

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^{*}

韩丽彬^{1,2}, 王 星^{1,2}, 李秋华^{1,2**}, 黄国佳³, 马一明^{1,2}, 潘少朴^{1,2}, 李银久^{2,4}

(1: 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

(2: 贵州省国际合作研究基地水生态国际联合研究中心, 贵阳 550001)

(3: 贵阳学院, 贵阳 550001)

(4: 贵州师范大学地理与环境学院, 贵阳 550001)

摘要: 为了解贵州高原百花水库浮游植物功能群的动态变化与环境因子的关系,于2020年1—12月(除2月份)对浮游植物与水环境指标进行逐月采样,利用RDA和相关性分析,结合群落更替指数(BC)对百花水库浮游植物功能群进行分析。结果表明:1)2020年百花水库共鉴定出浮游植物7门64种,其中绿藻门物种数最多为27种,其次为硅藻门和蓝藻门,浮游植物总生物量的范围为124.8~2235.4 μg/L;2)百花水库浮游植物共归类为26个功能群,其中S1、L_M、J、B、P、D、MP、Y和W1为优势功能群,多数适宜存在中营养的水体。功能群B、D和L_M是长期处于优势地位的功能群,以梅尼小环藻(*Meneghiniana cyclotella*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)和飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella*)为主;3)综合营养状态指数(*TLI*(Σ))为36.90~50.20,生态状态指数(*Q*)值为0.73~3.46,说明百花水库处于中营养状态。4)分析结果表明,水温和pH共同影响浮游植物优势功能群的动态变化。

关键词: 浮游植物; 功能群; 群落更替指数; 环境因子; 百花水库; 贵州高原

Dynamic changes and driving factors of phytoplankton functional groups in Baihua Reservoir, Guizhou Plateau^{*}

Han Libin^{1,2}, Wang Xing^{1,2}, Li Qiuhsa^{1,2**}, Huang Guojia³, Ma Yiming^{1,2}, Pan Shaopu^{1,2} & Li Yinjiu^{2,4}

(1: Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China)

(2: Guizhou International Cooperative Research Base-International Joint Research Center for Water Ecology, Guiyang 550001, P.R.China)

(3: Guiyang University, Guiyang 550001, P.R.China)

(4: School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China)

Abstract: To determine the relationship between the dynamic changes of phytoplankton functional groups and environmental factors, the observation data on water quality and phytoplankton community were analyzed monthly from January 2020 to December 2020 (except February). This article used RDA and correlation analysis, combined with community turnover index (BC) to analyze the phytoplankton functional groups in Baihua Reservoir, Guizhou Plateau. The results showed that: 1) In 2020, 64 species of phytoplankton in 7 phyla were identified in Baihua Reservoir, among which the numbers of Chlorophyta species were up to 27, followed by Diatom and Cyanophyta. The total biomass of phytoplankton ranged from 124.8 to 2235.4 μg/L; 2) The phytoplankton in Baihua Reservoir was classified into 26 functional groups, of which S1, L_M, J, B, P, D, MP, Y and W1 were the dominant functional groups, and most of them are suitable for survival in medium nutrient water bodies. Functional groups B, D and L_M were the long-term dominant functional groups, mainly represented by *Meneghiniana cyclotella*, *Synedra acus* and *Ceratium hirundinella*, respectively; 3) The comprehensive trophic level index (*TLI*(Σ)) was between 36.90 and 50.20, and the ecological status index

* 2021-07-27 收稿; 2021-10-20 收修改稿。

国家自然科学基金项目(U1612442)、科技部国家基础资源调查专项项目(2019FY101900)和贵州省科技厅项目(黔科合平台人才[2020]6009、黔科合支撑项目[2020]4Y009号)资助。

** 通信作者; E-mail: qiuhsa2002@126.com.

(Q) value ranged from 0.73 to 3.46, indicating that Baihua Reservoir was in a mesotrophic state; 4) The analysis results showed that water temperature and pH together affect the dynamic changes of the dominant functional groups of phytoplankton.

Keywords: Phytoplankton; functional groups; community turnover index; environmental factors; Baihua Reservoir; Guizhou Plateau

浮游植物在水生态系统中占有重要地位,对水生态系统的物质循环、能量流动及维持生态系统平衡方面都起着非常重要的作用^[1-3]。作为初级生产者,浮游植物的类群生物量、物种组成、优势种以及多样性能直接反映湖泊水质的状况,其群落组成和演替规律受水体物理、化学及生物等环境因子的影响^[4]。浮游植物传统分类方法虽能较好地反映群落结构组成,但是难以体现浮游植物在湖泊生态系统中的生态特征和生境类型。因此 Reynolds 等^[5]提出的从生态功能的角度对浮游植物进行分类的功能群分类法开始应用于藻类生态学的研究,即把生理、形态和生存策略相似或相同的浮游植物归为一个功能群,作为浮游植物对生境变化的响应的基本单元。目前已归纳 39 个不同的浮游植物功能群^[5-6],极大地简化了传统生物分类系统的复杂性和反映生境特征的重叠性,该理论已广泛应用于国内外水生态的研究^[7-9]。董静等^[10]首次将功能群理论运用到抚仙湖、洱海、滇池 3 个高原湖泊,分析了抚仙湖、洱海、滇池水体内的藻类功能群演替趋势特征。朱忆秋等^[11]探究了功能群分类方法在亚热带水库环境变化中的适用性。Kim 等^[12]研究认为浮游植物功能群很好地反映了 Nakdong 河浮游植物在不同时间尺度的环境条件,为浮游植物群落行为和生态系统功能提供了详细的描述。浮游植物种类已经发展了形态和生理上的适应策略来适应不同的水体环境,以维持自身的群落稳定性。群落稳定性是指群落能够自我更新并维持,使群落的结构和功能长期维持在一个较高的且波动较小的水平^[13-14]。一般在波动环境中,群落更替速率越强,表明群落维持自身稳定性的能力越弱,因此,研究优势功能群的稳定性对揭示群落物种变化及生态系统功能具有重要的意义^[15]。

贵州高原山区地形高差较大,地势崎岖蜿蜒,降雨时空分布不均,导致部分区域缺水现象严重,尤其在山区最为明显,因此水库是贵州高原重要的水资源保障和自然环境基础^[16-18]。本文分析了 2020 年百花水库浮游植物功能群的变化特征与环境因子的关系,结合优势群落稳定性,以期为贵州高原生态与水库水质监管提供理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况及采样点设置

百花水库($26^{\circ}35' \sim 26^{\circ}41'N, 106^{\circ}27' \sim 106^{\circ}32'E$)地处贵州高原中部,位于贵阳市西北郊,属于长江支流乌江水系猫跳河流域,是集发电、灌溉、旅游、养殖等多功能的大型二级水库。湖泊流域面积 1895 km^2 ,水域面积 14.5 km^2 ,湖泊补给系数为 182.2,最大水深为 45 m,平均水深 10.8 m,总库容 $1.82 \times 10^8 \text{ m}^3$,年总供水量为 2872 万 m^3 ^[19]。百花水库地处贵州高原喀斯特地区,属于季风湿润型气候,气候特征差异明显。百花水库是贵阳“两湖一库”的调蓄湖泊,其水质好坏直接关系到贵阳市的人民生活和水生态环境的改善。本研究于 2020 年 1—12 月份(除 2 月份)逐月进行水质和浮游植物采样。根据百花水库的形态设置了 5 个采样点,分别为大坝(DB)、贵铝水厂(GLSC)、麦西河(MXH)、岩脚寨(YJZ)和花桥(HQ)(图 1),进行表层(0.5 m)、中层(5 m)、下层(10 m)采样。

1.2 样品采集和分析

浮游植物定量样品每个采样点取表层、中层和下层,混合后每个水样保留 1.5 L,用浓度为 3%~5% 甲醛固定,

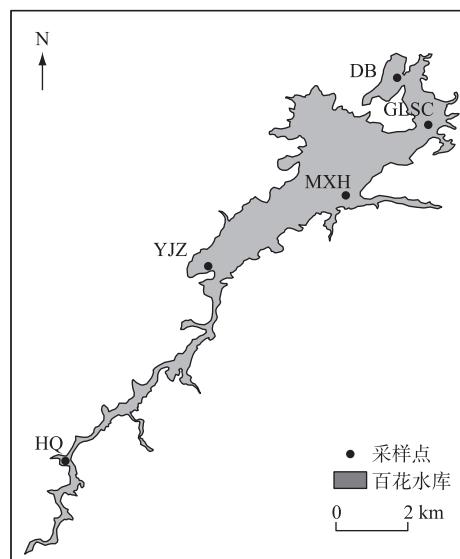


图 1 百花水库采样点分布示意

Fig.1 Location of sampling sites in
Baihua Reservoir

在实验室静置 24~48 h 后用虹吸法浓缩至 20~40 mL, 在显微镜下根据文献鉴定^[20], 浮游植物定性样品用 25#浮游生物网在水面以下水平及垂直方向呈“∞”字拖网, 现场加入 3%~5% 甲醛溶液固定。

现场用 YSI(便携式多参数水质分析仪)测定水温(WT)、pH、溶解氧(DO)等, 按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)测定总磷(TP)、总氮(TN)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等指标。叶绿素 a(Chl.a)浓度采用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜抽滤水样 500 mL, 反复冻融, 用丙酮萃取法在紫外分光度计下测定^[21]。

1.3 数据分析

采用 ArcGIS 软件绘制采样地图;冗余分析(RDA)采用 Canoco 5.0 软件分析浮游植物优势种与环境因子的关系, 分析前对物种数据以及环境变量(pH 除外)进行 $\lg(x+1)$ 转换。其他数据及图表采用 Origin 2021 软件绘制。浮游植物功能群分类参考 Reynolds 等提出的浮游植物功能群分类方法^[5]。浮游植物的细胞体积根据与其相近几何形状的体积计算, 假定浮游植物的密度为 1 g/cm³, 计算浮游植物的生物量^[22~23]。

1.3.1 群落稳定性 通过 Bray-Curtis 相异性指数(BC)来衡量群落稳定性, BC 取值范围为 [0,1], BC 值越大, 表明物种更替性越强, 稳定性越弱。BC 的计算公式如下^[24]:

$$BC = \sum_{i=1}^n |y_{i1} - y_{i2}| / \sum_{i=1}^n |y_{i1} + y_{i2}| \quad (1)$$

式中, BC 为群落更替指数; y_{i1} 为物种 i 第 1 次测量的生物量(mg/L); y_{i2} 为物种 i 第 2 次测量的生物量(mg/L); n 为 2 次测量鉴别出的总物种数。

1.3.2 生态状态指数 FG 功能群与环境特征能相互响应, 所以欧盟水框架(Water Framework Directive, European Parliament and Council, 2000)据此开发出生态状态指数以用于环境监测, 水库生态状态指数(Q)的计算方法如下^[25], Q 指数 0~5 分别表示:0~1 差, 1~2 耐受, 2~3 中等, 3~4 好, 4~5 极好。

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} F_i \right) \quad (2)$$

式中, n 为浮游植物 FG 功能群的数量, N 为浮游植物的总生物量, n_i 为第 i 个功能群的生物量, F_i 为第 i 个功能类群的赋值。

1.3.3 综合营养状态指数 以 Chl.a、TP、TN、SD、COD_{Mn} 为计算指标, 综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 计算公式如下^[26]:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (3)$$

式中, $TLI(j)$ 代表第 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, m 为评价参数的个数。

2 结果

2.1 环境因子变化特征

调查期间, 百花水库 DO、WT、pH、TN、TP、COD_{Mn}、SD 和 Chl.a 浓度如图 2 所示。WT 的变化范围为 11.3~27.7°C, 平均水温为 19.1°C, 各采样点位的水温波动小, 单因素方差分析表明各月份水温存在显著差异($n=55, P<0.05$)。百花水库的水体整体呈现弱碱性, 水体 pH 的变化范围为 7.71~8.38, 方差分析表明 6 月份的 pH 与 1 月份、12 月份的 pH 值存在显著差异($n=55, P<0.05$), 除花桥(HQ)采样外, 其余采样点的变化趋势相同。DO 浓度变化范围为 4.01~13.01 mg/L, 各采样点位 DO 浓度变化均呈现春季高冬季低的趋势。各采样点位的 TN 浓度的变化范围为 1.18~2.89 mg/L, 最高值出现在 7 月份, 方差分析表明 7 月份与其他月份存在显著差异($n=55, P<0.05$)。除花桥采样点, TP 浓度波动较小, 花桥采样点的 TP 浓度明显高于其他采样点。冬季水体的透明度明显高于夏季, 而 COD_{Mn} 的变化趋势正好相反, 4~6 月高于其他月份。

2.2 浮游植物群落结构的时空分布特征

研究期间, 百花水库全年共检测出藻类 7 门 64 种。其中蓝藻门和硅藻门分别为 13 和 14 种, 各占总物种数的 20.31% 和 21.88%; 检出的绿藻门物种数最多(为 27 种), 占比为 42.19%; 甲藻门和裸藻门均检出 4 种, 各占比 6.25%; 隐藻门和金藻门各检出 1 种。如图 3, 百花水库月生物量在 124.8~2235.4 μg/L 之间, 均值为 891.66 μg/L, 1 月份的生物量最高, 4 月份的生物量最低, 生物量贡献以硅藻门和甲藻门为主, 平均贡献率为

66.67%, 甲藻门在秋、冬季的生物量较高, 绿藻门和蓝藻门的生物量在夏、秋季的生物量明显增加。从空间上看, 百花水库各点位的生物量范围为 658.59~1087.83 $\mu\text{g/L}$, 麦西河口点位的生物量最高, 大坝点位的生物量最低, 整体上生物量贡献以硅藻门、甲藻门和裸藻门为主。

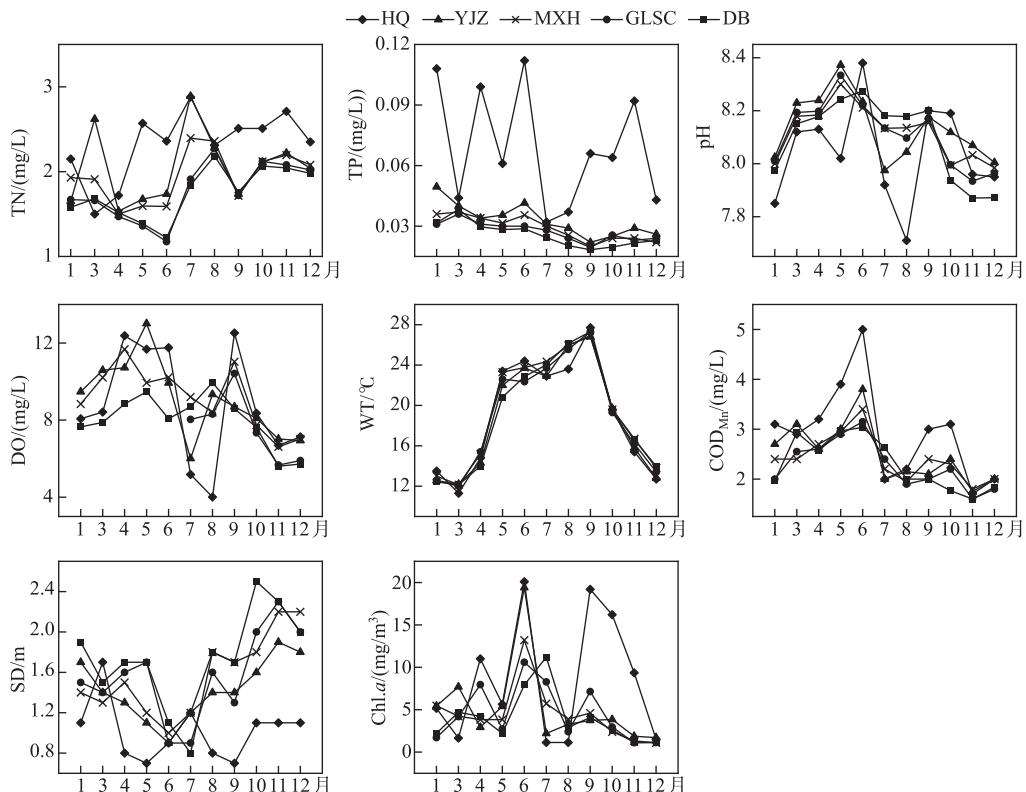


图 2 百花水库环境因子变化

Fig. 2 The changes of environmental factors in Baihua Reservoir

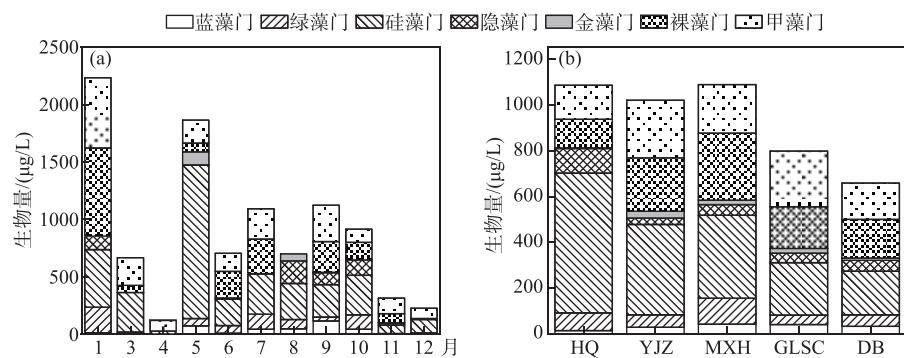


图 3 浮游植物各门生物量的时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of biomass of each phytoplankton

2.3 浮游植物功能群的划分与时空分布特征

根据 Reynolds 等^[5]提出的浮游植物功能群分类方法, 研究期间, 百花水库共归类出 26 个功能群, 分别

为 B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_M、Lo、MP、N、P、S1、S2、S_N、T、TC、W1、W2、X1、X2、X3、Y、Z(表 1). 将相对生物量至少在一个样本大于 5% 且出现频率大于 50% 的功能群定义为优势功能群. 如图 4, 百花水库共归类出 9 个浮游植物优势功能群, 分别为 S1、L_M、J、B、P、D、MP、Y 和 W1, 优势功能群随时间的变化为 L_M/D/B(3、4 月)→L_M/D/B(5—7 月)→Y/S1/L_M/D/B(8—9 月)→W1/P/L_M/D/B(1、11、12 月), 功能群 L_M、B 和 D 的月生物量贡献较高, 平均贡献率为 54.52%, 功能群 Y 和 S1 在夏季的生物量明显升高. 从空间上, L_M 和 W1 是各点位的优势类群, 代表藻分别为甲藻和裸藻, 贡献率为 41.51%, 功能群 J 和 S1 在各点位形成微弱优势, 以硅藻为主的功能群 B、P、D 和 MP 的贡献率为 36.93%.

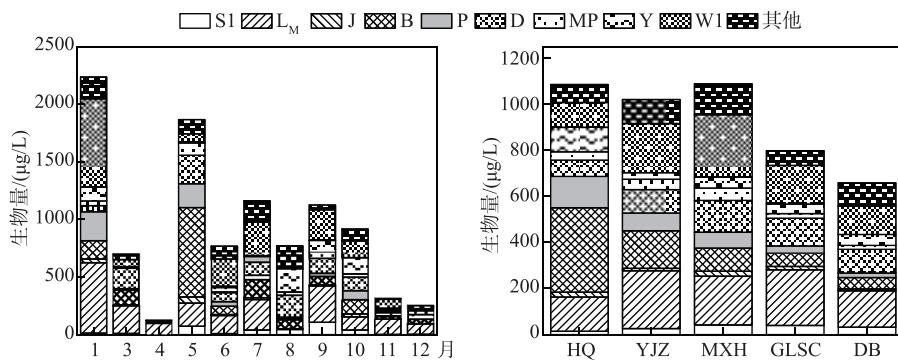


图 4 浮游植物优势功能群生物量的时空分布

Fig.4 Spatial-temporal distribution of biomass of dominant phytoplankton functional groups

2.4 群落稳定性

基于各月份浮游植物的 9 个优势功能群的生物量进行群落稳定性分析, 发现功能群在各月份的群落更替指数(BC)均存在着更替和波动. 如图 5, 整体上 9 个优势功能群在 5—11 月份的 BC 值小于 0.5, 表明在此期间各功能群更替程度相对稳定. 功能群 W1 和 L_M 的更替幅度大, BC 值呈现先减少后增加的趋势; 功能群 MP、D 和 B 在 5—9 月份的 BC 值较低, 表明在该阶段 3 个功能群保持相对稳定的优势地位, 而功能群 S1 的 BC 值波动较大, 在 1—5 月 BC 值较大, 在 7—9 月的 BC 值低, 因此功能群 S1 在夏季的优势地位稳定; 功能群 J 在 6—10 月份的更替幅度小于其他月份的更替幅度, 在 6—10 月份该功能群的生物量保持相对稳定.

2.5 浮游植物功能群的生态状态指数

用浮游植物功能群的生态状态指数(Q)对百花水库的水质进行评价. 如图 6, 时间上 Q 的范围为 0.73~3.46, 平均值为 2.38, 说明百花水库的水质处于中等状态, 这与 $TLI(\Sigma)$ 的结果一致, 百花水库 $TLI(\Sigma)$ 范围为 36.90~50.20, 水质处于中营养状态. 空间上, 各点位的 Q 值在 2.14~3.42 之间, $TLI(\Sigma)$ 值在 40.43~49.78 之间, 各点位呈现 Q 值越大, $TLI(\Sigma)$ 值越小的趋势.

2.6 优势功能群与环境因子的关系

通过对百花水库浮游植物 9 个优势功能群生物量进行 DCA 分析后, 发现排序轴梯度长度最大值小于 3, 因此选择线性模型. 选取 9 个优势功能群生物量和 TN、TP、WT、DO 等 8 个环境因子进行 RDA 排序分析, 采用蒙特卡拟合方法分别对浮游植物功能群生物量与环境因子间关系进行显著性检验. RDA 结果表明轴 1 和轴 2 分别解释了 15.39% 和 5.86% 的浮游植物优势功能群生物量与环境因子关系, 说明本次排序分析较好地解释了优势功能群生物量与环境因子的关系(图 7). 显著性检验结果显示 WT ($F = 5.0, P = 0.004$)、pH ($F = 3.0, P = 0.022$) 是对优势功能群生物量有显著解释性的环境因子. WT 沿轴 1 分布最长, pH 沿轴 2 分布最长, 是影响浮游植物有优势功能群分布最主要的环境因子. RDA 分析呈现出一定的时间异质性, 11、12 和 1 月集中在第一象限, 3、4 月份集中在第二象限, 紧密相关的是 LM 功能群, 5—6 月份集中在第 3 象限, 优势功能群为 D 和 MP, 第四象限主要为 8—10 月份, 优势功能群为 S1 和 B. 进一步对 WT 和 pH 进行方差分解分析(VPA), WT 的解释率为 9.0%, pH 的解释率为 3.1%, 两者共同的解释率为 1.5% (图 7).

表 1 百花水库浮游植物功能群的划分及适宜生境

Tab.1 Functional classification of phytoplankton in Baihua Reservoir and their suitable habitant

功能群	代表藻种属	环境特征
B	梅尼小环藻(<i>Cyclotella meneghiniana</i>)	中富营养、大型深水或浅水水体
C	星杆藻(<i>Asterionella</i>)	中营养、中小型水体
D	尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>)、菱形藻(<i>Nitzschia</i> sp.)	含有富营养盐、透明度低
P	新月藻(<i>Cladophora</i>)、颗粒直链藻(<i>Melosira granulata</i>)、脆杆藻(<i>Fragilaria</i>)	中到富营养、持续或半持续混合水体、低温
MP	舟形藻(<i>Navicula</i> sp.)、曲壳藻(<i>Achnanthes</i> sp.)、异极藻(<i>Gomphonema</i> sp.)	经常性搅动、浑浊、浅水
T	转板藻(<i>Mougeotia</i>)	持续混合水层
TC	鞘丝藻(<i>Lyngbya</i> sp.)、颤藻(<i>Oscillatoria</i> sp.)	富营养、静水
S1	湖泊假鱼腥藻(<i>Pseudanabaena limnetica</i>)、湖丝藻(<i>Limnothrix</i> sp.)、棒胶藻(<i>Rhabdogloea</i>)	中到富营养、混合水体、低透明度
S2	螺旋藻(<i>Spirulina</i>)	温暖、高碱性、浅水
S _N	拟柱孢藻(<i>Cylindrospermum</i>)、尖头藻(<i>Raphidiopsis</i>)	温暖、混合
X3	弓形藻(<i>Schroedireia</i>)	贫营养、混合、浅水
X2	衣藻(<i>Chlamydomonas</i>)	中富营养、浅水
X1	小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	超富营养、浅水
E	分歧锥囊藻(<i>Dinobryon divergens</i>)	贫营养、混合、浅水
Y	薄甲藻(<i>Glenodinium</i>)、裸甲藻(<i>Gymnodinium</i>)、隐藻(<i>Cryptomonas</i>)	静水环境、中到富营养
F	卵囊藻(<i>Oocystis</i>)、蹄形藻(<i>Kirchneriella</i> sp.)	中到富营养、洁净、水体混合强
G	实球藻(<i>Pandorina</i> sp.)、空球藻(<i>Eudorina</i> sp.)	富营养、停滞水体
J	双对栅藻(<i>Scenedesmus bijugatus</i>)、斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>)、二形栅藻(<i>Scenedesmus dimorphus</i>)、四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)、四足十字藻(<i>Crucigenia tetrapedia</i>)、三角四角藻(<i>Tetradon trigonum</i>)、微小四角藻(<i>Tetraedron minimum</i>)、小空星藻(<i>Coelastrum microporum</i>)	中到富营养、分层
N	扁鼓藻(<i>Cosmarium depressum</i>)	持续或半持续混合水体
Z	集星藻(<i>Synechococcus</i>)	贫营养
K	隐球藻(<i>Aphanocapsa</i>)	富营养的浅水
H1	鱼腥藻(<i>Anabaena</i> sp.)	富营养、分层、含氮低、浅水
Lo	色球藻(<i>Chroococcus</i> sp.)、平裂藻(<i>Merismopedia</i> sp.)	中到富营养、中到大型水体、可深可浅
W1	裸藻(<i>Euglena</i> sp.)、尖尾裸藻(<i>Euglena oxyuris</i>)	有机污染、浅水
W2	囊裸藻(<i>Trachelomonas</i>)	中营养、浅水
L _M	拟多甲藻(<i>Peridiniopsis</i> sp.)、飞燕角甲藻(<i>Ceratium hirundinella</i>)	富到超富营养、中小型水体

3 讨论

3.1 浮游植物功能群的演替特征

浮游植物的时空分布格局与营养特征、水文环境、人为活动干扰等密切相关,其分布特征是水库生态功能完整性与水质特征的有效指示^[27-28],研究期间,百花水库中共划分出 26 个功能群,分别为 B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_M、Lo、MP、N、P、S1、S2、S_N、T、TC、W1、W2、X1、X2、X3、Y、Z,与红枫水库 25 个、花溪水库 20 个和汤浦水库 24 个功能群的调查结果相似^[29-31]。浮游植物种类、生物量的变化是环境因子在时间和空间相互影响的结果^[32-33],百花水库作为喀斯特地貌的高原水库,水库溶洞众多,形成的适宜浮游植物生长的生境较多^[34],因此功能群的变化与水库特殊的地貌环境和水体环境有关。

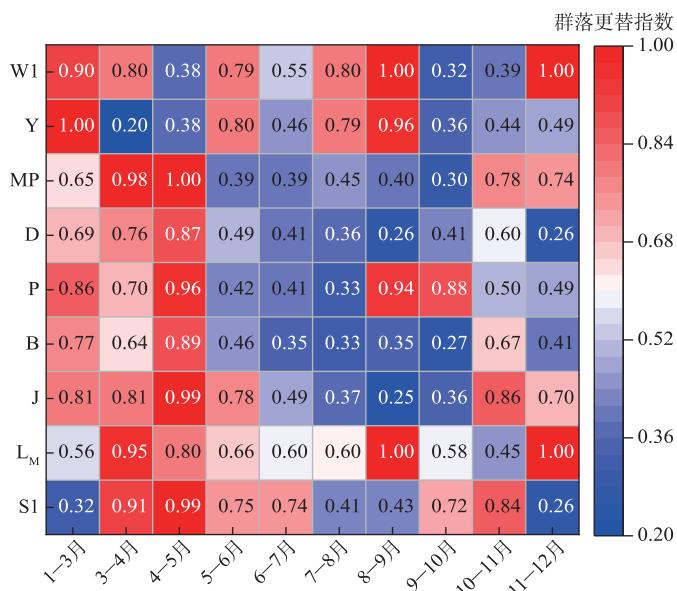


图 5 百花水库浮游植物优势功能群的群落更替指数

Fig.5 The community turnover index of the dominant phytoplankton functional groups in Baihua Reservoir

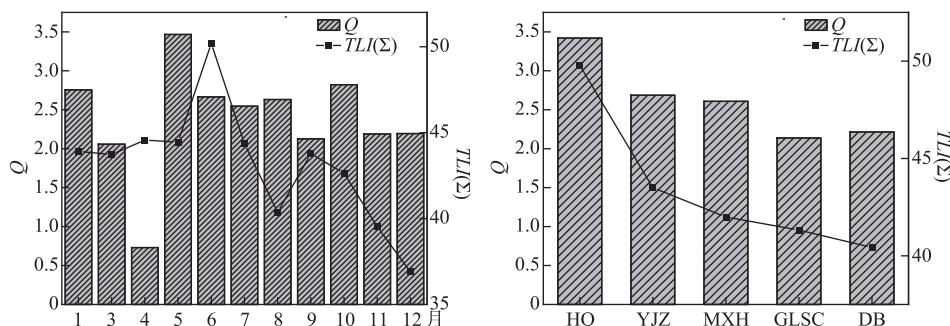


图 6 生态状态指数和综合营养状态指数的时空分布

Fig.6 The temporal and spatial distribution of ecological status index and comprehensive trophic level index

特定的浮游植物功能类群反映特定的水体生境状态,浮游植物群落的分布会随着营养梯度和季节梯度引起的水体环境的变化而变化^[35]。功能群 B、D 和 L_M 在各月份均为优势功能群,功能群 B 和 D 适宜的生境都表明百花水库为中营养型水库^[25],这与 TLI(Σ)指示的结果一致,百花水库的 TLI(Σ)值基本小于 50,说明百花水质处于中营养状态。功能群 B 的代表藻种为梅尼小环藻 (*Meneghiniana cyclotella*),耐受低光照,对 pH 升高和硅元素缺乏等敏感。功能群 D 的代表藻种为尖针杆藻 (*Synedra acus*),耐受冲刷,对营养缺乏敏感。功能群 L_M 主要以具有鞭毛的拟多甲藻 (*Peridiniopsis* sp.) 和飞燕角甲藻 (*Ceratium hirundinella*) 组成,有自主迁移的能力,能在混合的水体中生长。百花水库水体长期处于中营养、低光照,有利于功能群 B 和 D 的代表藻种生长繁殖,在生长竞争中占据优势。百花水库的水体平均氮磷比为 58 : 1,喀斯特地貌水体中 Ca²⁺浓度较高,易与磷形成共沉淀,减少水体磷浓度^[36]。低磷水体有利于功能群 L_M 的生长,因为其代表藻种会在磷充足的时候将磷储存于体内,利于在外界磷不足时继续生长^[5]。

时空异质性会存在不同的水体生境,会出现不同的优势功能群,功能群的稳定性也会有所差异。以湖泊假鱼腥藻 (*Pseudanabaena limnetica*) 为主的功能群 S1 在 7—10 月份的生物量明显增加,夏季百花水库处于

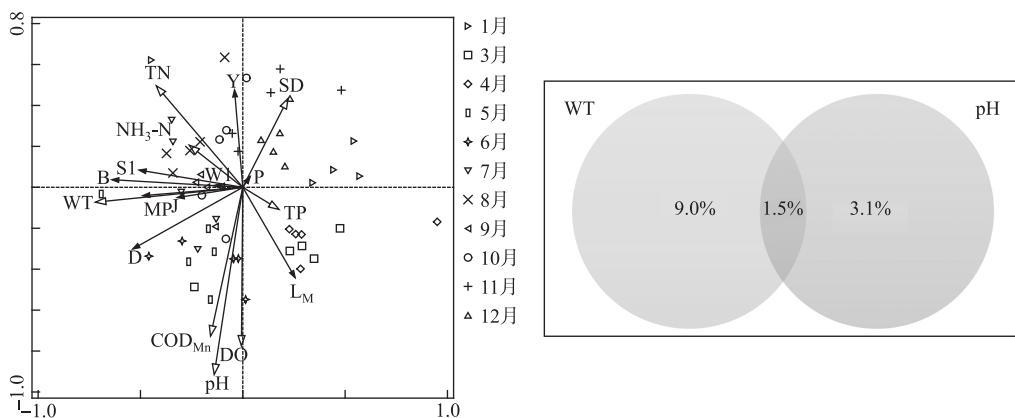


图 7 浮游植物优势功能群与环境因子的 RDA 分析和 VPA 分析

Fig.7 RDA analysis and VPA analysis between phytoplankton dominant functional groups and environmental factors

丰水期,水位上升明显,水体混合加强,透明度降低,为功能群 S1 的稳定生长提供了有利的竞争条件^[5,25],功能群 S1 在夏季的 BC 值小于 0.5,也证明了功能群 S1 在夏季保持较高的稳定性. 这与黄国佳等^[29]和肖晶等^[37]对红枫水库的研究结果一致,功能群 S1 在夏季的丰度占据绝对优势,百花水库和红枫水库都属于乌江水系猫跳河流域的大型水库,功能群 B、D 和 L_M 同样是红枫水库常见的优势功能群. 从空间上看,功能群 S1 的生物量从上游至下游呈现逐渐升高的趋势,下游有百花水库大坝和水厂的设立,水体搅动性较大,利于功能群 S1 的代表藻种生长. 功能群 W1 以裸藻 (*Euglena*) 为代表藻属,在时空分布上都占据一定的优势,其所代表的生境特征是有机污染的浅水水体,百花水库的 COD_{Mn} 平均值高达 2.5 mg/L, 高于花溪水库和阿哈水库的化学耗氧量^[30,38], 可能是由于百花水库周边有农业生产活动,外源有机质流入库区,为功能群 W1 的生长提供生长条件. 适应静水环境的功能群 Y 在秋、冬季的 BC 值小,功能群稳定性较高,且在上游 HQ 点位的生物量较大. 秋冬季水库进入枯水期,水体流动性降低,上游水流平缓,有利于功能群 Y 的稳定生长.

3.2 影响浮游植物功能群的主要环境因子

浮游植物群落的结构主要取决于资源的可获得性,特别是营养的可获得性和温度的变化^[39]. 浮游植物对营养物的响应是水生生态学关注的主要问题之一^[40],水库监测的环境因子可以划分为物理指标和化学指标,其中物理指标包括水温、pH、电导率、透明度等,富营养化指标包括 TN、TP、COD_{Mn}^[41]. 从 RDA 排序分析和 VPA 分析结果可知,水温和 pH 的 P 值小于 0.05,是影响百花水库浮游植物功能群结构的主要环境因子,二者交互影响百花水库功能群的演替. 由相关性分析可知,功能群 D、S1 和 MP 与水温和 pH 呈显著正相关 ($P<0.01$),功能群 B、P、MP 和 J 与 COD_{Mn} 呈显著正相关 ($P<0.05$),功能群 B 和 P 与 TN 呈显著正相关 ($P<0.01$),功能群 D 和 MP 与 DO 呈显著正相关 ($P<0.05$). 这与赵耿楠等^[42]对甘肃省的渭河干流、黄国佳等^[43]对贵州省三板溪水库和夏莹霏等对太湖的研究结果类似^[44].

水温通过控制光合作用的酶促反应或呼吸作用的强度来影响浮游植物的生长,水温升高会提高浮游植物的光合作用和呼吸作用,进而直接或间接影响群落结构的变化^[45]. 已有研究表明浮游植物的自身生长是有其最适温度条件,Nalewajko 等研究发现微囊藻属 (*Microcystis*) 和鱼腥藻属 (*Anabaena*) 的最适生长温度为 28~32℃^[46],Kim 等认为冠盘藻 (*Stephanodiscus hantzschii*) 的最适生长温度为 8.7℃^[47],Shafik 等的实验认为梅尼小环藻的最佳生长温度为 25℃^[48]. 百花水库地处亚热带高原地区,夏秋季有良好的温度和光照条件,秋冬季的温度明显降低,较大的水温差为功能群的季节性变化提供了条件. 从相关性分析可知水温与功能群 D、S1 和 MP 呈显著的正相关 ($r>0.417$),以硅藻为优势代表种类的功能 D 和 MP 在全年都为优势功能群,硅藻适宜较低温度,因此在夏季的生长速率有所降低,而喜高温的蓝藻和绿藻繁殖旺盛,提高了功能群 S1 和 J 在夏季的优势地位,说明水温在全年都是浮游植物演替的关键因子^[49].

对于大多数的浮游植物来说,水体 pH 值是其生长代谢的重要因素,pH 值过高或过低时都会抑制浮游植物的光合作用^[50]. pH 值对浮游植物种类的扩散和生长非常重要,例如星杆藻是最耐受酸性的硅藻,在 pH<4.9 时扩散能力依然很高,隐球藻在 pH>7 时扩散能力最大,多甲藻在酸性湖泊中争夺营养的能力很高^[51]. 百花水库的 pH 值范围在 7.71~8.38 之间,均值为 8.10,研究表明 pH 值为 8.5 是水体碳酸系统稳定性较高的一个数值,是最适宜浮游植物的生长繁殖^[52]. 百花水库的弱碱性水体有利于浮游植物吸收大气中的二氧化碳,促进光合作用^[53],从而促进百花水库有较高初级生产力. 百花水库夏季 pH 较高,可能是因为水库地处岩溶地区,水体中的钙镁离子含量较高,在夏季的水体复分解反应增强导致 pH 值较大,其次可能是由于夏季水库浮游植物生物量较高,植物光合作用较强^[54]. 本研究表明 pH 对功能群 D、MP 和 S1 的有显著影响($r>0.407$),这与安瑞志等^[55]对青藏高原巴松错和葛优等对阳澄西湖的研究结果是一致的^[56]. 功能群 S1 是以耐受碱性水体的蓝藻为主,在夏季 pH 值升高时稳定生长,而 D 和 MP 功能群是以硅藻为主要代表藻种,适宜弱碱性水体,在秋冬季 pH 值降低时有较强的生长能力^[57].

研究结果表明 pH 与 WT 呈显著正相关($r=0.315$),且 pH 和水温对百花水库功能群的共同解释率为 1.5%,说明二者对浮游植物功能群的演替具有协同作用. 水温的周期性变化必然会引起水体其他环境因子的变化,相关性分析可知水温与 Chl.a 呈显著正相关性,与透明度呈显著负相关($r>0.315$),这说明温度在调节浮游植物生长同时,也影响了水体中其他因素的变化,进而间接影响浮游植物的变化^[58]. 水体 pH 值的变化不仅与水温有密切相关,而且受到其他因素的影响,如营养元素流入、浮游植物繁殖、DO 浓度等^[59],相关性结果可知 pH 与 COD_{Mn}、DO 和 Chl.a 呈显著正相关($r>0.315$),与 TN 和 SD 呈显著负相关($r>-0.316$),由此可见,WT 和 pH 是百花水库浮游植物功能群的分布特征的主要影响因子,同时也通过影响其他环境因子的变化间接调节了浮游植物的群落变化. 这与贵州高原红枫水库和阿哈水库的研究结果有一致性,李磊等^[60]对阿哈水库的研究表明水温、透明度等物理因子对阿哈水库浮游植物功能群时空分布的影响更为显著,金祖雪等^[61]对红枫水库的研究表明水温、DO、TN、透明度是红枫水库藻类丰度的主要影响因素.

4 结论

1) 2020 年百花水库共检测出藻类 7 门 64 种,归类 26 个功能群,分别为 B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_M、Lo、MP、N、P、S1、S2、S_N、T、TC、W1、W2、X1、X2、X3、Y、Z. 其中 S1、L_M、J、B、P、D、MP、Y 和 W1 为优势功能群,在夏季的稳定性较高.

2) 功能群 B、D 和 L_M 是长期处于优势地位的功能群,适宜生境为中营养水体,综合营养状态指数均值为 43.0,生态状态指数均值为 2.38,表明百花水库的水体为中营养化水体.

3) RDA 及相关性分析表明,pH 值和水温对百花水库浮游植物功能群结构动态变化的影响有协同作用,二者对 DO、TN 等环境因子有显著影响.

5 参考文献

- [1] Reynolds CS, Reynolds SN, Munawar IF et al. The regulation of phytoplankton population dynamics in the world's largest lakes. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, 3(1): 1-21. DOI:10.1016/S1463-4988(99)00066-4.
- [2] Zhu LY, Chen YY, Liu J et al. Spatio-temporal evolution and relationship of water environment quality and phytoplankton community in Wenyu river. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 702-712. DOI:10.13227/j.hjkx.201906207.[朱利英,陈媛媛,刘静等. 温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系. 环境科学, 2020, 41(2): 702-712.]
- [3] Zhao SQ, Fan YC, Dai YR et al. Responses of phytoplankton community to abiotic environmental variables with the mitigation of eutrophication: A case study of Donghu Lake, Wuhan City. *J Lake Sci*, 2019, 31(5): 1310-1319. DOI:10.18307/2019.0520.[赵思琪,范垚城,代嫣然等. 水体富营养化改善过程中浮游植物群落对非生物环境因子的响应:以武汉东湖为例. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1310-1319.]
- [4] Rolland A, Bertrand F, Maumy M et al. Assessing phytoplankton structure and spatio-temporal dynamics in a freshwater ecosystem using a powerful multiway statistical analysis. *Water Research*, 2009, 43(13): 3155-3168. DOI:10.1016/j.watres.2009.03.049.

- [5] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5) : 417-428. DOI:10.1093/plankt/24.5.417.
- [6] Padisák 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.
- [7] Abonyi A, Leitão M, Lançon AM et al. Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France). *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1) : 233-249. DOI:10.1007/s10750-012-1130-0.
- [8] Kozak A, Budzyńska A, Dondajewska-Pielka R et al. Functional groups of phytoplankton and their relationship with environmental factors in the restored użarzewskie lake. *Water*, 2020, **12**(2) : 313. DOI:10.3390/w12020313.
- [9] Nagy-László Z, Padisák J, Borics G et al. Analysis of niche characteristics of phytoplankton functional groups in fluvial ecosystems. *Journal of Plankton Research*, 2020, **42**(3) : 355-367. DOI:10.1093/plankt/fbaa020.
- [10] Dong J, Li GB, Song LR. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Di-anchi since 1960s. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5) : 735-742. DOI:10.18307/2014.0511.[董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征. 湖泊科学, 2014, **26**(5) : 735-742.]
- [11] Zhu YQ, Lv J, Li QZ et al. Seasonal variation of phytoplankton community and its relationship with environment in subtropical reservoirs: A comparison between two methods of functional groups classification. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(6) : 2079-2086. DOI:10.13287/j.1001-9332.201906.030.[朱亿秋, 吕俊, 李乔臻等. 亚热带水库浮游植物群落的季节变化及其与环境的关系: 两种功能群分类法的比较. 应用生态学报, 2019, **30**(6) : 2079-2086.]
- [12] Kim HG, Hong S, Kim DK et al. Drivers shaping episodic and gradual changes in phytoplankton community succession: Taxonomic versus functional groups. *Science of the Total Environment*, 2020, **734** : 138940. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138940.
- [13] Sennhauser EB. The concept of stability in connection with the gallery forests of the Chaco region. *Vegetatio*, 1991, **94**(1) : 1-13. DOI:10.1007/BF00044911.
- [14] Pimm SL. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 1984, **307**(5949) : 321-326. DOI:10.1038/307321a0.
- [15] Allan E, Weisser W, Weigelt A et al. More diverse plant communities have higher functioning over time due to turnover in complementary dominant species. *PNAS*, 2011, **108**(41) : 17034-17039. DOI:10.1073/pnas.1104015108.
- [16] He SH, Ouyang T, Zhao L et al. Analysis of phytoplankton community stability and influencing factors in a tributary of the Three Gorges reservoir. *Environmental Science*, 2021, **42**(7) : 3242-3252. DOI:10.13227/j.hjkx.202012096.[何书晗, 欧阳添, 赵璐等. 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析. 环境科学, 2021, **42**(7) : 3242-3252.]
- [17] Wu WJ, Yang K, Wang ZC et al. Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Yudong Reservoir of Yungui-plateau. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(2) : 69-75. DOI:10.15928/j.1674-3075.2012.02.005.[吴卫菊, 杨凯, 汪志聪等. 云贵高原洞庭水库浮游植物群落结构及季节演替. 水生态学杂志, 2012, **33**(2) : 69-75.]
- [18] Wang GT, Chen BB, Wang M et al. Seasonal variation of phytoplankton community structure in the Tianhe Reservoir of the Daluoshan Mountain in southern Zhejiang Province, China and its indication to water quality. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(6) : 2227-2240. DOI:10.13287/j.1001-9332.202106.032.[王国涛, 陈斌斌, 王敏等. 浙南大罗山天河水库浮游植物群落结构的季节变化及对水质的指示作用. 应用生态学报, 2021, **32**(6) : 2227-2240.]
- [19] Yuan ZH, Li QH, He Y et al. Variation and evaluation of nutrients in Baihua Reservoir in Guizhou Plateau based on Bayesian method, 2014-2018. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6) : 1623-1636. DOI:10.18307/2019.0602.[袁振辉, 李秋华, 何应等. 基于贝叶斯方法的贵州高原百花水库水体营养盐变化及评价(2014—2018年). 湖泊科学, 2019, **31**(6) : 1623-1636.]
- [20] Hu HJ, Wei YX eds. The freshwater algae of China—Systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006. [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.]
- [21] Lin SJ, He LJ, Huang PS et al. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton. *Ecologic Science*, 2005, **24**(1) : 9-11.[林少君, 贺立静, 黄沛生等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进. 生态科学, 2005, **24**(1) : 9-11.]
- [22] Chen C, Li SJ, Hu R et al. Comparative analysis of four methods for calculating biomass of phytoplankton community. *J Lake Sci*, 2013, **25**(6) : 927-935. DOI:10.18307/2013.0617.[陈纯, 李思嘉, 胡韧等. 四种浮游植物生物量计算方法的比较分析. 湖泊科学, 2013, **25**(6) : 927-935.]
- [23] Hillebrand H, Dürselen CD, Kirschelt D et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phy-*

- cology, 1999, **35**(2) : 403-424. DOI:10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.
- [24] Filstrup CT, Hillebrand H, Heathcote AJ et al. Cyanobacteria dominance influences resource use efficiency and community turnover in phytoplankton and zooplankton communities. *Ecology Letters*, 2014, **17** (4) : 464-474. DOI: 10.1111/ele.12246.
- [25] 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.]
- [26] Devercelli M. Phytoplankton of the middle Paraná River during an anomalous hydrological period: A morphological and functional approach. *Hydrobiologia*, 2006, **563**(1) : 465-478. DOI:10.1007/s10750-006-0036-0.
- [27] Cui GY, Wang BL, Xiao J et al. Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in Karst hydroelectric reservoirs. *Journal of Hydrology*, 2021, **592** : 125607. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125607.
- [28] Tian YL, Jiang Y, Liu Q et al. The impacts of local and regional factors on the phytoplankton community dynamics in a temperate river, Northern China. *Ecological Indicators*, 2021, **123** : 107352. DOI:10.1016/j.ecolind.2021.107352.
- [29] Huang GJ, Li QH, Chen C et al. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(17) : 5573-5584.[黄国佳, 李秋华, 陈椽等. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征. 生态学报, 2015, **35**(17) : 5573-5584.]
- [30] Ma XY, Li QH, Chen Q et al. Variation characteristics and influencing factors of the structure of a phytoplankton community after an ecological regulation in Huaxi Reservoir, Guizhou Province. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33** (3) : 589-598.[马欣洋, 李秋华, 陈倩等. 生态调控后贵州花溪水库浮游植物群落结构的变化特征及影响因素. 环境科学研究, 2020, **33**(3) : 589-598.]
- [31] Zhang JF, Hu XH, Ma PM et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and key driving factors in Tangpu Reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(3) : 55-62. DOI:10.15928/j.1674-3075.201906080146.[张俊芳, 胡晓红, 马沛明等. 汤浦水库浮游植物功能群季节演替及关键驱动因子. 水生态学杂志, 2021, **42**(3) : 55-62.]
- [32] Wang R, Liu XW, Wu JJ et al. Long-term variations of phytoplankton community in relations to environmental factors in Deep Bay, China, from 1994 to 2016. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **153** : 111010. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111010.
- [33] Nwankwegu AS, Li YP, Huang YN et al. Nitrate repletion during spring bloom intensifies phytoplankton iron demand in Yangtze River tributary, China. *Environmental Pollution*, 2020, **264** : 114626. DOI:10.1016/j.envpol.2020.114626.
- [34] Zhang YR, Zhou ZF, Li SH et al. Analysis of spatio-temporal variations of water quality in deep water lake in Karst area: A case study of the Pingzhai Reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(11) : 52-60. [张勇荣, 周忠发, 李韶慧等. 喀斯特地区深水型湖泊水质时空变异性分析:以平寨水库为例. 环境科学与技术, 2019, **42**(11) : 52-60.]
- [35] Seip KL, Reynolds CS. Phytoplankton functional attributes along trophic gradient and season. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(3) : 589-597. DOI:10.4319/lo.1995.40.3.0589.
- [36] Ge QS, Zhang P, Ni MF et al. Relationships between phytoplankton and environmental factors in a typical Karst plateau reservoir. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(1) : 156-164.[葛秋诗, 张萍, 倪茂飞等. 典型喀斯特高原水库浮游植物与环境因子的关系. 生态环境学报, 2021, **30**(1) : 156-164.]
- [37] Xiao J, Wang BL, Zhang HT et al. Succession of phytoplankton functional groups in the Wujiang River-reservoir system and its environmental impact factors identification. *Earth and Environment*, 2019, **47**(6) : 829-838.[肖晶, 王宝利, 张海涛等. 乌江河流-水库体系浮游植物功能群演替及其环境影响因子辨识. 地球与环境, 2019, **47**(6) : 829-838.]
- [38] Hu Y, Li QH, He Y et al. Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of metazooplankton in Aha Reservoir, Guizhou Province. *China Environmental Science*, 2020, **40**(1) : 227-236.[胡艺, 李秋华, 何应等. 贵州高原水库浮游动物分布特征及影响因子——以阿哈水库为例. 中国环境科学, 2020, **40**(1) : 227-236.]
- [39] Zhu KX, Bi YH, Hu ZY. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2013, **450/451** : 169-177. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.01.101.
- [40] Elser JJ, Bracken MES, Cleland EE et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, **10**(12) : 1135-1142. DOI:10.1111/j.1461-0248.

- 2007.01113.x.
- [41] Latinopoulos D, Ntislidou C, Kagalou I. Relationships of environmental conditions and phytoplankton functional groups in a new re-constructed shallow lentic system in draught conditions. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2020, **20**(3): 369-381. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2020.04.003.
 - [42] Zhao GN, Pan BZ, Ding YT et al. Characteristics and water quality evaluation of phytoplankton functional groups in the Weihe River mainstem and its tributaries in the northern foot of the Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(8): 3226-3237. [赵耿楠, 潘保柱, 丁一桐等. 渭河干流和秦岭北麓典型支流浮游植物功能群特征及水质评价. 生态学报, 2021, **41**(8): 3226-3237.]
 - [43] Huang GJ, Li QH, Chen C et al. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 418-428. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0747. [黄国佳, 李秋华, 陈椽等. 贵州高原三板溪水库浮游植物功能群时空分布特征. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 418-428.]
 - [44] 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.]
 - [45] Blinn DW. Diatom community structure along physicochemical gradients in saline lakes. *Ecology*, 1993, **74**(4): 1246-1263. DOI: 10.2307/1940494.
 - [46] Nalewajko C, Murphy TP. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: An experimental approach. *Limnology*, 2001, **2**(1): 45-48. DOI: 10.1007/s102010170015.
 - [47] Kim JS, Seo IW, Lyu SW et al. Modeling water temperature effect in diatom (*Stephanodiscus hantzschii*) prediction in eutrophic rivers using a 2D contaminant transport model. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2018, **19**: 41-55. DOI: 10.1016/j.jher.2018.01.003.
 - [48] Shafik HM, Herodek S, Vörös L et al. Growth of *Cyclotella meneghiniana* Kutz. I. Effects of temperature, light and low rate of nutrient supply. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 1997, **33**(3): 139-147. DOI: 10.1051/limn/1997014.
 - [49] González-Olalla JM, Medina-Sánchez JM, Carrillo P. Fluctuation at high temperature combined with nutrients alters the thermal dependence of phytoplankton. *Microbial Ecology*, 2021: 1-13. DOI: 10.1007/s00248-021-01787-8.
 - [50] Feng Y, Xiao LJ, Wei GF et al. Responses of phytoplankton community to increasing water level in the lacustrine zone near the dam of a large tropical reservoir: Gaozhou Reservoir, South China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, **20**(3): 529-536. [冯喻, 肖利娟, 韦桂峰等. 高州水库水位上升期坝前深水区浮游植物群落的响应特征. 应用与环境生物学报, 2014, **20**(3): 529-536.]
 - [51] Hörnström E. Phytoplankton in 63 limed lakes in comparison with the distribution in 500 untreated lakes with varying pH. *Hydrobiologia*, 2002, **470**(1/2/3): 115-126. DOI: 10.1023/A:1015619921119.
 - [52] Mo MX, Zhang ST, Ye XC et al. pH characters and influencing factors in Dianchi and Xingyun Lakes of Yunnan Plateau. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(S1): 269-273. [莫美仙, 张世涛, 叶许春等. 云南高原湖泊滇池和星云湖 pH 值特征及其影响因素分析. 农业环境科学学报, 2007, **26**(S1): 269-273.]
 - [53] Ma BS, Xu B, Wei KJ et al. Phytoplankton community structure and its relation to environmental conditions in the middle Anning River, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**: 3332-3341. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202010.030. [马宝珊, 徐滨, 魏开金等. 安宁河中游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2020, **39**: 3332-3341.]
 - [54] Li QH. Characteristics and evaluation of eutrophication in Guizhou plateau reservoirs. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2018, **36**(2): 1-8. [李秋华. 贵州高原水库富营养化特征及评价. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2018, **36**(2): 1-8.]
 - [55] An RZ, Pan CM, Ta B 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.]

- [56] Ge Y, Zhou YF, Wang CH et al. Succession patterns of phytoplankton functional groups in western area of Yangcheng Lake and their relationship with environmental factors. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 3027-3039. [葛优, 周彦锋, 王晨赫等. 阳澄西湖浮游藻类功能群演替特征及其与环境因子的关系. 中国环境科学, 2019, 39(7): 3027-3039.]
- [57] Salmaso N. Seasonal variation in the composition and rate of change of the phytoplankton community in a deep subalpine lake. *Hydrobiologia*, 1996, 337: 49-68. DOI: 10.1007/BF00028506.
- [58] Tian P, Li YL, Li YJ et al. Effects of Three Gorges Reservoir operation on vertical distribution of chlorophyll a and environmental factors in tributaries. *Environmental Science*, 2021. DOI: 10.13227/j.hjkx.202105201. [田盼, 李亚莉, 李莹杰等. 三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响. 环境科学, 2021.]
- [59] Song RB, He F, Guo YY et al. Study on characteristics and influencing factors of pH value variation in Dianchi Lake. *Environmental Science Survey*, 2020, 39(2): 15-19. [宋任彬, 何锋, 郭艳英等. 滇池水体 pH 值变化特征及其影响因素初步分析. 环境科学导刊, 2020, 39(2): 15-19.]
- [60] 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.hjkxxb.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.]
- [61] Jin ZX, Wang JF, Li QH et al. Effects of physicochemical characteristics of water body on phytoplankton community in Hongfeng Lake in Guizhou Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 517-526. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202002.011. [金祖雪, 王敬富, 李秋华等. 贵州红枫湖水体理化特征及其对浮游植物群落的影响. 生态学杂志, 2020, 39(2): 517-526.]