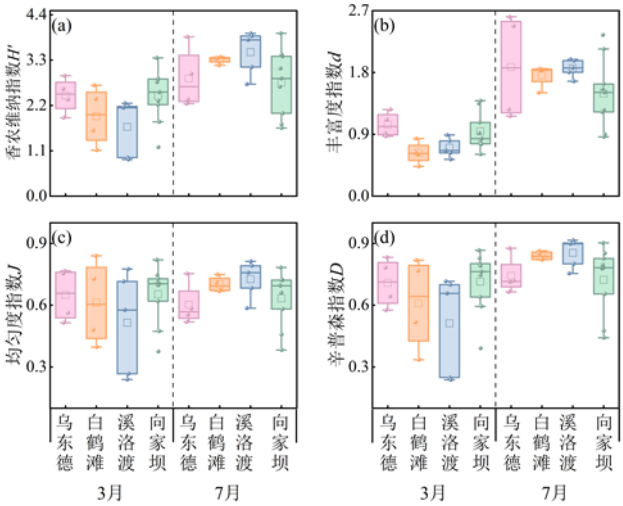

图 6 金沙江下游梯级水库浮游植物多样性指数

Fig. 6 Phytoplankton diversity index of cascade reservoirs in the lower Jinsha River

2.2 优势种

2.2.1 优势种组成及优势度特征 根据优势度计算结果，金沙江下游梯级水库浮游植物优势种（Y>0.02）共有 4 门 16 种（见表 3）,以硅藻种类最多（8 种），绿藻和甲藻次之（各 3 种），隐藻最少（2 种）。优势种类季节差异显著，3 月有优势种 2 门 7 种，其中乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝库区优势种类数分别为 5 种、4 种、2 种和 4 种，共同优势种有 4 种。7 月共检出优势种 4 门 13 种，其中乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝库区优势种类数分别为 7 种、8 种、8 种和 6 种，共同优势种为 9 种。

枯水期优势种以硅藻门为主。小环藻（*Cyclotella* sp.）在各库区均为优势种，且平均优势度最高（Y=0.45），在溪洛渡库区优势度最高（Y_{XL}=0.79）；沟链藻（*Aulacoseira* sp.）和颗粒直链藻（*Aulacoseira granulata*）仅在向家坝库区形占绝对优势；隐藻门中仅隐藻（*Cryptomonas* sp.）达到优势种标准（Y=0.04）。丰水期优势种门类明显增加，隐藻（*Cryptomonas* sp.）平均优势度为 0.24，小环藻仍保持优势（Y=0.16）。其中，衣藻（*Chlamydomonas* sp.）仅在溪洛渡库区占绝对优势，转板藻(*Mougeotia* sp.)仅在溪洛渡库区形成优势种；空星藻*(Coelastrum* sp.)仅在乌东德库区占优。甲藻门中，裸甲藻(*Gymnodinium* sp.)仅在乌东德库区占绝对优势；多甲藻(*Peridinium* sp.)，在各库区内均为优势种但未占绝对优势；角甲藻(*Ceratium* sp.)仅在下游两个库区内占优。总体上，丰水期优势种数量高于枯水期，且门类组成更为丰富。

2.2.2 优势种生态位宽度　枯、丰水期优势种生态位宽度（B_i）范围分别为 1.28~3.78 和 2.21~7.52（表 3）。总体上，丰水期优势种生态位宽度高于枯水期。枯水期，隐藻生态位宽度较大，B_i 为 3.77；其次为脆杆藻（*Fragilaria* sp.）和针杆藻（*Synedra* sp.），B_i 分别为 3.13 和 2.56。小环藻的 B_i 为 2.33，沟链藻和颗粒直链藻的 B_i 分别为 1.42 和 1.37。丰水期，隐藻生态位宽度最大，B_i 为 7.52；其次为蓝隐藻（*Chroomonas* sp.）、衣藻、多甲藻和转板藻，B_i 分别为 4.96、4.95、4.78 和 4.41。小环藻的生态位宽度为 3.40。

表 2 坝前深库区各水层浮游植物种类数、密度与生物量

Tab. 2 Phytoplankton species richness, density, and biomass across water layers in the deep forebay area

月份	库区	水层	总物种数	硅藻	绿藻	蓝藻	隐藻		密度（$\times 10^5$ cells/L）	生物量（mg/L）
3 月	乌东德（79m）	表(0.5m)	14	6	1	1	4		1.17	0.06
		中(39.5m)	6	4	0	0	2		0.24	0.02
		深(79.0m)	8	4	0	1	1		0.48	0.01
								垂向均值	0.63	0.03
	白鹤滩	表(0.5m)	10	6	2	1	3		13.62	0.28
		中	-	-	-	-	-		-	-
		深	-	-	-	-	-		-	-
	溪洛渡（109m）	表(0.5m)	10	2	4	1	2		195.00	9.29
		中(54.5m)	12	6	2	1	2		9.78	0.52
		深(109.0m)	8	5	0	1	0		0.36	0.02
								垂向均值	68.38	3.28
	向家坝（81m）	表(0.5m)	9	6	1	1	0		4.97	0.32
		中(40.5m)	8	5	0	1	1		1.14	0.06
		深(81.0m)	8	6	0	0	1		0.44	0.03
	向家坝（81m）							垂向均值	2.18	0.14
7 月	乌东德(100m)	表(0.5m)	20	6	8	0	3		35.51	2.34
		中(50.0m)	31	11	10	4	3		2.77	0.17
		深(100.0m)	33	11	11	5	2		2.09	0.12
								垂向均值	13.46	0.88
	白鹤滩	表(0.5m)	26	6	9	5	3		161.62	6.33
		中	-	-	-	-	-		-	-
		深	-	-	-	-	-		-	-
	溪洛渡(112m)	表(0.5m)	29	4	14	5	2		32.71	2.75
		中(56.0m)	24	6	10	5	1		1.84	0.11
		深(112.0m)	36	6	18	5	3		2.68	0.19
								垂向均值	12.41	1.02
	向家坝（106m）	表(0.5m)	20	6	9	1	2		38.56	3.32
		中(53.0m)	11	5	3	2	1		0.37	0.02
		深(106.0m)	7	4	2	0	1		0.30	0.02
								垂向均值	13.07	1.13

2.2.3 优势种生态位重叠　各优势种的生态位重叠值如图 7 所示。枯水期及丰水期浮游植物优势种生态位重叠值变化范围分别为[0.021,0.996]、[0.001,0.923]。枯水期 4 个优势种形成 6 个优势种对，其中颗粒直链藻与沟链藻、隐藻与小环藻形成的优势种对显示出较高的重叠度（Q_{ik}＞0.6），隐藻与沟链藻、隐藻与颗粒直链藻形成 2 对具有中等程度的重叠度（0.3＜Q_{ik}≤0.6），小环藻与沟链藻、小环藻与颗粒直链藻形成的 2 个优势种对为低重叠度（Q_{ik}＜0.3）；丰水期 9 个优势种共 36 个优势种对，11 对（30.56%）表

现出较高重叠度，10 对（27.78%）为中等重叠度，15 对（41.67%）为低重叠度。丰水期的生态位重叠值总体高于枯水期，且枯水期高、中、低优势种对分布均匀，而丰水期低重叠度的优势种对占比增加。

表 3 金沙江下游梯级水库浮游植物优势种优势度（Y）及生态位宽度(B_i)

Tab. 3 Dominance (Y) and niche width (B_i) of dominant phytoplankton species in cascade reservoirs of the lower Jinsha River

类别	优势种	3 月						7 月					
		Y_W	Y_B	Y_{XL}	Y_{XJ}	Y	B_i	Y_W	Y_B	Y_{XL}	Y_{XJ}	Y	B_i
绿藻门	衣藻（*Chlamydomonas* sp.）							0.06	0.03	0.21	0.05	0.10	4.95
	转板藻(*Mougeotia* sp.)									0.02		0.02	4.41
	空星藻(*Coelastrum* sp.)							0.03					3.22
硅藻门	沟链藻(*Aulacoseira* sp.)		0.08		0.47	0.15	1.42						
	颗粒沟链藻（颗粒直链藻）(*Aulacoseira granulata*)				0.28	0.07	1.37		0.03				3.66
	小环藻（*Cyclotella* sp.）	0.13	0.27	0.79	0.04	0.45	2.33	0.03	0.15		0.24	0.16	3.40
	普通等片藻（*Diatoma vulgare*）	0.16					1.28						
	脆杆藻（*Fragilaria* sp.）	0.18	0.20				3.13						
	针杆藻（*Synedra* sp.）	0.03	0.08				2.56		0.17	0.03		0.07	2.34
	圆筛藻(*Coscinodiscus* sp.)								0.02	0.06		0.06	2.21
	奇异杆状藻（奇异菱形藻）(*Bacillaria paxillifera*)										0.03		2.65
隐藻门	隐藻（*Cryptomonas* sp.）	0.07		0.05	0.03	0.04	3.77	0.30	0.19	0.09	0.20	0.24	7.52
	蓝隐藻(*Chroomonas* sp.)							0.05					4.96
甲藻门	裸甲藻(*Gymnodinium* sp.)							0.17	0.03	0.07		0.09	4.33
	多甲藻(*Peridinium* sp.)							0.02	0.06	0.03	0.03	0.05	4.78
	角甲藻(*Ceratium* sp.)									0.02	0.03	0.04	2.28

Y_W 为乌东德库区浮游植物优势度；Y_B 为白鹤滩库区浮游植物优势度；Y_{XL} 为溪洛渡库区浮游植物优势度；Y_{XJ} 为向家坝库区浮游植物优势度；Y 为金沙江下游梯级水库浮游植物平均优势度。

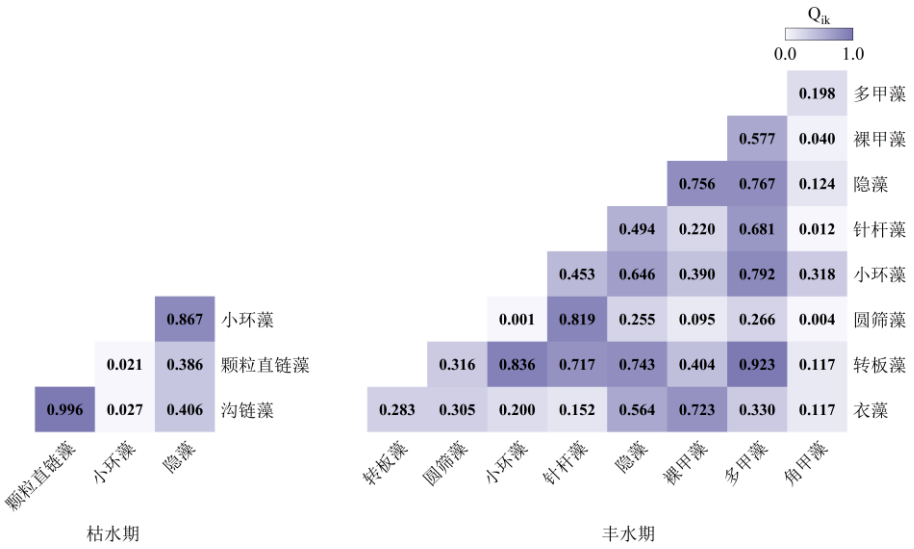

图 7 金沙江下游浮游植物优势种生态位重叠图

Fig. 7 Ecological niche overlap of dominant phytoplankton species in the lower Jinsha River

2.3 金沙江下游梯级水库水环境因子

金沙江下游梯级水库枯、丰水期水环境因子变化见表 4。WT 的变化范围为 14.11~26.45 ℃，各库区 WT 均呈现显著的季节差异（$P<0.01$）。DO 为 7.33~12.73 mg/L，整体处于较高水平。总体上，研究区水体呈弱碱性，pH 为 7.51~8.60，各库区均值为 8.00~8.20，不同水期及库区间差异均不显著（$P>0.05$）。氮、磷等营养盐指标在不同水期和不同库区间存在一定波动，其中向家坝库区 TN 和 NO_3^--N 较高，乌东德库区丰水期 NH_4^+-N 和 TP 较高。EC、TDS 和 COD_{Mn} 在丰水期整体高于枯水期，其平均值范围分别为 446.03~647.08 μs·cm^{-1}、350.08~420.66 mg/L 和 0.72~1.40 mg/L。且部分库区间差异达到显著水平（$P<0.05$），其中向家坝及白鹤滩库区 COD_{Mn} 在枯、丰水期呈现极显著性差异（$P<0.01$）。从空间分布看，EC 和 TDS 总体表现为下游库区高于上游库区，其中向家坝库区最高。

表 4 金沙江下游梯级水库枯、丰水期水环境因子变化特征

Tab.4 Characteristics of changes in environmental parameters during the low-flow and wet seasons at the cascade reservoirs on the lower Jinsha River

环境因子	乌东德		白鹤滩		溪洛渡		向家坝	
	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
A 枯水期								
WT/℃	15.62	14.11~17.99	15.32	14.16~16.18	16.20	15.00~17.34	15.74	14.84~16.51
DO/mg/L	9.65	8.42~12.73	8.47	8.25~8.78	8.84	8.17~10.18	9.09	8.53~10.19
pH	8.18	7.98~8.60	8.00	7.94~8.07	8.07	7.91~8.36	8.12	7.99~8.32
EC/μs.cm^{-1}	446.03	428.90~455.90	470.49	426.40~501.50	485.32	475.75~502.45	490.86	439.13~681.36
TDS/mg/L	352.25	342.00~363.00	375.13	350.50~392.00	379.20	368.00~383.00	387.36	353.67~533.40
TN/mg/L	0.56	0.50~0.59	0.84	0.70~1.20	0.81	0.65~1.25	1.30	0.67~3.34
NO_3^--N/mg/L	0.40	0.33~0.42	0.51	0.41~0.58	0.46	0.40~0.52	0.78	0.42~1.99
NH_4^+-N/mg/L	0.05	0.03~0.08	0.08	0.04~0.08	0.08	0.04~0.16	0.08	0.03~0.28
TP/mg/L	0.01	0.01~0.02	0.02	0.01~0.03	0.03	0.01~0.09	0.03	0.01~0.07
COD_{Mn}/mg/L	0.88	0.80~1.00	0.88	0.70~1.00	0.74	0.50~1.00	0.72	0.60~1.00
B 丰水期								
WT/℃	23.55	21.40~25.41	23.90	22.32~25.41	24.75	20.88~26.45	22.55	21.24~25.31
DO/mg/L	8.74	7.33~9.93	8.78	7.51~9.56	9.50	7.46~10.91	8.11	7.62~9.70
pH	8.20	7.94~8.35	8.14	8.02~8.35	8.12	7.51~8.51	8.01	7.87~8.19
EC/μs.cm^{-1}	585.13	441.65~733.71	525.62	446.80~565.44	607.15	570.00~646.00	647.08	600.00~681.00
TDS/mg/L	388.15	287.00~478.00	350.08	290.43~387.38	394.72	370.67~420.14	420.66	390.22~442.61
TN/mg/L	1.09	0.65~1.43	0.89	0.73~1.10	0.97	0.74~1.11	1.29	0.88~2.31
NO_3^--N/mg/L	0.74	0.43~1.09	0.58	0.42~0.90	0.67	0.48~0.87	0.82	0.58~1.15
NH_4^+-N/mg/L	0.24	0.10~0.42	0.21	0.14~0.26	0.12	0.10~0.14	0.13	0.03~0.42
TP/mg/L	0.05	0.03~0.08	0.04	0.03~0.06	0.03	0.01~0.06	0.03	0.01~0.05
COD_{Mn}/mg/L	1.33	1.10~1.80	1.40	1.30~1.50	1.24	1.00~1.40	1.20	1.00~1.40

2.4 浮游植物群落与水环境因子关系

首先通过方差膨胀因子（Variance Inflation Factor）分析剔除共线性较高的环境因子总溶解性固体（VIF＞10）[40]，再对金沙江下游枯、丰水期的水温、DO、电导率、总磷、总氮、硝酸盐氮、氨氮、COD_{Mn}、pH 共 9 个环境因子与浮游植物优势种密度进行 Pearson 相关性分析及 RDA，研究金沙江下游浮游植物群落的分布规律，并识别调控浮游植物群落时空格局变化的关键环境因子。

经 DCA 分析显示第一轴排序长度小于 3，因此选用 RDA 识别浮游植物优势种与环境因子之间的关

系(见图 8)。RDA 分析结果表明，第一和第二排序轴的特征值分别为 0.3038 和 0.0941，前两轴累积解释了物种变异的 39.79%，并解释了物种-环境变异的 80.59%，表明排序轴对环境因子与优势种群落分布的关系有较强的解释能力。通过蒙特卡洛置换检验（Monte Carlo permutation test），对影响优势种群落演替的关键环境变量进行筛选，结果表明 COD_{Mn}、pH 和 DO 对金沙江下游浮游植物优势种群落时空分布格局具有主导作用（$P<0.05$），其次为水温、硝酸盐氮和总氮。

对于跨水文时期的共同优势种，小环藻与 pH 呈显著正相关，而与水温、电导率、硝酸盐氮和 COD_{Mn} 呈显著负相关；隐藻与水温、DO、电导率、COD_{Mn} 和 pH 均呈显著正相关。对于具有季节代表性的优势种，枯水期优势种沟链藻与水温、电导率和 COD_{Mn} 呈显著负相关，与 pH 和 DO 呈显著正相关；丰水期优势种角甲藻与水温、DO、电导率、硝酸盐氮、COD_{Mn} 和 pH 均呈显著正相关。

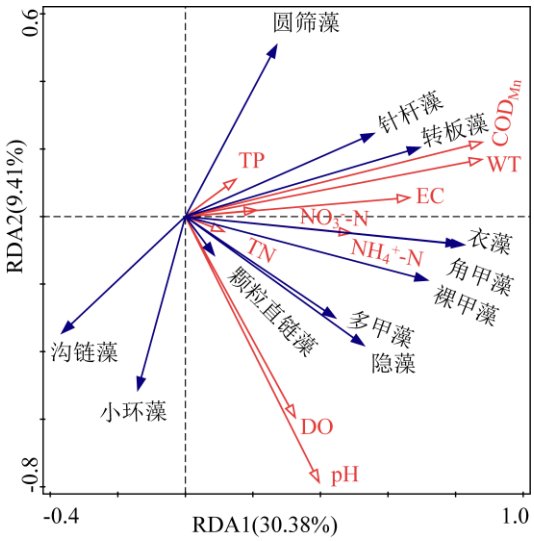

图 8 浮游植物优势种与环境因子冗余分析

Fig. 8 Redundancy analysis of dominant phytoplankton species and environmental factors

3 讨论

3.1 浮游植物群落组成及其变化特征

据金沙江流域近年浮游植物调查资料显示（表 5），不同河段与不同时期的物种数报道存在一定差异（59~114 种）。本研究通过 2025 年 3 月和 7 月对金沙江下游各库区内进行浮游植物调查研究，共检测出 9 门 83 属 104 种，较建坝前部分研究报道呈增加趋势[41]，这与建坝后库区水面扩大、流速降低及透明度提高有关[42]。和该流域近年来已知的调查结果相比，浮游植物种类数量高于 2017—2018 年岗托至水富段[22]和攀枝花至宜宾段[23]，以及 2019 年金安桥至水富段[24]、德格至宜宾段[25]和攀枝花至水富段[26]等江段，略低于渡口至宜宾段[27]和 2019—2020 向家坝水库[28]。金沙江流域历次调查中浮游植物种类数存在差异主要受流域环境空间异质性、浮游植物显著的季节响应，以及采样河段、点位与频次等调查方案不一致的共同影响。

金沙江下游向家坝、溪洛渡、白鹤滩及乌东德水电站分别于 2012、2013、2020 和 2022 年投产运行。既有研究表明，向家坝与溪洛渡水电站运行前（2010—2011 年水富段）[20]，硅藻门、绿藻门和蓝藻门物种数占比分别为 57.48%、17.32%和 5.51%。向家坝与溪洛渡运行后，不同河段硅藻门占比在 65.38%（2014 年石鼓-宜宾）[21]至 40.00%（2019 年金安桥-水富）[24]之间波动，而绿藻门与蓝藻门占比总体呈上升趋势（如 2017—2018 年攀枝花-宜宾[23]：硅藻 50.00%、绿藻 21.00%、蓝藻 8.00%；2019 年攀枝花-水富[26]：硅藻 47.30%、绿藻 33.78%、蓝藻 5.41%）。乌东德投产运行后（2022 年乌东德库区[29]），硅藻门占比降至 37.10%，绿藻门升至 35.48%，蓝藻门为 8.87%；白鹤滩投产运行后（2023—2024 年白鹤滩水库干流

及支流库湾[30]），硅藻门与绿藻门占比分别为 36.50%和 38.90%，蓝藻门为 7.70%。本次调查（攀枝花-宜宾段）硅藻门占比进一步降至 32.69%，绿藻门和蓝藻门分别为 35.58%和 16.35%。总体而言，研究区浮游植物仍以绿藻、硅藻和蓝藻门为主，但随梯级电站陆续投产并进入联合运行阶段，硅藻门占比整体下降，而绿藻门与蓝藻门占比上升，且绿藻门已超过硅藻门。其成因与蓄水运行后库区水动力减弱有关：流速减缓，导致悬浮颗粒物沉积过程加速，从而削弱了上下游之间的营养盐与能量交换。在此水文条件下，硅藻等依赖被动扩散的单细胞浮游藻类，对沉降作用的响应尤为明显[43]。

表 5 金沙江流域浮游植物研究结果对照

Tab.5 Comparative results of phytoplankton studies in the Jinsha River basin

年份	研究流域	采样频率	种类	主要门类	浮游植物密度（$\times 10^5$ cells/L）	生物量（mg/L）	数据来源
2010-2011 年	水富	1 次 4 样点	127	硅藻、绿藻、蓝藻	均值 0.31	均值 0.11	龚廷登等[20]
2014 年	石鼓-宜宾	1 次 6 样点	52	硅藻、绿藻、蓝藻	均值 2.51	均值 0.41	高琦等[21]
2017-2018 年	岗托-水富	4 次 14 样点	100	硅藻、绿藻、蓝藻	0.19~0.34	0.016~0.434	魏志兵等[22]
	攀枝花-宜宾	4 次 30 样点	86	硅藻、绿藻、蓝藻	-	-	郜星晨等[23]
2019 年	金安桥-水富	3 次 11 样点	96	硅藻、绿藻、蓝藻	-	-	龚进玲等[24]
	德格-宜宾	1 次 6 样点	59	硅藻、绿藻、蓝藻	均值 5.1	均值 0.97	钟可儿等[25]
	攀枝花-水富	2 次 7 样点	74	硅藻、绿藻、蓝藻	1.39~10.50	0.05~1.09	李博等[26]
	渡口-宜宾	2 次 19 样点	107	硅藻、绿藻、蓝藻	均值 23.00	-	张俊芳等[27]
2019-2020 年	向家坝水库	13 次 20 样点	119	硅藻、绿藻、蓝藻	0.3~127.26	-	田楚铭等[28]
2022 年	乌东德水库	4 次 10 样点	124	硅藻、绿藻、蓝藻	均值 21.8	0.142	张地继等[29]
2023-2024	白鹤滩水库	11 次 11 样点	167	硅藻、绿藻、蓝藻	4.2-9.13	-	路斌等[30]
2025 年	攀枝花-宜宾	2 次 22 样点	104	硅藻、绿藻、蓝藻	0.14~362.37	0.01~19.05	本研究

结合表 6 所汇总的金沙江流域历次调查结果可见，建坝后部分河段和库区浮游植物密度及生物量报道值较早期研究有所升高，提示部分水域浮游植物现存量可能存在增加趋势。这一变化趋势主要受水动力条件从“急流型”向“缓流型”转变的影响。筑坝蓄水显著降低了河段流速，增强了水体稳定性且泥沙沉降导致水体透明度增加，从而优化了光照环境并提升了浮游植物的光合效率。为浮游植物的生长与繁殖提供了适宜生境，驱动其现存量的上升。

本次调查中在时间尺度上，枯水期浮游植物平均密度大于丰水期（46.91×10^5 cells/L＞38.96×10^5 cells/L）。主要与水动力条件与水环境的季节差异有关。枯水期流速显著降低，水力停留时间延长，抑制了垂向混合，有利于营养盐的滞留[44]，为浮游植物生长提供稳定养分；而丰水期径流量提高，流速增大，加速营养盐被稀释和输移，削弱了浮游植物的生长基础。另一方面，枯水期水位下降且水深变浅，光穿透条件改善为浮游植物的光合过程提供了更有利的条件[45]。此外，相较于丰水期较强的径流稀释作用，枯水期周边畜牧养殖、采砂及农业面源污染的相对输入强度更高，其对水体营养盐和有机物的相对贡献增加，从而在局地尺度上促进浮游植物增殖。金沙江下游硅藻门平均密度枯水期（39.35×10^5 cells/L）大于丰水期（15.12×10^5 cells/L），绿藻门平均密度枯水期（0.71×10^5 cells/L）小于丰水期（5.12×10^5 cells/L），蓝藻门平均密度枯水期（2.96×10^5 cells/L）小于丰水期（11.02×10^5 cells/L）。结合本次调查中，平均水温丰水期（23.56 ℃）高于枯水期（15.75 ℃）。该结果与既有研究中关于硅藻、绿藻和蓝藻季节性演替的结论一致[46-47]，进一步印证了硅藻更适应低温，而绿藻和蓝藻更偏好较高水温的生长特征[48]。

坝前深库区浮游植物垂向分布总体表现为“表层富集、中深层递减”，说明表层仍是深库区浮游植物现存量积累和初级生产的主要水层。这一格局与坝前深水区较强的热分层和受限的垂向交换密切相关。以 3 月溪洛渡坝前为例，现场监测显示该断面水温为 15.24~17.22 ℃，最大温度梯度达 0.51 ℃/m，温跃层厚度为 0.9 m（对应水深 3.6~4.5 m），表明浅层分层明显。较强温跃层可能抑制藻细胞向下混合和稀释，

使其在上混合层内获得较高有效光照并快速累积，从而形成表层浮游植物密度和生物量的高值。与此同时，丰水期坝前深库区物种数整体增加，且绿藻和蓝藻等类群比例上升，表明在较高水温及水动力条件变化背景下，深库区浮游植物群落组成趋于多样化。

在联合调度作用下，各库区之间的水文连通性和生态关联性进一步增强。上游来水及其携带的营养盐、有机颗粒和浮游植物种源可沿程向下游传输，从而影响各库区群落组成。本研究中，丰水期各库区浮游植物群落在 NMDS 排序空间中明显重叠，ANOSIM 分析亦表明库区间差异不显著（R=-0.003，P=0.454），说明在丰水期高流量和梯级联合调度背景下，沿程连通性可能增强了各库区群落组成的同质化。相比之下，枯水期不同库区群落组成存在显著差异（R=0.324，P=0.003），但仅溪洛渡与向家坝之间达到显著分离，其余库区间仍存在较大重叠，表明即使在枯水期，各梯级库区之间仍保持一定连续性。由此可见，梯级连通性并未消除各库区局地环境异质性，而是与水温、营养盐、水动力条件等因素共同作用，塑造了梯级水库群浮游植物群落的时空分布格局。与其他梯级水库相关研究相比，金沙江下游梯级水库浮游植物群落对联合调度的响应既具有一定共性，也呈现出一定的流域特征。已有关于黄河上游梯级水库的研究发现[49]，枯水期浮游植物以硅藻门为优势类群，丰水期蓝藻门和绿藻门优势种群明显增加。本研究中，金沙江下游枯水期优势种同样以硅藻为主，丰水期则表现为硅藻、绿藻、隐藻和甲藻等多类群共同占优，表明季节性水文过程变化可促进浮游植物优势结构由相对单一向多元化转变。针对澜沧江梯级水库的相关研究指出[50]，浮游植物群落沿程呈现上游硅藻占优、中下游绿藻和蓝藻占优的空间分异特征。与之不同，金沙江下游丰水期各库区浮游植物群落相似性增强，库区间差异减弱，表明丰水期高流量过程和梯级联合调度可能增强了库区间水体交换、物质输移和种源传播。此外，已有关于乌江下游梯级水库的研究认为[51]，蓄水后浮游植物种类数较蓄水前有所降低；而本研究中，金沙江下游浮游植物物种数较建坝前部分研究报道有所提高，表明不同流域梯级水库中浮游植物对筑坝及调度的响应方向并不完全一致。总体来看，金沙江下游梯级水库浮游植物响应既体现出枯、丰水期优势类群转换的共性，也表现出丰水期库区间群落结构相似性增强、物种数增加等流域特征。

3.2 浮游植物优势种及其生态位分析

本研究结果显示，金沙江下游浮游植物优势种呈现如下季节特征：小环藻在枯、丰水期均保持稳定优势地位；而隐藻的优势度与生态位宽度则在丰水期同步提升。与历史数据对比发现，该江段优势种数量（4 门 16 种）较以往显著增加，反映出优势种正经历从“高流速、强扰动生境下的单一硅藻群落”向“较低流速驱动的多元群落”转变。首先，小环藻的持续优势，是金沙江下游浮游植物群落结构的核心特征。长期观测数据显示，无论是在早期的石鼓至宜宾段[21]，还是在梯级水电开发后的向家坝[28]、乌东德[29]及白鹤滩水库[30]，小环藻均长期保持较高的优势度。本研究中，小环藻在枯、丰水期均占据绝对优势，进一步佐证了其对金沙江下游水域生境的高度适应性。与此同时，优势种组成呈现出从单一硅藻向多门类演化的趋势：向家坝和溪洛渡水电站运行初期[21-22]，优势种主要集中于硅藻门。而随着乌东德、白鹤滩等水电站的相继运行优势种组成显著多元化[28-30]，扩展至隐藻门、金藻门、裸藻门及甲藻门。

丰水期优势种生态位重叠高于枯水期，枯水期优势种对在高、中、低重叠度上的分布较为均衡，而丰水期低重叠度优势种对的占比相对增加。丰水期小环藻和圆筛藻生态位重叠度最小（O_{ik}=0.001），在资源利用上差异显著，生态位分化程度较高，竞争作用较弱，通过占据不同生态位实现共存[52]。小环藻粒径较小，多为单细胞或短链，且比表面积较大，喜静水[53]。圆筛藻粒径较大，为长链状易沉降，需要一定的水动力条件来维持悬浮且实验表明湍流会促进其对硫酸盐的吸收[54-55]。枯水期小环藻与隐藻生态位重叠度较高（O_{ik}=0.867），在环境因子的响应上具有相似性。均偏好营养盐中等，弱扰动的稳定水体环境[56]。

生态位宽度能够表征优势种的空间分布特征、资源利用能力及其对生境条件的适应程度。通常，较宽的生态位意味着该物种能利用更多类型的资源，具有较高的生境适应性，从而在群落竞争中更显优势。因此可采用广生态位的藻类评价水环境现状。本次调查中，枯水期生态位较宽的有隐藻、脆杆藻和针杆藻，丰水期则以隐藻、衣藻等为代表，均为中污染指示种[57]。这不仅与本研究中基于多样性指数对水质的评价结果一致，也与 2017-2019 年相关研究对金沙江流域的评价结果相符[22-24]，表明四座梯级水库联

合运行前后水质差异并不显著。

3.3 环境因子与浮游植物优势种的相关性

浮游植物群落的组成与分布格局由环境变量与物种适应性策略的共同塑造。随季节更替及、水力停留时间和混合强度等水文过程变化，群落组成与优势种发生相应调整。为应对外界扰动并维持群落稳定，浮游植物可通过形态适应、沉降调节、光合效率变化、碳固定能力差异以及对氮磷等营养盐的吸收利用策略等途径驱动群落演替[58]。总体而言，浮游植物群落组成及其生态位特征主要受水温、DO、pH、营养盐和有机物等环境因子的调控，不同物种对环境梯度的响应差异进一步促成群落的动态更替。在适温条件下，水温升高可提高光合作用和呼吸作用相关酶的活性，进而提高光合效率并加快细胞分裂速率以促进浮游植物增殖[59]。同时，温度还可通过影响热分层、DO 水平及浮游动物捕食压力等间接改变群落结构[60]。DO 亦可直接影响浮游植物的呼吸和光合作用[61]，较低的 DO 水平可能对其增产生抑制作用。pH 与浮游植物增殖存在双向耦合关系，其光合作用消耗 CO_2 导致 pH 升高，而较高的 pH 可能会对藻类的增殖产生限制。同时藻类能通过代谢活动与生理适应机制，对水体 pH 产生一定的反馈调节作用[62]。氮磷营养盐作为浮游植物初级生产的基本营养源，显著影响其群落组成、优势种更替及群落结构演替。流域内各库区平均氮磷比均高于 16 ，相较于氮，磷对浮游植物生长的限制效应更为突出[63]。

Pearson 相关性分析与 RDA 结果表明，影响金沙江下游梯级水库浮游植物群落时空分布的环境决定因子为 pH、DO、COD_{Mn}、其次为水温和硝酸盐氮。从优势种与环境因子的关系看，不同类群对关键环境梯度的响应存在明显差异。小环藻与 pH 呈显著正相关，而与水温、电导率、硝酸盐氮和 COD_{Mn} 呈显著负相关，说明其更适应低温、低有机物和相对稳定的水体环境。隐藻则与水温、DO、电导率、COD_{Mn} 和 pH 均呈显著正相关，且在丰水期优势度和生态位宽度同步升高，表明其在温度升高、高氧及较高有机物背景下具有更强的资源利用能力。枯水期优势种沟链藻和颗粒直链藻主要对应低温、低有机物和相对稳定的环境，而丰水期优势种角甲藻以及新增的衣藻、转板藻、多甲藻和裸甲藻则更适于较高水温、较强扰动和营养盐输入增强的条件。总体来看，环境因子的季节性变化并非直接均匀作用于整个群落，而是通过改变优势种的适生范围和资源利用方式，导致生态位分化，并进一步推动金沙江下游梯级水库浮游植物群落由枯水期硅藻主导向丰水期多门类共存的演替过程。针对本研究识别出 COD_{Mn}、pH、DO、水温及硝酸盐氮为决定金沙江下游梯级水库浮游植物群落动态分布的关键环境变量，建议对于未来梯级水库的管理工作中一方面应加强入库有机物与硝酸盐氮的监管；另一方面，在热分层与藻华高风险期，需通过联合调度优化库区水动力过程与水体交换，抑制藻体在表层聚集与滞留，并缓解底层缺氧及诱发内源营养盐释放，从而实现对浮游植物群落的科学管理与水华风险管控。

4 结论

1）金沙江下游梯级水库枯、丰水期共鉴定出浮游植物 9 门 83 属 104 种，以硅藻、绿藻和蓝藻为主。丰水期浮游植物种类数显著高于枯水期，其现存量在不同水文时期和库区间未表现出一致的变化趋势，而呈现出一定的空间异质性和季节变化特征。

2）从梯级水库群尺度看，枯水期各库区浮游植物群落组成存在一定分异，而丰水期群落相似性增强。

3）水电站坝前浮游植物密度、生物量及物种数呈季节及垂向差异。乌东德、向家坝及白鹤滩坝前丰水期密度和生物量高于枯水期而溪洛渡则相反，垂向上呈现“表层富集、中深层递减”的分布格局，提示饵料资源主要集中于上层水体。在 3 月，溪洛渡表层出现异常高值。季节尺度上，丰水期物种数显著高于枯水期，群落结构由硅藻单优势格局演变为多门类共存的多样化格局。垂向分布上，枯水期各库区分布趋于均一，而丰水期垂向分异显著，且呈现出显著的库区特异性，乌东德与溪洛渡表现为物种数随水深增加而上升的“逆向分层”，向家坝则遵循传统的表层优势分布规律。

4）多样性指数结果显示，四项多样性指数在各库区间均无显著差异；而在时间上，丰富度指数、香农维纳指数和辛普森指数在 7 月显著高于 3 月，均匀度指数则在两期间无显著变化。结合多样性指数的平均值分布范围综合判断，金沙江下游整体处于 α~β 中污染水平。

5）枯、丰水期共鉴定出浮游植物优势种 4 门 16 种，以硅藻门为主。小环藻和隐藻为两期共同优势

种，其中小环藻在两期保持稳定优势，而隐藻在丰水期优势度和生态位宽度同步提升。枯水期优势种以硅藻为主、生态位较窄，表现为枯水期环境筛选下的硅藻优势；丰水期则呈现多门类共同占优、生态位宽度增大的格局。

6）Pearson 相关性分析与 RDA 结果表明，驱动金沙江下游梯级水库浮游植物群落时空分布的关键环境因子为 pH、DO 和 COD_{Mn}。

5 附件

附表 I,附表 II 见电子版（DOI 10.18307/2027.0211）.

6 参考文献

[1] Feng ZY, Deng AJ, Chen CH *et al*. Comparative study of the classical bed load transport rate formulae in mountainous rivers. *Advanced Engineering Sciences*, 2024: 1-16. DOI: 10.12454/j.jsuese.202400616. [冯志毅，邓安军，陈翠华等. 山区河流推移质输沙率公式比较研究. 工程科学与技术, 2024: 1-16.]

[2] Xu T, Lyu ZY, Wang L *et al*. East-west differentiation on spatiotemporal variations of pan evaporation along the lower Jinsha River. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, **56**(7): 140-152. [徐涛，吕振豫，王林等. 金沙江下游地区蒸发皿蒸发量时空变化的东西分异特征. 水利水电技术(中英文), 2025, **56**(7): 140-152.]

[3] Cao R, Li S, Zhou M *et al*. Optimization of joint drawdown operation for cascade reservoirs in lower Jinsha River. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2025, **44**(12): 1-12. DOI: 10.11660/slfdxb.20251201. [曹瑞,李帅,周曼等.金沙江下游梯级水库联合消落优化调度研究.水力发电学报,2025,**44**(12):1-12.]

[4] Chen GY, Chen X, Cai SB *et al*. Study on improving water energy resources utilization efficiency of Changjiang River Basin in new stage. *Yangtze River*, 2023, **54**(10): 1-6. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.001. [陈桂亚，陈潇，蔡淑兵等. 新阶段提升长江流域水能资源利用效能研究. 人民长江, 2023, **54**(10): 1-6.]

[5] Liu WP, Liu HB. Progress, challenges, and countermeasures of operation and dispatching technologies for the Jinsha River Downstream-Three Gorges Cascade Hydropower Corridor. *China Water Resources*, 2025(20): 7-16. [刘伟平，刘海波. 金沙江下游-三峡梯级水电走廊运行调度技术进展、挑战与对策. 中国水利, 2025(20): 7-16.]

[6] Zheng JX, Gao SB, Chi SY *et al*. Hydro-ecological assessment and protection strategies of Jinsha River downstream. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(9): 174-179, 204. [郑金秀，高少波，池仕运等. 金沙江下游水生态状况评价及保护战略.环境科学与技术, 2014, **37**(9): 174-179, 204.]

[7] Wang X, Wang PF, Deng Y *et al*. Impacts of cascade hydropower development on river ecosystem homeostasis: A review. *Journal of Hydrology*, 2024, **638**: 131484. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131484.

[8] Zhou Y, Yang J. Cumulative effect of cascade hydropower development on ecological environment of main stream of Jinsha River. *Pearl River*, 2024, **45**(12): 39-47. [周扬，杨珺. 梯级水电开发对金沙江干流生态环境的累积影响.人民珠江, 2024, **45**(12): 39-47.]

[9] Bai XF, Zhang P, Yang Z *et al*. Impacts of dams on fish habitat connectivity greatly outweigh climate change in the Jinsha river basin, China. *Journal of Hydrology*, 2025, **660**: 133411. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133411.

[10] Liu H, Guo CB, Qu X *et al*. Fish diversity, endemism, threats, and conservation in the Jinsha River Basin (Upper Yangtze River), China. *North American Journal of Fisheries Management*, 2021, **41**(4): 967-984. DOI: 10.1002/nafm.10441.

[11] Ye Y, Ma GW, Long XJ *et al*. Variety of spatial homogeneous degree for runoff in lower reaches of Jinshajiang River and cascaded Three Gorges. *Water Resources and Power*, 2013, **31**(12): 18-20, 41. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2013.12.005. [叶琰，马光文，龙训建等. 金沙江下游及三峡梯级空间径流均匀度变化. 水电能源科学, 2013, **31**(12): 18-20, 41.]

[12] Liu SW, Zhang XF, Lv PY *et al*. Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 656-666. DOI: 10.18307/2019.0305. [刘尚武,张小峰,吕平毓等.金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应.湖泊科学,2019,**31**(3):656-666.]

[13] Jiang CL, Xu RT. Research progress on regulation effects of hydrological factors on ecological environment of rivers and lakes. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, **45**(5): 119-128, 147. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2025.05.012. [姜翠玲，许睿亭. 水文要素对河湖生

态环境的调控效应研究进展.水利水电科技进展, 2025, **45**(5): 119-128, 147.]

[14] Halsey KH, Jones BM. Phytoplankton strategies for photosynthetic energy allocation. *Annual Review of Marine Science*, 2015, **7**: 265-297. DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015813.

[15] Jones RI. Phytoplankton, primary production and nutrient cycling. Aquatic Humic Substances: Ecology and Biogeochemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998: 145-175.

[16] Hu R, Lan YQ, Xiao LJ *et al*. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 11-23. [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.湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]

[17] 常珊, 王丽华. 水生态监测浮游植物群落分布特征及评价. 见: 河海大学编. 《水资源保护》创刊 40 周年学术交流会暨 2025(第十三届)水生态大会论文集. 2025: 812-818.

[18] Cabecinha E, Cortes R, Cabral JA *et al*. Multi-scale approach using phytoplankton as a first step towards the definition of the ecological status of reservoirs. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(2): 240-255. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.04.006.

[19] González-Solís J, Oro D, Jover L *et al*. Trophic niche width and overlap of two sympatric gulls in the southwestern Mediterranean. *Oecologia*, 1997, **112**(1): 75-80. DOI: 10.1007/s004420050285.

[20] Gong TD, Yang WJ, He T *et al*. Investigation on water quality and community structure of aquatic organisms at ShuiFu section in Chin-Sha River. *Freshwater Fisheries*, 2014, **44**(4): 25-34. [龚廷登, 杨伟阶, 何滔等. 金沙江水富段水生生物的群落结构及水质监测. 淡水渔业, 2014, **44**(4): 25-34.]

[21] Gao Q, Ni JR, Zhao XF *et al*. Community structure characteristics of phytoplankton and their relationship with environmental factors in the typical section of chin-Sha river. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, **55**(3): 571-579. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2019.022. [高琦, 倪晋仁, 赵先富等. 金沙江典型河段浮游藻类群落结构及影响因素研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2019, **55**(3): 571-579.]

[22] Wei ZB, He YF, Gong JL *et al*. Temporal and spatial variation of phytoplankton community structure in the main stream of the Jinsha River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(6): 1356-1365. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202006010. [魏志兵, 何勇凤, 龚进玲等. 金沙江干流浮游植物群落结构特征及其时空变化.长江流域资源与环境, 2020, **29**(6): 1356-1365.]

[23] Gao XC, Zhang Q, Su W *et al*. Ecosystem health assessment of lower Jinsha River based on the phytoplanktonic index of biotic integrity (P-IBI). *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(1): 11-19. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202204130113. [郜星晨, 张琪, 苏巍等. 基于浮游植物生物完整性指数的金沙江下游河流生态健康评价. 水生态学杂志, 2025, **46**(1): 11-19.]

[24] Gong JL, Zhu TB, Yang DG *et al*. Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the middle and lower reaches of Jinsha River. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(3): 86-93. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202108200285. [龚进玲, 朱挺兵, 杨德国等. 金沙江中下游浮游植物功能群与环境因子的关系. 水生态学杂志, 2023, **44**(3): 86-93.]

[25] Zhong KE, Yang X, Ma JS *et al*. Spatial heterogeneity and driving factors of phytoplankton community structure in the main stem of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(11): 2458-2472. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202211011. [钟可儿, 杨潇, 马吉顺等. 长江干流浮游植物群落结构空间异质性及其影响因素. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(11): 2458-2472.]

[26] Li B, Su W, Huang T *et al*. Phytoplankton community ecology and its relationship with environmental factors in the lower Jinsha River. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(4): 18-28. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202111300400. [李博, 苏巍, 黄涛等. 金沙江下游浮游植物群落生态特征及与环境因子关系. 水生态学杂志, 2023, **44**(4): 18-28.]

[27] 张俊芳, 胡晓红, 陈威等. 金沙江下游浮游植物优势种生态位分析. 见: 中国水利学会, 黄河水利委员会编. 《中国水利学会 2020 学术年会论文集第一分册》. 北京: 水利部中国科学院水工程生态研究所水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室; 长江水利委员会河湖保护与建安中心, 2020: 281-285.

[28] Tian CM, Zhang DJ, Mi WJ *et al*. Spatio-temporal characteristics and environmental driving factors of the phytoplankton community in xiangjiaba reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(2): 194-203. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202212260512. [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. 水生态学杂志, 2025, **46**(2): 194-203.]

[29] Zhang DJ, Tian CM, Gao YL *et al*. Spatiotemporal dynamics of the phytoplankton community and the influence of environmental factors in wudongde reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(4): 174-184. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202306260172. [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. 水生态学杂志, 2025, **46**(4): 174-184.]

[30] Lu B, Li DM, Qi QS *et al*. Seasonal dynamics and driving factors of the ecological niches of dominant phytoplankton species in Baihetan Reservoir.

Journal of Hydroecology, 2026, **47**(1): 214-228. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202505060002. [路斌，李丹敏，齐青松等．白鹤滩水库浮游植物优势种生态位的季节动态及其驱动因子．水生态学杂志, 2026, **47**(1): 214-228.]

[31] 蔡庆华．水域生态系统观测规范．北京：中国环境科学出版社, 2007.

[32] 中华人民共和国农业部. SC/T 9402-2010 淡水浮游生物调查技术规范．北京：中国标准出版社, 2011.

[33] 中国国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会．水和废水监测分析方法(第四版增补版)．北京：中国环境科学出版社, 2006: 722-724.

[34] Magurran AE. Ecological Diversity and Its Measurement. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988. DOI: 10.1007/978-94-015-7358-0.

[35] Simpson EH. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, **163**(4148): 688. DOI: 10.1038/163688a0.

[36] McNaughton SJ. Relationships among functional properties of Californian grassland. *Nature*, 1967, **216**(5111): 168-169. DOI: 10.1038/216168b0.

[37] Levins R. *Evolution in Changing Environments: Some Theoretical Explorations. (MPB-2)*. Princeton: Princeton University Press, 1968 DOI: 10.1515/9780691209418.

[38] Pianka ER. The structure of lizard communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, **4**: 53-74. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000413.

[39] Lai JS. Canoco 5: A new version of an ecological multivariate data ordination program. *Biodiversity Science*, 2013, **21**(6): 765-768. [赖江山．生态学多元数据排序分析软件 Canoco5 介绍.生物多样性, 2013, **21**(6): 765-768.]

[40] 贾俊平．统计学．北京：中国人民大学出版社, 2018: 1-185.

[41] 刘佳丽．长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区四川段周丛藻类研究[学位论文]．重庆：西南大学, 2009.

[42] Chen DQ, Chang JB, Gu HB. Impacts of Jinsha River first stage project on ecology and environment of nature reserve and its countermeasures. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2005, **22**(2): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2005.02.006. [陈大庆，常剑波，顾洪宾．金沙江一期工程对保护区生态环境的影响与对策.长江科学院院报, 2005, **22**(2): 21-24.]

[43] Winder M, Reuter JE, Schladow SG. Lake warming favours small-sized planktonic diatom species. *Proceedings Biological Sciences*, 2009, **276**(1656): 427-435. DOI: 10.1098/rspb.2008.1200.

[44] de Klein JJM. From ditch to delta: Nutrient retention in running waters[D]. Wageningen University and Research, 2008. DOI: 10.18174/122001

[45] Tian CM, Xiao QW, Qi QS *et al*. Hydrodynamic conditions on phytoplankton community structure and water environment in the Heishui river reservoir bay. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(5): 124-136. DOI: 10.7541/2025.2024.0406. [田楚铭，肖淇文，齐青松等．水动力条件对黑水河库湾浮游植物群落结构和水环境的影响.水生生物学报, 2025, **49**(5): 124-136.]

[46] 刘少全．渭河中游浮游生物和大型底栖动物群落结构及其与水环境因子的关系[学位论文]．杨凌：西北农林科技大学, 2025.

[47] Ye SH, Chen ZF, Lin XM *et al*. Characteristics of phytoplankton community structure and their influencing factors in the trunk stream and main tributaries of the Tanjiang River. *Wetland Science*, 2025, **23**(5): 1011-1023. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.20240051. [叶四化，陈湛峰，林学明等．潭江干流及主要支流浮游植物群落结构特征及其影响因子．湿地科学, 2025, **23**(5): 1011-1023.]

[48] Li F, Zeng RK, Liu XS *et al*. The seasonal change of phytoplankton community structure and water environmental factors in Ertan Reservoir. *Journal of Chongqing Normal University*: *Natural Science*, 2021, **38**(3): 50-61, 2. DOI: 10.11721/cqnuj20210313. [李锋，曾如奎，刘小帅等．二滩水库浮游植物群落结构特征及水环境因子的季节变化.重庆师范大学学报：自然科学版, 2021, **38**(3): 50-61, 2.]

[49] Luo QY, Zhu LY, Zu ZG *et al*. Exploring the mechanisms shaping phytoplankton community structure in cascade reservoirs of the upper Yellow River. *Scientia Sinica*: *Technologica*, 2025, **55**(7): 1207-1221. [罗其勇，朱林宇，祖志刚等．黄河上游梯级水库浮游植物群落构建机制研究.中国科学: 技术科学, 2025, **55**(7): 1207-1221.]

[50] Zhang Q, Chen YC, Lin YQ *et al*. Characteristic of phytoplankton community structure and its driving factors along the cascade reservoirs in the Lancang River. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 530-540. DOI: 10.18307/2023.0211. [张琦，陈宇琛，林育青等．澜沧江梯级水库浮游植物群落结构特征及其关键驱动因子．湖泊科学, 2023, **35**(2): 530-540.]

[51] Zheng X, Hu JX, Huang HZ *et al*. Structural characteristics and diversity analysis of phytoplankton community in two cascade reservoirs at the lower reaches of Wujiang River. *Chinese Journal of Fisheries*, 2024, **37**(1): 75-80. [郑鑫，胡菊香，黄海洲等．乌江下游梯级水库浮游植物群落结构特征与多样性分析.水产学杂志, 2024, **37**(1): 75-80.]

[52] Yin JQ, Wang X, Zheng LY *et al*. Ecological niche characteristics and interspecific associations of herbaceous plant communities along the banks of Puhe National Wetland Park. *Pratacultural Science*, 2026, **43**(3): 528-539. [尹嘉淇，王迅，郑立媛等．蒲河国家湿地公园沿岸草本植物群落物种

的生态位特征及种间关联.草业科学, 2026, **43**(3): 528-539.]

[53] Gale DK, Rorrer GL. Enhanced photoluminescence detection of immuno complex formation by antibody-functionalized, Ge-doped biosilica from the diatom *Cyclotella* sp. *Nanomaterials*, 2023, **13**(13): 1950. DOI: 10.3390/nano13131950.

[54] Peters F, Arin L, Marrasé C *et al*. Effects of small-scale turbulence on the growth of two diatoms of different size in a phosphorus-limited medium. *Journal of Marine Systems*, 2006, **61**(3/4): 134-148. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.012.

[55] Aitken ZH, Luo S, Reynolds SN *et al*. Microstructure provides insights into evolutionary design and resilience of *Coscinodiscus* sp. Frustule. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(8): 2017-2022. DOI: 10.1073/pnas.1519790113.

[56] 彭朵. 滇中引水工程施工期河流浮游植物群落时空格局、驱动因素及风险预测[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2025.

[57] Rao K, Guo WQ, Wang P. Characteristics of the plankton community and driving environmental factors in Houguan Lake. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(4): 23-29. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202102210044. [饶科, 郭雯淇, 汪平. 后官湖浮游生物群落结构特征及其环境驱动因子. 水生态学杂志, 2022, **43**(4): 23-29.]

[58] Reynolds CS, Padisák J, Sommer U. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: A synthesis. *Hydrobiologia*, 1993, **249**(1): 183-188. DOI: 10.1007/BF00008853.

[59] Staehr PA, SAND-JENSEN K. Seasonal changes in temperature and nutrient control of photosynthesis, respiration and growth of natural phytoplankton communities. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(2): 249-262. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2005.01490.x.

[60] Trombetta T, Vidussi F, Mas S *et al*. Water temperature drives phytoplankton blooms in coastal waters. *PLoS One*, 2019, **14**(4): e0214933. DOI: 10.1371/journal.pone.0214933.

[61] Yoshikawa T, Murata O, Furuya K *et al*. Short-term covariation of dissolved oxygen and phytoplankton photosynthesis in a coastal fish aquaculture site. *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, 2007, **74**(3): 515-527. DOI: 10.1016/j.ecss.2007.05.004.

[62] Zhang Y, Liu ZH, Wu Y *et al*. Relationships between biomass of phytoplankton and submerged macrophytes and physicochemical variables of water in Lake Caohai, China: Implication for mitigation of cyanobacteria blooms by CO_2 fertilization. *Journal of Hydrology*, 2023, **617**: 129111. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129111.

[63] Tett P, Droop MR, Heaney SI. The redfield ratio and phytoplankton growth rate. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1985, **65**(2): 487-504. DOI: 10.1017/s0025315400050566.

附表Ⅰ 金沙江下游梯级水库浮游植物各门细胞密度变化特征

Attached Tab.Ⅰ Characteristics of Cell Density Variations in Phytoplankton Phyla at Cascading Reservoirs in the Lower Jinsha River

水文时期	门类	乌东德		白鹤滩		溪洛渡		向家坝	
		平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
枯水期（3 月）	蓝藻门	2.79	0~5.92	5.80	0.04~9.12	2.48	0~8.15	2.04	0.09~9.37
	绿藻门	0.05	0.02~0.07	0.07	0~0.18	2.00	0~3.99	0.58	0~5.13
	硅藻门	1.54	0.25~3.34	4.17	0.14~10.27	108.02	0.13~316.33	33.63	0.14~247.15
	隐藻门	0.21	0.06~0.30	0.05	0~0.19	10.19	0~31.86	2.27	0~18.82
	甲藻门	0	0	0.01	0~0.03	0.33	0~1.39	0.05	0~0.24
	金藻门	0	0	0	0	0.23	0~1.14	0	0
	定鞭藻门	0	0~0.02	0	0	1.88	0~7.58	0	0~0.01
	裸藻门	0	0	0	0	0.07	0~0.33	0.02	0~0.16
	合计	4.60	0.55~9.54	10.09	0.21~16.27	125.19	0.14~362.37	38.58	0.24~280.89
丰水期（7 月）	蓝藻门	1.14	0~3.79	27.97	0.31~65.34	6.61	1.75~11.87	10.32	0~83.75
	绿藻门	4.56	0.39~12.60	8.79	0.05~19.62	7.41	0.21~15.77	2.60	0~8.30
	硅藻门	2.68	1.75~3.73	47.53	0.41~108.15	7.55	3.56~19.16	10.45	0.07~32.19
	隐藻门	15.0	0.07~33.42	7.37	0.04~18.11	3.56	0~11.39	3.88	0~28.17
	甲藻门	0.78	0.01~3.64	0.92	0~2.77	0.50	0~0.93	0.13	0~0.75
	金藻门	0.04	0~0.09	0.14	0~0.50	0.18	0~0.75	0.06	0~0.50
	定鞭藻门	0	0	2.81	0~10.31	0.02	0~0.08	0.12	0~1.01
	黄藻门	0	0~0.01	0	0	0	0	0	0
	裸藻门	0	0~0.02	0.12	0~0.25	0.12	0~0.38	0	0
	合计	24.21	4.52~50.70	95.65	0.82~204.98	25.94	6.01~57.27	27.55	0.41~154.68

注：表中细胞密度单位为$\times 10^5$ cells/L

附表Ⅱ 金沙江下游梯级水库浮游植物各门生物量变化特征

Attached Tab.Ⅱ Characteristics of Biomass Changes in Phytoplankton Phyla in the Cascading Reservoirs of the Lower Jinsha River

水文时期	门类	乌东德		白鹤滩		溪洛渡		向家坝	
		平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
枯水期（3 月）	蓝藻门	0.003	0~0.007	0.008	0~0.013	0.003	0~0.013	0.007	0~0.047
	绿藻门	0.004	0~0.014	0.002	0~0.007	0.064	0~0.134	0.060	0~0.536
	硅藻门	0.128	0.013~0.275	0.234	0.07~0.5445	5.502	0.010~15.963	2.323	0.012~17.167
	隐藻门	0.015	0.007~0.023	0.002	0~0.007	0.706	0~2.146	0.155	0~1.117
	甲藻门	0.001	0~0.002	0.005	0~0.021	0.246	0~1.108	0.023	0~0.122
	金藻门	0	0~0.001	0	0	0.004	0~0.018	0	0
	定鞭藻门	0	0	0	0	0.009	0~0.038	0	0
	裸藻门	0	0	0	0	0.026	0~0.130	0.007	0~0.065
	合计	0.151	0.032~0.304	0.250	0.008~0.586	6.560	0.010~18.346	2.575	0.015~19.054
丰水期（7 月）	蓝藻门	0.003	0~0.011	0.092	0.001~0.230	0.021	0.005~0.035	0.025	0~0.199
	绿藻门	0.337	0.010~1.223	0.484	0.003~1.111	0.686	0.005~2.107	0.195	0.01~0.876
	硅藻门	0.175	0.120~0.232	2.551	0.025~5.448	0.489	0.193~1.126	0.605	0.005~2.100
	隐藻门	0.972	0.001~2.141	0.961	0.008~2.475	0.334	0~0.745	0.462	0~2.958
	甲藻门	0.579	0.007~1.977	0.556	0.002~1.685	0.442	0~0.920	0.212	0~1.283
	金藻门	0.012	0~0.027	0.027	0~0.093	0.040	0~0.161	0.017	0~0.151
	定鞭藻门	0	0	0.014	0~0.052	0	0	0.001	0~0.005
	黄藻门	0	0~0.002	0	0	0	0	0	0
	裸藻门	0.002	0~0.007	0.047	0~0.101	0.049	0~0.151	0	0
	合计	2.080	0.193~5.483	4.732	0.038~11.194	2.062	0.2997~4.920	1.516	0.047~6.817

注：表中生物量度单位为 mg/L