

## 云贵高原一座典型高原水库浮游植物群落演替特征及其与环境因子的关系\*

周帆<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 徐韬<sup>2</sup>, 杨阳<sup>1\*\*</sup>

(1: 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550025)

(2: 贵州师范大学应急管理学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 浮游植物是水体的初级生产者, 可以指示环境变化。高原水库由于其蒸发量大、雨季短、旱季长、抗污染能力差的特点, 生态系统脆弱, 其浮游植物群落的变化对环境条件更为敏感。为了解云贵高原地区乌江渡水库浮游植物的群落结构和演替特征, 于2021年6月—2022年5月对乌江渡水库浮游植物群落进行调查, 并应用功能群的方法对浮游植物进行分类。结果发现: 1) 2021年6月—2022年5月, 乌江渡水库表层水体中共鉴定出浮游植物106种, 共8门67属, 其中, 生物量最高的为硅藻门, 种类数最多的为绿藻门; 2) 乌江渡水库表层水体理化性质和浮游植物群落存在显著的季节性差异, 而相同季节内不同位置差异不显著; 3) 乌江渡水库表层水体春夏秋季为中—轻度富营养状态, 而冬季为中营养状态; 4) 乌江渡水库中共有浮游植物群落功能群24类, 基于优势度, 其季节性演替模式为B/C/L0/P(春季)→B/J/L0/P/S1/T(夏季)→B/L0/P/S1/T(秋季)→B/P(冬季), 春季和秋季优势功能群关联显著, 而夏季和冬季优势功能群关联不显著, 相对独立, 即浮游植物群落演替伴随着群落稳定性的变化; 5) 氮磷营养盐、温度和溶解氧是影响乌江渡水库表层浮游植物群落的关键环境因子。本研究提供了云贵高原地区典型高原水体中浮游植物群落结构的背景信息, 并从功能群的角度分析了群落的特征及其主要影响因素。

**关键词:** 浮游植物; 功能群; 多样性; 优势度; 乌江渡水库

## Succession characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in a typical plateau reservoir in Yunnan-Guizhou Plateau\*

Zhou Fan<sup>1</sup>, Chen Chen<sup>1</sup>, Xu Tao<sup>2</sup> & Yang Yang<sup>1\*\*</sup>

(1: School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, P.R.China)

(2: School of Guizhou Emergence Management, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, P.R.China)

**Abstract:** Phytoplankton are the primary producers in the water column which could indicate environmental changes. The aquatic ecosystems of plateau reservoirs are fragile due to the large evaporation, short rainy season, long dry season and weak resistance to pollutions. Therefore, the dynamics of phytoplankton communities are more sensitive to environmental changes. In order to reveal the community structure and succession characteristics of phytoplankton in Wujiangdu Reservoir in Yunnan-Guizhou Plateau, we investigated phytoplankton community in Wujiangdu Reservoir from June 2021 to May 2022, and classified the phytoplankton according to its functional groups. Results showed that: 1) A total of 106 species/taxa of phytoplankton were identified in the surface water of Wujiangdu Reservoir, belonging to 8 phyla and 67 genera. Bacillariophyta had the greatest biomass, and Chlorophyta had the most abundant species richness. 2) There were significant seasonal differences in physical and chemical properties and phytoplankton communities in the surface water of Wujiangdu Reservoir, but the spatial heterogeneity, referring to different sites in the same season, was insignificant. 3) The surface water of Wujiangdu Reservoir was mesotrophic to moderately eutrophic in spring, summer and autumn, and was mesotrophic in winter. 4) There were 24 functional groups of phytoplankton communities identified

\* 2023-08-25 收稿; 2023-11-17 收修改稿。

贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y072)和贵州省高层次留学人才创新创业择优资助项目((2020)09号)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: yang.yang@gznu.edu.cn。

in Wujiangu Reservoir. Based on dominance, the seasonal dynamic pattern was B/C/L0/P (spring) → B/J/L0/P/S1/T (summer) → B/L0/P/S1/T (autumn) → B and P (winter). The correlations between the dominant functional groups in spring and autumn were significant, while in-significant in summer and winter, indicating their relative independence. Therefore, the seasonal dynamics of phytoplankton community was accompanied with the changes of community stability. 5) Nitrogen and phosphorus nutrients, temperature and dissolved oxygen were the key environmental factors affecting the phytoplankton community in Wujiangu Reservoir. This study provided the background information of phytoplankton community structure in a typical plateau reservoir of Yungui Plateau, described the characteristics and analyzed the primary factors for the seasonal dynamics.

**Keywords:** Phytoplankton; functional groups; diversity; dominance; Wujiangu Reservoir

浮游植物作为水生态系统的初级生产者,对环境变化敏感,常常作为判断水质的重要指标,用来评估水体健康状况<sup>[1-2]</sup>。其群落的时空变化和演替是各种环境条件共同作用的结果,这些环境因素作为浮游植物在其栖息地出现或消失的选择机制,影响浮游植物群落的组成和丰度。通过监测水体中的浮游植物群落,可以有效了解水体营养状况。常规的浮游植物监测,采用系统分类的方法进行鉴定,然而这种分类方法并不能很好地体现出浮游植物的生态功能<sup>[3]</sup>。因此,为了更好地研究浮游植物生态功能和评价水环境状况,研究人员开始提出新的分类方法<sup>[4]</sup>。1980年,Reynolds等<sup>[5]</sup>第一次提出浮游植物功能群的概念及其分类方法,把浮游植物功能群分成了39个功能群,功能群的划分可以更直观地看出优势种群与环境因子的关系,对生态学发展有着促进作用<sup>[6]</sup>。目前,应用较多的功能群划分系统有FG(functional groups)、MFG(morphology-functional groups)、MBFG(morphology-based functional groups)和PFT(plant functional types)<sup>[7]</sup>。其中FG法是最早提出的功能群系统,该功能群分类方法的建立具有最重要的两个生态学假设:其一,适应能力强的物种比适应能力弱的物种更能耐受环境中的限制因素;其二,包含多种环境因子的复杂环境总会被一系列适应性相似的物种占据<sup>[8]</sup>。与其他几种方法相比较,FG法更能较为全面地反映藻类的栖息地属性、对环境的耐受能力以及水体的营养等级等各个方面,近年来在不同类型的湖库水体中得到广泛地应用<sup>[1,9-12]</sup>,包括热带浅水湖和亚热带平原湖泊等<sup>[13-14]</sup>,然而在亚热带高原河道型水库中的相关研究仍然不足。高原湖库是贵州地区重要的水资源类型和生物栖息地,具有航运、旅游、供水、灌溉等功能。这些水体发挥着防汛抗旱、气候条件和生物多样性维持等生态系统功能,为社会经济的可持续发展提供重要的生态环境基础,然而其对环境变化的敏感性导致其生态脆弱和治理艰巨。因此,高原水体中浮游植物的研究对环境变化下水生态环境保护和水资源配置至关重要。

乌江是长江上游南岸最大的支流,同时也是长江干流营养元素的主要输入河流之一<sup>[15]</sup>。乌江渡水库处于高山峡谷地段,河库狭窄,两岸地形对称,呈“V”形河谷,水力滞留时间短、流速高,水深大,河床宽一般为40~100 m,温度年变化幅度相对较小,具有冬暖夏凉的特点,属于典型的干流峡谷型水库<sup>[16]</sup>,流域面积内径流带来的污染是其主要污染源。河道型水库是在河流的峡口处建造河坝形成的,在高原地区,气候变化和人类活动对此类水体的影响日益突出。乌江干流中、下游多年来遭受严重的磷污染。两个大型国有磷化工企业采用湿法工艺生产磷酸所产生的固体废渣磷石膏长期堆放,积累数量巨大<sup>[17]</sup>。此外,乌江流域农业和养殖业的增加势必导致外来污染的增多,使水体富营养化程度加重。因此,针对高原河道型水库的研究对于河流流域面积内的污染评估和综合治理有至关重要的作用。过去的许多研究集中在氮磷平衡引起的水质变化<sup>[18]</sup>及对水体富营养化综合评价<sup>[19]</sup>等方面。其中涉及浮游植物的研究包括:2005年对乌江干流浮游植物分布与富营养化研究<sup>[20]</sup>、2011年对乌江渡水库浮游植物分布的研究<sup>[16]</sup>、2013年夏季对乌江渡水库浮游植物种类组成的调查<sup>[21]</sup>以及2015年对乌江流域浮游植物群落结构的研究<sup>[22]</sup>。这些研究均未从功能群水平对浮游植物群落的组成以及季节性变化模式进行分析。此外,我们对乌江渡水库中浮游植物群落的时空异质性及其关键影响因素知之甚少。本文是首次对乌江渡水库浮游植物进行功能群的鉴定和分析,并探究其在不同季节与环境因子的关系,以期对乌江渡水库水体富营养化防治提供理论依据,并为贵州高原生态与水库水质监管和水域可持续发展提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样区域概况及样品采集

乌江渡水库位于乌江流域上金沙、遵义和息烽三县交界的乌江干流上,属于典型的峡谷型大型深水水库<sup>[21]</sup>。根据乌江渡水库的形态设置 5 个采样点,分别为江口、团林、漩塘、息烽、偏岩,于 2021 年 6 月—2022 年 5 月对 5 个点位按月进行采样(图 1)。基于乌江渡水库的位置,分别选取有水流交汇处的点,干流点和库湾点进行样品采集,再考虑河道型水库特点,沿河道设置。其中,江口和团林处有来自支流的汇水,漩塘位于水流较慢的库湾区,为主要来水口,息烽和偏岩分别位于息烽河和偏岩河与干流的交汇处。其中,息烽采样点沿岸有工业活动,偏岩采样点位于乌江渡库区内较大的一级支流,该处有网箱养鱼的历史。

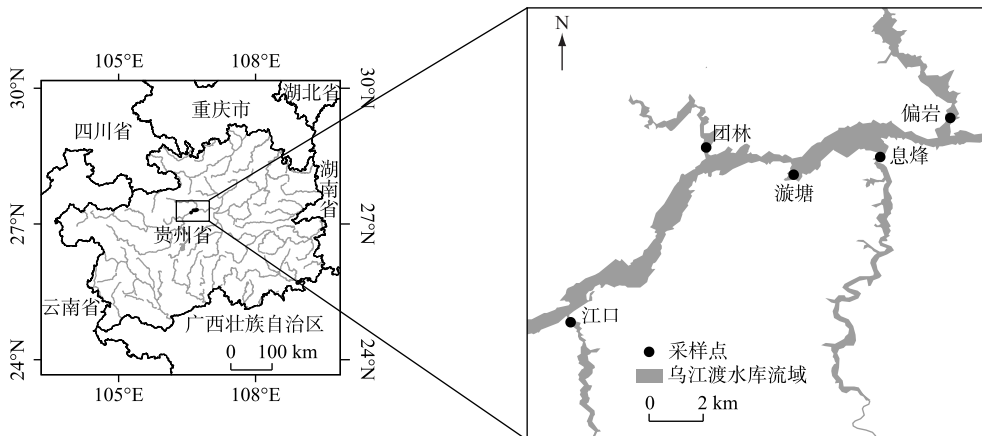


图 1 云贵高原地区乌江渡水库采样点分布(左图来源于 <https://zujian.xkw.com/18q9787889.html>, 右图使用 ArcGIS 10.8 软件绘制)

Fig.1 Sampling sites of Wujiangdu Reservoir (left map is from <https://zujian.xkw.com/18q9787889.html>, and right map was plotted using ArcGIS 10.8)

### 1.2 指标检测分析

采用多参数水质监测仪 YSI (HI98194) 测定水温(WT)、溶解氧(DO)、酸碱度(pH)和电导率(EC)。用塞氏盘测定水体透明度(SD),用 5 L 采水器采集表层 0.5 m 处水样用于水体理化性质和浮游植物的测定。水体总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、溶解性硅酸盐(DSi)、叶绿素(Chl.*a*)的测定方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[23]</sup>。其中,采用钼酸铵分光光度法测定 TP 浓度;碱性过硫酸钾—紫外分光光度法测定 TN 浓度;硅钼蓝比色法测定 DSi 浓度;纳氏试剂比色法测定 NH<sub>3</sub>-N 浓度;紫外分光光度法测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度;重氮耦合分光光度法测 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度;钼锑抗分光光度法测定 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度;丙酮萃取法在紫外分光光度计下测定 Chl.*a* 浓度。

保留 500 mL 水样,用浓度为 10% 的鲁格固定,在实验室静置 24~28 h 后用虹吸法浓缩至 20~40 mL,于倒置显微镜下进行鉴定和计数<sup>[24]</sup>。浮游植物的计数方法采用目镜视野法,用 0.1 mL 的浮游植物计数框在倒置显微镜下进行计数。计数时摇匀浓缩液,立即取 0.1 mL 样品放入计数框中全片计数,细胞数在 400 个以上。根据细胞浓缩倍数换算为每升水样中的细胞数(cells/L)<sup>[25]</sup>。生物量的计算参照《淡水浮游生物研究方法》<sup>[26]</sup>;根据藻类的形状按最近似的几何形状测量必要的量度,如长度、高度、直径等,然后按体积公式计算出体积,再将藻类的体积换算为生物量。

### 1.3 数据统计分析

分别使用 Excel 2010 与 Origin 2023 软件进行数据统计分析和图表的绘制。使用 R 软件计算 Shannon、Evenness、Simpson 多样性指数。其中 Simpson 指数采用 1-D 的运算公式。Shannon 多样性指数<sup>[27]</sup>主要反映

水体浮游植物群落的结构复杂程度。一般来说,水体的 Shannon 多样性指数越高,反映水质较好;而当水体受到污染时,敏感型的浮游植物种类就会消失,导致多样性降低、水质下降<sup>[28]</sup>。均匀度<sup>[21]</sup>(Evenness)是指一个群落或生境中全部物种个体数目的分配状况,它反映的是各物种个体数目分配的均匀程度。

以 SD、TN、TP 和 Chl.*a* 为参数,采用营养状态指数法(trophic state index, TSI)对乌江渡水体营养状态进行评价<sup>[29]</sup>,其中,TSI 值<30 为贫营养,30~50 之间为中营养,50~60 为轻度富营养,60~70 为中度富营养,>70 为重度富营养<sup>[30]</sup>。

优势度(Y)根据浮游植物功能群的出现频率及相对生物量来确定,即  $Y = f_i \cdot P_i$ ,式中, $f_i$ 为第*i*功能群的出现频率,用来展示各个功能群在不同季节和采样点出现次数; $P_i$ 为第*i*功能群生物量占总植物生物量的比例。当  $Y \geq 0.02$  时,为优势功能群<sup>[31]</sup>。在所有采样点中,某一个功能群出现的采样点数与总采样点数的比率称为该功能类群的出现频率<sup>[32]</sup>。生态位宽度采用 Colwell 等加权修正的 Levin 指数<sup>[33]</sup>计算得出。

用方差比率法(VR)检验功能群之间的总体关联性<sup>[34]</sup>,结合卡方检验判定种间联结的显著性,VR 值越接近 1,正联结性越强,越靠近-1,则负联结越强。弱联结的 VR 值接近 0。VR 值等于 0,说明物种对之间完全独立,无联结。当物种对为 1 时,采样 Yates 的连续校正公式进行卡方检验<sup>[35]</sup>,由于  $X_{0.052}(1) = 3.841$  以及连续校正后  $X_{0.052}(1) = 6.635$ ,因此  $X^2 > 3.841$  表示联结显著, $X^2 > 6.635$  则为联结极显著。营养状态指数(TSI)、生态位宽度(Levin 指数)和方差比率法(VR)公式见附录。

应用 R 进行置换多元方差分析(permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA),用于检验浮游植物群落组成是否存在显著性差异,采用 Mantel 相关性分析并绘制 4 个季节的优势功能群与环境因子的相关性图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体理化因子变化

分别对 4 个季节 5 个采样点水体理化指标进行方差分析,结果显示在同一个季节内部,不同空间位置之间各个理化指标差异不显著( $P > 0.05$ )。水体理化指标在不同季节存在显著差异( $P < 0.05$ ),SD 在 4 个季节之间显著不同,冬季与其他季节的 TN 浓度显著不同,水体 TP 浓度差异出现在冬季与秋季、冬季与夏季之间,Chl.*a* 浓度的显著差异出现在冬季与其他 3 个季节之间(图 2)。基于 SD、TN、TP 和 Chl.*a* 计算 TSI 可以得出,乌江渡水库表层水体在春季 TSI 值在 42.9~57.67 范围内变化,夏季 TSI 值的变化范围为 49.19~56.04,秋季 TSI 值在 37.28~52.36 之间浮动,皆呈现为中-轻度富营养状态;而冬季水体 TSI 值在 37.56~40.00 之间变化,呈现中营养状态。

### 2.2 浮游植物群落结构季节性变化

2021 年 6 月—2022 年 5 月,在乌江渡水库表层水体样品中共鉴定到浮游植物 106 种,隶属 8 门 67 属,其中绿藻门种类数最多,共计 32 属 53 种,其次为硅藻门 14 属 21 种,蓝藻门 12 属 16 种,甲藻门 4 属 6 种,隐藻门 1 属 6 种,金藻门 2 属 1 种,定鞭藻门 1 属 1 种,裸藻门 1 属 1 种。

4 个季节不同采样点处的浮游植物总生物量各不相同,春季为 0.03~26.77 mg/L,夏季为 1.17~12.57 mg/L,秋季为 0.90~3.30 mg/L,冬季为 0.90~3.30 mg/L(图 3a)。ANOVA 检验结果显示,在相同季节内,不同采样点总浮游植物生物量以及蓝藻、绿藻、硅藻和甲藻生物量差异均不显著( $P > 0.05$ )。乌江渡水库春季浮游植物生物量最高,且随着时间变化逐渐降低,在冬季达到最小值(图 3b)。依据生物量的数据,春季优势类群为硅藻和甲藻,夏季甲藻所占比例降低,硅藻、绿藻和蓝藻在群落中的比例增加,秋季,蓝藻、绿藻和甲藻生物量继续降低,硅藻所在比例升高,到冬季硅藻成为绝对优势类群(图 3c)。ANOVA 检验发现,冬季硅藻生物量与夏季和秋季显著不同,绿藻和甲藻生物量的显著差异出现在冬季与其他季节之间;夏季蓝藻生物量与其他季节之间显著不同。浮游植物群落种类数、Simpson 和 Shannon 指数均表现为夏季最高,秋季次之,冬季最低,均匀度指数冬季最低,其他季节相似(图 4)。ANOVA 检验结果表明,种类数、Simpson 和 Shannon 指数均存在显著差异( $P < 0.01$ ),而均匀度指数差异不显著( $P > 0.05$ )。从种类数目来看,夏季和秋季绿藻种类数最多,冬季和春季硅藻种类数最多(图 4)。PerMANOVA 结果显示,不同季节浮游植物群落组成存在显著差异( $P = 0.001$ )。而同一季节不同采样点之间群落结构不存在显著差异( $P > 0.05$ )。

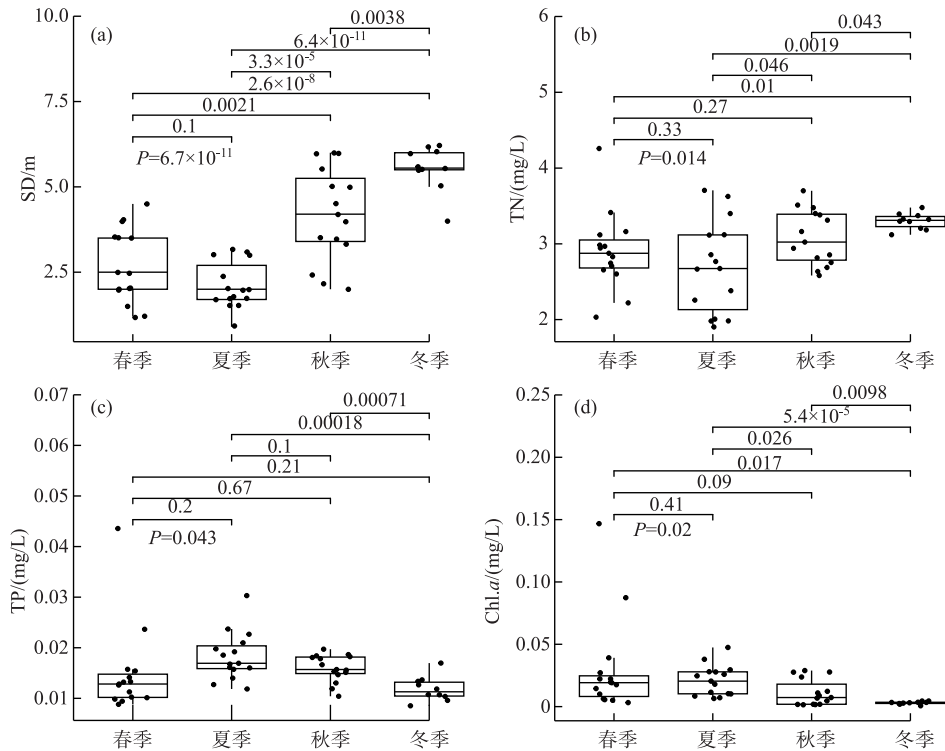


图 2 水体营养化状态相关指标(透明度、总氮、总磷和叶绿素 a)的季节性变化  
 Fig.2 Temporal variation of trophic status parameters (secchi depth, total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll-a)

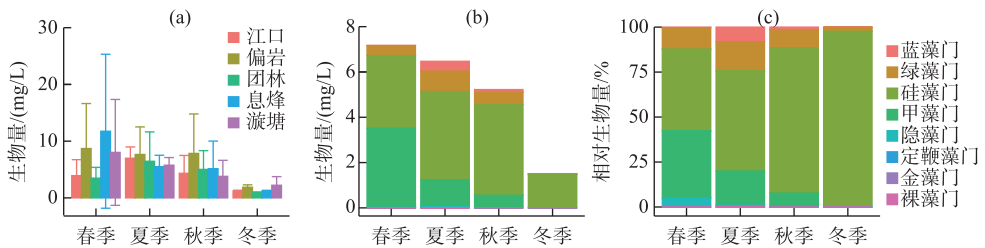


图 3 不同季节乌江渡水库表层水体 5 个不同位点浮游植物总生物量变化、不同门类水平平均生物量组成和相对生物量组成

Fig.3 Variations of phytoplankton biomass, average biomass, and relative biomass of different phytoplankton phyla (c) at five sites in Wujiangdu Reservoir in different seasons

### 2.3 浮游植物群落功能群季节性变化

参考 Reynolds 等<sup>[5]</sup>提出的 FG 功能群划分方法对乌江渡水库浮游藻类进行划分,可分为 24 个功能,分别为 A、B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L0、LM、M、MP、N、P、S1、SN、T、W1、X1、X2、X3、Y。并根据 Salmaso 等<sup>[36]</sup>对功能群的营养状态进行分类,营养级别从 1~9 分为超寡营养、寡营养、中营养、富营养、超富营养和中间状态,用数字编码为:U(1)、UO(2)、O(3)、OM(4)、M(5)、ME(6)、E(7)、EH(8)、H(9)。各种功能群的代表种属及生境特征如表 1 所示。

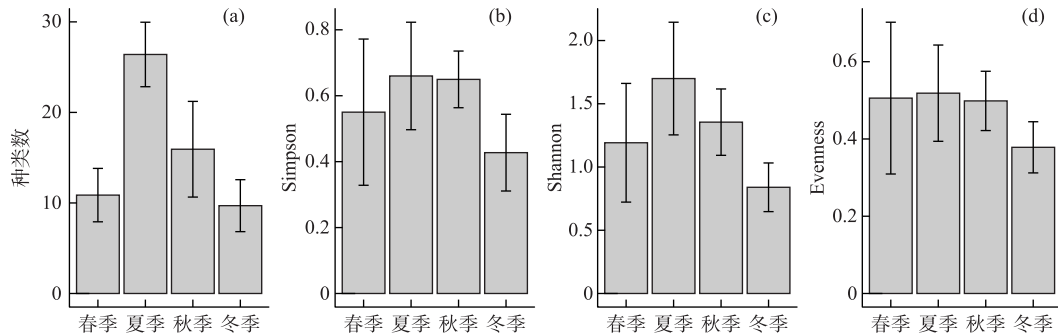


图4 不同季节乌江渡水库浮游植物多样性指数

Fig.4 Variations of diversity indexes in Wujiangdu Reservoir in different seasons

表1 乌江渡水库浮游植物功能群划分及代表种类

Tab.1 Division of functional groups and representative species of phytoplankton in Wujiangdu Reservoir

功能群	代表种	生境特征	营养状态
A	四棘藻 <i>Attheya</i> sp.	贫营养、洁净、深水	O
B	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	中营养、中小型或大型浅水水体	M
C	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	富营养、中小型水体	E
D	谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	含有营养盐、浑浊	H
E	分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>	贫营养或异养型、小型水体、浅水	OM
F	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.	中到富营养、洁净、混合强	M
G	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	富营养、停滞水体	E
H1	长孢藻 <i>Dolichospermum</i> sp.	富营养、分层、含氮低、浅水	E
J	塔胞藻 <i>Pyramimonas Schmarida</i>	高营养、混合、浅水	EH
K	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.	富营养浅水湖泊	E
L0	二角多甲藻 <i>Peridinium bipes</i>	贫到富营养、中到大型水体、可深可浅	M
LM	飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	富到超富营养、中小型水体	E
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	小到中型、富营养到超富营养、稳定、透明度较高	E
MP	曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.	经常性搅动、浑浊、浅水	E
N	毛角角星鼓藻 <i>Staurastrum chaetoceros</i>	持续或半持续的混合水层	M
P	颗粒直链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	持续或半持续的混合水层	E
S1	赖氏泽丝藻 <i>Limnothrix redekei</i>	混合浑浊、透明度低	H
SN	尖头藻 <i>Raphidinoopsis</i> sp.	温暖、混合	E
T	转板藻 <i>Mougeotia</i> sp.	持续混合水层	M
W1	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	富含有机质的水体或农业废水和生活污水	H
X1	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	超富营养、浅水	EH
X2	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.	中到富营养、浅水	ME
X3	弓形藻 <i>Schroederia</i> sp.	贫营养、混合、浅水	O
Y	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	静水环境	E

从出现频率的角度,春季 B、P、Y 功能群的出现频率皆超过 80%,其中 Y 功能群出现频率达到 100%,夏季所有功能群中,B、F、J、L0、P、S1 功能群的出现频率超过 90%,秋季和冬季,功能群 P 和 B 出现频率为 100%。根据优势度将浮游植物分为优势功能群( $Y > 0.02$ )和其他功能群。随着季节的变化,其优势功能群的演替模式为 P/B/L0/C(春季)→P/B/L0/J/H1/S1/T(夏季)→P/B/L0/S1/T(秋季)→P/B(冬季)(表 2)。从生物量看,春季 P、L0 和 MP 生物量超过总生物量 80%;夏季,功能群 P 生物量继续增加,而 L0 和 MP 生物量降低,秋季 P 生物量降低,总体而言,B 生物量增加,成为次优势类群;冬季 P 和 B 成为群落的主要优势类

群(图 5)。PerMANOVA 结果显示,同一季节内浮游植物功能群组成在不同采样点不存在显著差异( $P>0.05$ ),不同季节之间在功能群组成上无显著差异( $P>0.05$ )。

表 2 乌江渡水库不同季节浮游植物优势功能群的出现频率和优势度\*

Tab.2 Occurrence frequency and dominance of dominant functional groups of phytoplankton in Wujiangdu Reservoir in different seasons

功能群	春季		夏季		秋季		冬季	
	<i>Y</i>	<i>f<sub>i</sub></i>	<i>Y</i>	<i>f<sub>i</sub></i>	<i>Y</i>	<i>f<sub>i</sub></i>	<i>Y</i>	<i>f<sub>i</sub></i>
B	<b>0.09</b>	93.33	<b>0.42</b>	100	<b>0.37</b>	100	<b>0.51</b>	100
C	<b>0.05</b>	40.00	0.00	40.00	0.00	33.33	0.00	20.00
J	0.01	60.00	<b>0.03</b>	100.00	0.01	80.00	0.01	80.00
L0	<b>0.24</b>	53.33	<b>0.17</b>	100.00	<b>0.05</b>	60.00	0.00	10.00
P	<b>0.22</b>	86.67	<b>0.19</b>	93.33	<b>0.40</b>	100.00	<b>0.47</b>	100.00
S1	0.00	26.67	<b>0.03</b>	93.33	<b>0.02</b>	86.67	0.00	50.00
T	0.01	33.33	<b>0.02</b>	86.67	<b>0.04</b>	60.00	0.00	10.00

\* 加粗值表示  $Y>0.02$ ,即优势度阈值,视为优势类群。

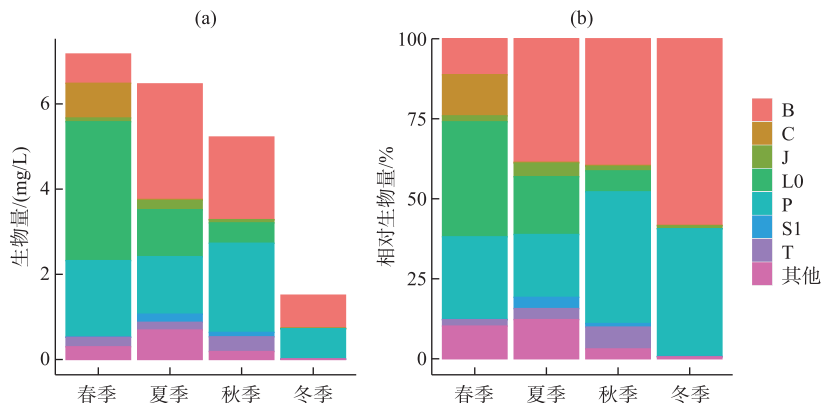


图 5 乌江渡水库表层水体浮游植物优势功能群绝对生物量(a)和相对生物量(b)组成

Fig.5 Biomass (a) and relative biomass (b) of dominant phytoplankton functional groups in Wujiangdu Reservoir

夏季优势功能群数量最多,而冬季优势功能群数量最少,仅 B 和 P 两类(表 3)。4 个季节中出现的 7 个优势功能群的生态位宽度变化范围为[ 2.71, 10.08 ],其中,B 和 P 在 4 个季节均为优势功能群,生态位最宽。4 个季节优势功能群的生态位重叠值变化范围分别为[ 0.007, 0.640 ]、[ 0.095, 0.616 ]、[ 0.102, 0.646 ]和 0.575。春季,B 和 C 之间生态位重叠值最高,最小值出现在 C 和 L0 之间,5 个优势功能群之间呈显著负相关。夏季,生态位重叠最大值出现在 L0 和 S1 之间,最小值在 P 和 S1 之间,优势功能群之间关联不显著。秋季,优势功能群之间呈显著正相关,B 和 T 之间生态位重叠值最大,L0 和 T 之间最小。冬季,优势功能群 B 和 P 之间关联不显著(表 4)。

春季,优势功能群 C 与溶解性硅酸盐、温度和溶解氧浓度显著相关,L0 与硝酸盐和温度显著相关。夏季,优势功能群均表现出与环境中的氮磷营养盐、溶解性硅酸盐、温度、pH 和溶解氧显著相关。秋季,相关性出现在功能群 J 与硝酸盐和溶解氧,L0 与温度、pH 和溶解氧,P 与溶解性硅酸盐和 pH,T 与磷酸盐之间。冬季,B 和 P 与环境因子均存在显著相关性(图 6)。

### 3 讨论

对乌江渡水库表层水体的研究发现,水体理化指标在相同季节不同空间位置之间无显著差异,而不同

表3 乌江渡不同季节浮游植物优势功能群生态位宽度

Tab.3 Niche breadth of dominant functional groups of phytoplankton in Wujiangdu Reservoir in different seasons

优势功能群	春季	夏季	秋季	冬季
B	2.92	7.96	9.26	8.97
C	4.35	—	—	—
J	—	5.77	—	—
L0	3.18	10.08	2.71	—
P	6.27	4.12	5.64	4.83
S1	—	6.05	3.17	—
T	—	6.09	5.60	—

‘—’表示该功能群在该季节不是优势功能群。

表4 乌江渡不同季节浮游植物优势功能群的总体关联性

Tab.4 Overall correlations of dominant functional groups of phytoplankton in Wujiangdu Reservoir in different seasons

季节	方差比率 VR 值	统计量 $W$	$Df$	$\chi^2$ 临界值	校验结果
春季	0.97	14.51	3	[0.35, 7.81]	显著负相关
夏季	0.45	6.71	5	[1.15, 11.07]	关联不显著
秋季	1.15	17.25	4	[0.71, 9.49]	显著正相关
冬季	0.25	2.47	1	3.84 和 6.635	关联不显著

季节之间差异显著。因此,乌江渡水库表层水体理化性质方面存在显著的时间异质性,而空间异质性不明显。这主要是由于乌江渡水库是一座河道型水库,水流从上游至下游的流动冲刷能够导致水流的混合,从而引起其理化性质匀质化。然而,乌江渡流域面积内的农业、畜牧业和人类活动等可能导致点源和面源污染的存在,结合不同位置水流交汇等因素,均有引起水体理化性质空间异质性的可能。

总体而言,乌江渡水库表层水体营养状态为贫至中营养状态,其水体营养盐特点为总氮浓度较高。导致水体营养状态季节差异的原因可能有以下几点:(1)温度的差异导致水体生物对营养的代谢和物质循环速率不同。此外,温度导致水体在夏季热分层,阻碍了营养丰富的底层水与表层水的交换,而春季和秋季的水体混合促进这种交换;(2)春夏季营养状态高于秋冬季节,主要原因可能是春季降雨增加,流域面积内带来的营养盐增多,且该区域范围内有农业活动,春季施肥的增多也成为水体营养盐增加的原因之一;(3)水流速度的不同导致水体中营养物质的沉降速率差异,进而造成水体中微生物和藻类等对其中营养盐的吸收代谢不同,从而引起水体中营养盐浓度的变化。2005年晏妮<sup>[20]</sup>通过 Shannon 指数、均匀度指数和 Margalef 指数 3 个指标评价乌江渡水库营养状态处于富营养水平,而 2007 年魏浪等<sup>[19]</sup>通过对水体综合营养状态指数的调查结果显示库区为中—富营养水平,2002—2010 年<sup>[37]</sup>同样根据中国环境监测总站推荐使用的综合营养状态指数法进行研究,发现乌江渡水库处于中—富营养水平,总磷污染较严重,主要来自息烽河沿岸工业企业污水的排放。2013 年黄志敏等<sup>[21]</sup>从综合营养状态指数和多样性指数分析,调查显示乌江渡水库夏季浮游植物组成以绿藻为主,且种类较丰富,水质状况为贫营养至中营养。由此可以看出,近年来对乌江渡水库沿线工矿企业工业废水、城镇污水的治理以及网箱养鱼的合理规划等方面的综合治理初显成效。

此次研究显示,乌江渡水库表层水体浮游植物群落以硅藻为主,乌江渡水库平均温度为 20℃,且全年温度变化不大,随着季节的变化各个类群生物量存在差异。此外,浮游植物群落的种类组成具有明显的时间异质性,这主要是不同季节的温度、光照及营养盐差异导致的<sup>[38-39]</sup>。在云贵高原的滇池研究发现,温度是导致云南湖泊浮游植物生物量和群落变化的主要因子之一,与生物量呈现正相关<sup>[40]</sup>。冬季乌江渡水库中浮游植物群落主要由喜低温的硅藻为绝对优势类群,生物量在全年最低,这主要是低温和低光照强度导致生长速率减慢。Tilman<sup>[41]</sup>发现,与氮营养盐相比,硅藻是对磷营养盐的竞争优势类群,尤其是在温度较低的环境中。乌江渡水库水体中氮磷比较高,意味着其中磷浓度较低,因此,硅藻成为全年的优势类群。春季温度和



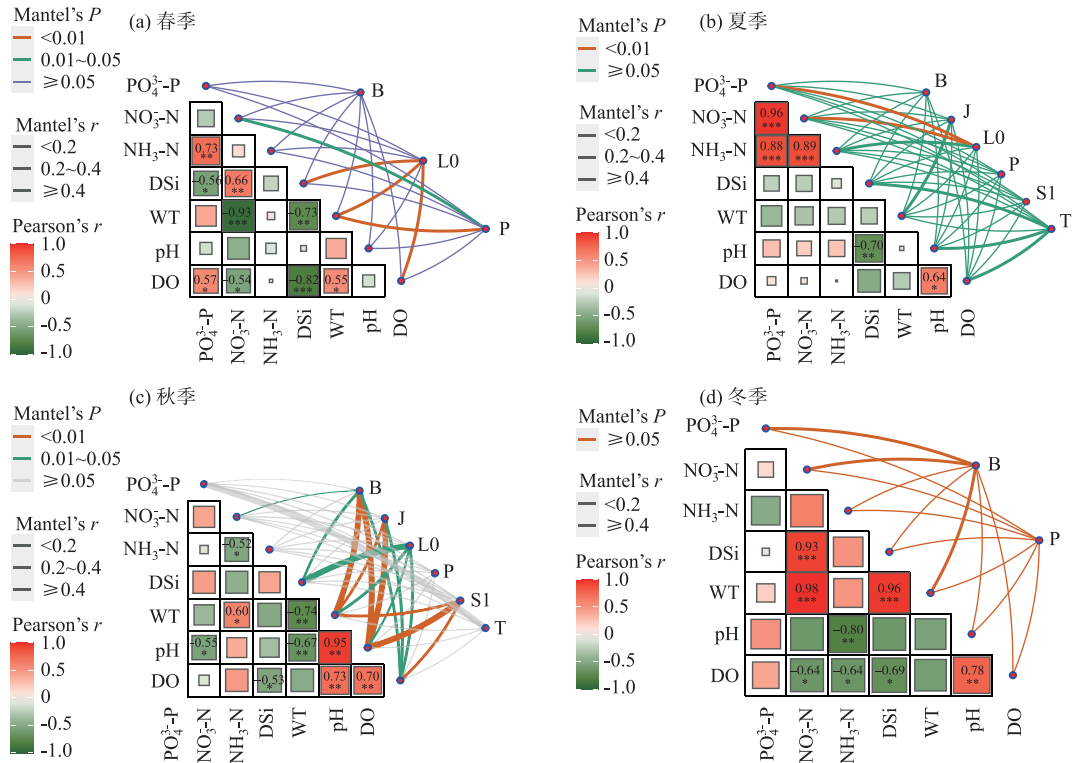


图6 不同季节浮游植物优势功能群与主要环境因子的相关性  
(\*表示  $P < 0.05$ ; \*\*表示  $P < 0.01$ ; \*\*\*表示  $P < 0.001$ )

Fig.6 Correlations between dominant functional groups of phytoplankton and primary environmental factors in different seasons

光照逐渐增强,水体混合增强,甲藻因其具有鞭毛,能在水中主动移动获取营养物质而得到迅速生长,和硅藻共同占据群落优势<sup>[42]</sup>。夏季的高温和强光照条件则为蓝藻和绿藻提供了生长优势环境<sup>[43]</sup>,且夏季水体有不同程度的热分层,更加有利于蓝藻生物量的累积。秋季水体分层减弱,温度和光照强度降低,喜高温的蓝藻生物量迅速降低,硅藻成为群落中的绝对优势类群<sup>[44]</sup>。

将浮游植物按照功能群进行分类的方法已经在多数河流、湖泊中得到广泛的应用<sup>[45-46]</sup>。该方法更多地结合了浮游植物的生境、耐受性以及敏感性等特征,能更好地解释浮游植物对特定环境的响应关系。功能群 B、L0、P 为乌江渡水库中 2022 年春、夏和秋季的共同优势功能群。功能群 P 的代表性藻类为浮游直链藻极狭变种 (*Aulacoseria granulata* var. *angustissima*),常见于水体混合程度较高的中富营养浅水水体,对分层敏感,偏向弱光照,低碳低硅的环境<sup>[1,47]</sup>。以小环藻为代表性藻类的功能群 B 耐受光照,且对 pH 升高和硅酸盐的变化敏感性较强,能够在混合水体中生长,常见于中营养的中小型水体<sup>[32,47]</sup>。已知浮游硅藻通常与低温、低光照、混合水体和硅酸盐的浓度相关<sup>[48]</sup>。硅藻由于其硅质壁的组成,其沉降速率较快,因此在混合水体中更具生长优势。功能群 L0 主要是以二角多甲藻为代表<sup>[31]</sup>,在贫到富营养水体中均有发现,该类群对营养缺乏的忍耐性较高,对水体混合敏感<sup>[5,49]</sup>,它们常常生活在到中到大型水体中<sup>[50]</sup>。以塔胞藻为代表的 J 功能群对混合程度较高、浑浊水体或中低营养环境有较好的适应能力<sup>[51-52]</sup>,功能群 S1 以赖氏泽丝藻为代表种,适合生长在浑浊、混合的水体中<sup>[2,53]</sup>;功能群 T 中代表种类为转板藻,适合生长在持续混合的水体中,光照是限制因子,水温和营养盐是影响其生长的关键因子<sup>[11]</sup>。这些功能群在夏季和秋季的河道型水库水体中成为优势类群。冬季群落多样性降低,以硅藻为主的 B 和 P 功能群重新恢复其绝对优势地位。

藻类的生长除了光合作用,同时也需要氧气进行呼吸作用。溶解氧对维系水体生态环境健康具有重要

的作用,丰富多样的水生植物可以使水体保持较高的溶解氧浓度,而藻类生物量的过量增加也会在水体产生负影响,成为溶解氧降低的“助推器”<sup>[54]</sup>。已有研究表明,溶解氧浓度与藻类生长呈显著正相关<sup>[55]</sup>。不同的浮游植物种类所需的pH范围不同,一般情况下,浮游植物在弱碱性水体中光合作用效率更高,生长繁殖得更好<sup>[45]</sup>。然而,研究发现在功能群组成方面浮游植物群落不存在显著的时空异质性,这种在种类组成水平上的差异可以理解为功能群是高度概况的分类方法,更强调对生境的适应,而非亲缘关系的远近。因此,种类的变化可能并不能引起功能群的变化,只是相同功能群的内部演替。

此外,功能群的生态特征能够反映水体营养状态<sup>[5,49]</sup>,乌江渡水库中发现的C、G、H、J、LM、X1等功能群常见于富营养水体,A、E、X3等功能群常出现在寡营养水体<sup>[36]</sup>。此外,多样性指数也能够用于评价水体营养状态<sup>[56-57]</sup>。本研究中,水体Shannon指数在1.079~1.81之间,意味着水体为中度营养。结合TSI、功能群和多样性指数,我们可以认为乌江渡水库表层水体为中-轻度富营养营养。

生态位宽度是种群对资源的利用程度和对环境适应能力的总体表现<sup>[58]</sup>。生态位越宽,表示该种类资源利用能力强,能更好地适应不同的环境。4个季节均为优势功能群的B和P生态位宽度最广,其藻类细胞较小,对营养盐的吸收速率快,利用效率高,在乌江渡水库磷缺乏的水体中能够获得更好的竞争优势,尤其是冬季为主要优势种。种间联结意味着两类群之间在相同生境中的关联程度,其强弱能够很好地反映群落的稳定程度<sup>[59]</sup>。春季优势功能群呈负相关,说明此时群落不稳定,类群之间的互补性较弱,对资源和空间的竞争比较强烈。夏季和冬季类群之间相对独立,相互依赖程度较低,从而导致联结不显著。而秋季群落中优势功能群呈显著正相关,表明此时群落稳定性高,类群之间互补性强,更加充分高效地利用空间和资源。冬季的优势功能群为B和P,不存在多个优势功能群的竞争,且这两类功能群生态位宽度较大,相互依赖程度较低,从而导致联结不显著。乌江渡地处喀斯特高原水库,硅元素比较充足<sup>[60]</sup>,有利于硅藻成为优势类群。相似的营养利用特征及生活型导致这些功能群生态位重叠程度高。进入夏季,春季的优势功能群逐渐转变为衰退型,其他功能群因营养利用方式不同,与前面的优势功能群生态位重叠小,竞争压力小,在群落中的优势得到一定的提升。从夏季到秋季,水体混合程度加强<sup>[61-63]</sup>,虽然优势功能群之间生态位重叠值较高,但它们之间的互补大于竞争,因此表现为关联正相关,群落趋于稳定。冬季,由于温度、光照和溶解氧浓度的减小,浮游植物生物量在4个季节最低,优势功能群B和P成为绝对优势功能群,他们之间相互独立,依赖性较低。因此,乌江渡水库浮游植物从春季的不稳定到秋季的稳定状态,随着群落稳定性的改变,经过不同种类或者不同功能群之间的相互作用实现群落的演替。

## 4 结论

1) 乌江渡水库表层水体浮游植物群落共鉴定浮游植物106种,分8门67属,其中,生物量最高的为硅藻门,种类数最多的为绿藻门。

2) 乌江渡水库表层水体理化性质和浮游植物群落存在显著季节性差异,而空间异质性不显著,春夏季营养状态高于秋冬季节,水体为中-轻度富营养营养状态。

3) 浮游植物群落功能群季节性演替模式为B/C/L0/P(春季)→B/J/L0/P/S1/T(夏季)→B/L0/P/S1/T(秋季)→B/P(冬季),群落从春季的不稳定到秋季的稳定状态,其中,氮磷营养、温度和溶解氧是影响乌江渡水库表层浮游植物群落的关键环境因子。

## 5 附录

附录见电子版(DOI: 10.18307/2024.0313)。

## 6 参考文献

- [1] An RZ, Pan CM, Taba LZ *et al.* Vertical distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Lake Basomtso, Tibet China. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 86-101. DOI: 10.18307/2021.0114. [安瑞志, 潘成梅, 塔巴拉珍等. 西藏巴松错浮游植物功能群垂直分布特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 86-101.]
- [2] Li X, Li JR, Xu XQ *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in Wuliangshuai Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(10): 1668-1675. [李兴, 李建茹, 徐效清等. 乌梁素海浮游植物功能

- 群季节演替规律及影响因素. 生态环境学报, 2015, **24**(10): 1668-1675.]
- [ 3 ] Xia Y, Hu X, Xu J *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 134-146. DOI: 10.18307/2019.0113. [ 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. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 134-146.]
- [ 4 ] Liu L, Li XM, Meng ZH *et al.* Succession characteristics of phytoplankton functional groups and water quality evaluation in Wuchang Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(1): 131-139. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202301.01. [ 刘璐, 李学梅, 孟子豪等. 武昌湖浮游植物功能群演替特征及水质评价. 生态学杂志, 2023, **42**(1): 131-139.]
- [ 5 ] Reynolds CS, Vera H, Carla K *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, (5): 417-428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417.
- [ 6 ] Peng M, Wu JW, Li LX *et al.* Characteristics of phytoplankton functional groups and their environmental drivers in Xiaowan Reservoir area of Lancang River during the summer of 2017–2019. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(1): 50-57. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202201.028. [ 彭梦, 吴嘉伟, 李罗新等. 澜沧江小湾库区 2017–2019 夏季浮游植物功能群特征及其环境驱动因子. 生态学杂志, 2022, **41**(1): 50-57.]
- [ 7 ] 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. DOI: 10.18307/2015.0102. [ 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.]
- [ 8 ] Xia YF, Hu XD, Xu JX *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 134-146. DOI: 10.18307/2019.0113. [ 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. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 134-146.]
- [ 9 ] Wang YW, Yang Y, Pan H *et al.* Ecological region classification of 10 key reservoirs in Guangdong Province based on phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 147-153. DOI: 10.18307/2014.0118. [ 王雅文, 杨扬, 潘鸿等. 基于浮游植物功能类群的广东省大型水库生态分区初探. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 147-153.]
- [ 10 ] Qian KM, Liu BG, Chen YW. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009–2016. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1035-1044. DOI: 10.18307/2019.0402. [ 钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009–2016年). 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1035-1044.]
- [ 11 ] Pan CM, Liu Y, An RZ *et al.* Phytoplankton in Metika Wetland, Tibet, China: 2. Characteristics of functional groups and their relationship with environmental factors. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1115-1126. DOI: 10.18307/2020.0406. [ 潘成梅, 刘洋, 安瑞志等. 西藏麦地卡湿地的浮游植物——2. 功能群特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1115-1126.]
- [ 12 ] Wang F, Li YJ, Ma TT *et al.* Ecological health assessment of urban lake based on phytoplankton—A case study of Lake Xihu, Tongling, lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 1890-1900. DOI: 10.18307/2022.0628. [ 王芳, 李永吉, 马廷婷等. 基于浮游植物的城市湖泊生态健康评价——以长江下游铜陵市西湖为例. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 1890-1900.]
- [ 13 ] da Silva N, Santos J, Oliveira D *et al.* Spatial and temporal dynamics of functional groups of phytoplankton in a shallow clear-water tropical lake. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2018, **30**: e102.
- [ 14 ] Cao J, Hou ZY, Li ZK *et al.* Succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in a subtropical plateau lake. *Science of the Total Environment*, 2018, **631/632**: 1127-1137. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.026.
- [ 15 ] Zhou T, Cheng TY, Yu NX *et al.* Nitrogen and phosphorus retention in cascade reservoirs along the upper reaches of Wujiang River. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 707-713. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201803.037. [ 周涛, 程天雨, 虞宇晓等. 乌江中上游梯级水库氮磷滞留效应. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 707-713.]
- [ 16 ] Yan N, Chen C. The distribution of phytoplankton and water quality evaluation in Wujiangdu Reservoir, a canyon-style Reservoir, Guizhou. *Guizhou Science*, 2011, **29**(2): 69-75. [ 晏妮, 陈椽. 贵州干流峡谷型水库——乌江渡水库浮游植物分布及水质现状分析. 贵州科学, 2011, **29**(2): 69-75.]
- [ 17 ] Chang JS. The serious situation of total phosphorous pollution in main stream of Wujiang and countermeasure for environment protection. *Journal of Bijie University*, 2012, **30**(4): 74-79. [ 常近时. 乌江干流总磷污染的严峻形势与环保对策. 毕节学院学报, 2012, **30**(4): 74-79.]
- [ 18 ] Xiong X, Yuan X. Balance analysis of nitrogen and phosphorus detained in Wujiangdu Reservoir and its eutrophication evaluation. *Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition*, 2006, (6): 36-39. [ 熊筱, 袁雪. 乌江渡水库氮磷平衡计算及富营养化评价. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2006, (6): 36-39.]
- [ 19 ] Wei L, Xia T, Yan ZC *et al.* Eutrophication in upstream cascade reservoirs of Wujiang River. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(4): 39-42, 66. [ 魏浪, 夏霆, 严志程等. 乌江上游梯级水库水体富营养化研究. 水资源保护, 2010, **26**(4): 39-42, 66.]
- [ 20 ] 晏妮. 贵州两种类型喀斯特水库浮游植物分布与富营养化特征比较研究[学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2006.
- [ 21 ] Huang ZM, Chen C, Long SX. Characteristics of phytoplankton community structure in Wujiangdu Reservoir in summer. *Guizhou Agricultural Science*, 2013, **41**(4): 171-175, 180. [ 黄志敏, 陈椽, 龙胜兴. 乌江渡水库夏季浮游植物的群落结构特征及水质评价. 贵州农业

- 科学, 2013, **41**(4): 171-175, 180.]
- [22] Wang C, Zhu DH, Han XY *et al.* Community structure characteristics of phytoplankton in Wujiang River. *Chinese Journal of Fisheries*, 2015, **28**(1): 5-10. [王崇, 朱代宏, 慈雪莹等. 乌江流域浮游植物群落结构的特征. 水产学杂志, 2015, **28**(1): 5-10.]
- [23] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会编. 水和废水监测分析方法: 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [24] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [25] Xiao YN, Cheng JH, Mo XC *et al.* Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 821-832. DOI: 10.18307/2023.0306. [肖玉娜, 程靖华, 莫晓聪等. 丹江口水库浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 821-832.]
- [26] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [27] Wang J, Jiao Y, Ren YP *et al.* Comparative study on two computing methods for estimating Shannon-Wiener diversity index. *Journal of Fisheries of China*, 2015, **39**(8): 1257-1263. DOI: 10.11964/jlc.20150509886. [王晶, 焦燕, 任一平等. Shannon-Wiener 多样性指数两种计算方法的比较研究. 水产学报, 2015, **39**(8): 1257-1263.]
- [28] Hu F, Liu JT, Wen CY *et al.* Phytoplankton community structure and evaluation of aquatic ecological conditions in Fu River basin. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, **32**(4): 744-755. [胡芳, 刘聚涛, 温春云等. 抚河流域浮游植物群落结构特征及其水生生态状况评价. 生态环境学报, 2023, **32**(4): 744-755.]
- [29] Li ZY, Zhang HJ. Nutritional status index (TSlc) of some lakes and reservoirs in China and its relationship with parameters. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1993, (4): 391-397. [李祚祚, 张辉军. 我国若干湖泊水库的营养状态指数 TSlc 及其与各参数的关系. 环境科学学报, 1993, (4): 391-397.]
- [30] Zhao M, Jiao SL, Liang H. Study on eutrophication of lakes in Karst Plateau based on comprehensive nutritional status index. *Journal of China Hydrology*, 2020, **40**(3): 9-15. [赵梦, 焦树林, 梁虹. 基于综合营养状态指数的喀斯特高原湖泊富营养化研究. 水文, 2020, **40**(3): 9-15.]
- [31] Gong YX, Wan LJ, Zhang JM *et al.* Preliminary study on the community structure of spring phytoplankton and its environmental influencing factors in Bahe River. *Journal of China West Normal University: Natural Sciences*, 2023, **44**(5): 458-467. [龚怡萱, 万佳璐, 张杰铭等. 巴河春季浮游植物群落结构及其环境影响因子初探. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2023, **44**(5): 458-467.]
- [32] Han LB, Wang X, Li QH *et al.* Dynamic changes and driving factors of phytoplankton functional groups in Baihua Reservoir, Guizhou Plateau. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 821-832. DOI: 10.18307/2022.0405. [韩丽彬, 王星, 李秋华等. 贵州高原百花水库浮游植物功能群的动态变化及驱动因子. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1102-1114.]
- [33] Colwell RK, Futuyma DJ. On the measurement of niche breadth and overlap. *Ecology*, 1971, **52**(4): 567-576. DOI: 10.2307/1934144.
- [34] Schluter D. A variance test for detecting species associations, with some example applications. *Ecology*, 1984, **65**(3): 998-1005. DOI: 10.2307/1938071.
- [35] Liu Y, Zheng YY, Ao YY. Niche and interspecific association of dominant bryophytes on different substrates. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 286-293. DOI: 10.5846/stxb201711162042. [刘艳, 郑越月, 敖艳艳. 不同生长基质的苔藓植物优势种生态位与种间联结. 生态学报, 2019, **39**(1): 286-293.]
- [36] Salmaso N, Naselli-Flores L, Padisák J. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology. *Freshwater Biology*, 2015, **60**: 603-619. DOI: 10.1111/FWB.12520.
- [37] Li Z. Variation of water quality of Wujiangdu Reservoir during 2002-2012. *Environmental Protection and Technology*, 2013, **19**(5): 24-27. [李忠. 2002-2012 年乌江渡水库水质变化趋势分析. 环保科技, 2013, **19**(5): 24-27.]
- [38] Qian XY, Li JB, Ao W *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with environmental factors in Lake Hulun. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 1814-1827. DOI: 10.18307/2022.0603. [钱玺亦, 李金彪, 敖文等. 呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 1814-1827.]
- [39] Sun YP, Yu HG, Zhou Q *et al.* Seasonal variation of phytoplankton communities in Wenrui River—A typical eutrophic urban river, Zhejiang Province. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 375-384. DOI: 10.18307/2018.0209. [孙玉平, 于恒国, 周钦等. 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. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 375-384.]
- [40] 张涛. 云南高原湖泊浮游植物空间分布特征及脆杆藻对胁迫的响应模式[学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2019.
- [41] Tilman D. Nitrogen-limited growth in plants from different successional stages. *Ecology*, 1986, **67**(2): 555-563. DOI: 10.2307/1938598.
- [42] Wang SX, Wei L, Wang S *et al.* Seasonal changes of phytoplankton community structure and its influencing factors in lakes and reservoirs adjacent to water sources in Shanghai. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1127-1139. DOI: 10.18307/2022.0407. [王三秀, 魏莱, 王爽等. 上海水源地毗邻湖库浮游植物群落结构的季节变化及其影响因素. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1127-1139.]
- [43] Tan X, Xia XL, Chen XL *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2875-2882. DOI: 10.13227/j.hjcx.2011.10.008. [谭春, 夏小玲, 程晓莉等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数. 环境科学, 2011, **32**(10): 2875-2882.]
- [44] Feng Y, Wang J, Wu BW *et al.* Seasonal variation characteristics of phytoplankton community in Gucheng Lake and the influential environ-

- mental factors. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(8): 1042-1050. [丰叶, 王俊, 吴博文等. 固城湖浮游植物群落结构季节变化及其环境影响因子. 生态与农村环境学报, 2023, **39**(8): 1042-1050.]
- [45] 杨丽. 淀山湖浮游植物功能群的时空演替特征及其与环境因子的关系[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [46] 潘彤. 南海湖浮游植物功能群季节演替特征及其影响因子分析[学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [47] Li L, Li QH, Jiao SL *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in Aha Reservoir and their influencing factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3604-3611. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2015.0031. [李磊, 李秋华, 焦树林等. 阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3604-3611.]
- [48] Schlegel I, Scheffler W. Seasonal development and morphological variability of *Cyclotella ocellata* (Bacillariophyceae) in the eutrophic Lake Dagow (Germany). *International Review of Hydrobiology*, 1999, **84**(5): 469-478. DOI: 10.1002/iroh.199900041.
- [49] Padišák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0.
- [50] Petar Ž, Marija GU, Koraljka KB *et al.* Morpho-functional classifications of phytoplankton assemblages of two deep karstic lakes. *Hydrobiologia*, 2014, **740**(1): 147-166. DOI: 10.1007/s10750-014-1950-1.
- [51] Yan GH, Yin XY, Wang X *et al.* Driving factors of phytoplankton population and function group change in Dongting Lake and evaluation of water quality Applicability. *Environmental Science*, 2023, **44**(11): 6125-6136. DOI: 10.13227/j.hjkx.202212107. [严广寒, 殷雪妍, 汪星等. 基于种群-功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价. 环境科学, 2023, **44**(11): 6125-6136.]
- [52] Li QH, Han LB, Ma YM *et al.* The relationship between and *Cyanobacteria* composition characteristics environmental factors in Hongfeng Reservoir of Guizhou plateau. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2021, **39**(6): 8. DOI: 10.16614/j.gznuzj.zrb.2021.06.001. [李秋华, 韩丽彬, 马一明等. 贵州高原红枫水库蓝藻组成特征与环境因子之间的关系. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2021, **39**(6): 8.]
- [53] Li QH, Ma YM. Analysis on niche and interspecific association of dominant species of phytoplankton in Tongzi River. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2022, **40**(2): 11-18. DOI: 10.16614/j.gznuzj.zrb.2022.02.002. [李秋华, 马一明. 桐梓河浮游植物优势种生态位与种间联结性分析. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2022, **40**(2): 11-18.]
- [54] Zhao HC, Wang SR, Zhao M *et al.* Relationship between the DO and the environmental factors of the water body in Lake Erhai. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 1952-1959. DOI: 10.13227/j.hjkx.2011.07.026. [赵海超, 王圣瑞, 赵明等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系. 环境科学, 2011, **32**(7): 1952-1959.]
- [55] You L, Cui LF, Liu ZW *et al.* Correlation Analysis of DO, pH and chlorophyll during the growth of algae. *Environmental Science & Technology*, 2007, (9): 42-44, 117. [游亮, 崔莉凤, 刘载文等. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析. 环境科学与技术, 2007, (9): 42-44, 117.]
- [56] Zhang NN, Zang SY. Characteristics of phytoplankton distribution for assessment of water quality in the Zhalong Wetland, China. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, **12**(11): 3657-3664. DOI: 10.1007/s13762-015-0795-0.
- [57] Xu YG, Li AJ, Qin JH *et al.* Seasonal patterns of water quality and phytoplankton dynamics in surface waters in Guangzhou and Foshan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, **590/591**: 361-369. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.032.
- [58] Wang ZC, Wu WJ, Zuo M *et al.* Study on the niche of phytoplankton community in Chaohu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 685-691. [汪志聪, 吴卫菊, 左明等. 巢湖浮游植物群落生态位的研究. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 685-691.]
- [59] Zhou S, Zhou GY, Zhang QM *et al.* Long-term (1992–2015) dynamics of interspecific associations among tree species in a monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(17): 6362-6371. DOI: 10.5846/stxb201804030753. [邹顺, 周国逸, 张倩媚等. 1992—2015年鼎湖山季风常绿阔叶林群落种间关联动态. 生态学报, 2019, **39**(17): 6362-6371.]
- [60] Zhu J, Liu CQ, Wang YC *et al.* Spatia-temporal variation of dissolved silicon in Wujiangdu Reservoir. *Advances in Water Science*, 2006, (3): 330-333. [朱俊, 刘丛强, 王雨春等. 乌江渡水库中溶解性硅的时空分布特征. 水科学进展, 2006, (3): 330-333.]
- [61] Wang C, Li YP, Li NG *et al.* Characteristics and mechanism of water mixing structure during the extinction of thermal stratification in southern reservoirs. *J Lake Sci*, 2023, **35**(5): 1613-1622. DOI: 10.18307/2023.0522. [王璨, 李一平, 李聂贵等. 南方水库热分层消亡时期水体混合特征及其驱动机制. 湖泊科学, 2023, **35**(5): 1613-1622.]
- [62] 黄诚. 南北方水源水库水质及藻类演变差异性研究[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [63] 李红. 热对流主导的山区小水库分层与混合研究——以浮山前水库为例[学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2018.

## 附录

(1) 营养状态指数法计算公式为:

$$\begin{aligned} TSI_{SD} &= 60 - 14.42 \ln(SD) \\ TSI_{TN} &= 54.45 + 14.43 \ln(TN) \\ TSI_{TP} &= 14.42 \ln(TP) + 4.15 \\ TSI_{CHL} &= 9.81 \ln(CHL) + 30.6 \\ TSI(\sum) &= \sum_{j=1}^m W_j \times TSI(j) \end{aligned}$$

式中,  $TSI_{TN}$  为总氮营养指数,  $TSI_{TP}$  为总磷营养指数,  $TSI_{SD}$  为透明度营养指数,  $TSI_{CHL}$  为叶绿素  $a$  营养指数,  $TSI(\sum)$  为综合营养状态指数,  $W_j$  为第  $j$  种相关参数的营养状态指数的权重,  $TSI(j)$  为第  $j$  种参数的营养状态指数,  $m$  为评价参数的个数。

(2) 生态位宽度计算公式为:

$$B_i = \frac{1}{r \sum_{j=1}^r P_{ij}^2}$$

式中,  $B_i$  为物种的生态位宽度,  $P_{ij}$  为物种  $i$  在第  $j$  个资源状态下的个体数占该种所有个体数的比例。  $P_i = n_{ij}/N$ ,  $i$  表示物种,  $j$  为资源,  $n_{ij}$  为种群  $i$  利用资源状态  $j$  的数量,  $N_i$  为种群  $i$  的总数量,  $r$  为采样点总数。

(3) 方差比率法的计算公式为:

$$\begin{aligned} \delta T^2 &= \sum_{i=1}^S P_i (1 - P_i)^2 \\ ST^2 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2 \\ VR &= \frac{ST^2}{\delta T^2} \\ \chi^2 &= \frac{n[|ad - bc| - 0.5n]^2}{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)} \end{aligned}$$

式中,  $S$  表示浮游植物总的物种数,  $P_i$  表示物种  $i$  出现的样点数与总样点数的比值,  $t$  表示样点中优势种的平均数,  $N$  表示总样点数,  $T_j$  表示样点  $j$  内浮游植物优势种出现的种数,  $VR$  表示方差比率。  $\chi^2$  为卡方检验,  $n$  为总采样点数,  $a$  为一对种共同出现的采样点数,  $b$ 、 $c$  为单个种出现的采样点数,  $d$  为均不出现的采样点数。