

基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水库浮游植物群落结构特征*

胡月敏¹, 李秋华^{1**}, 朱冲冲¹, 欧 腾¹, 李红梅¹, 陈峰峰², 高永春³, 骆 兰³

(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: 贵州医科大学, 贵阳 550003)

(3: 贵州省水文水资源局, 贵阳 550002)

摘 要: 为了解黔中地区浮游植物群落结构特征, 同时为了研究功能群对水环境的指示, 选取黔中 2 座典型水库——普定水库和桂家湖水库, 分别于 2015 年的枯水期(1 月)和丰水期(8 月)进行浮游植物采样分析. 结果表明: (1) 2 座水库营养盐无显著性差异, 水动力学参数(水温、混合层深度、透明度、真光层深度、水柱相对稳定性、光的可获得性)存在显著性差异. (2) 普定水库共归类出 18 个功能类群, 桂家湖水库共归类出 15 个功能类群. 普定水库优势功能群水期分布特征: 枯水期 L_0 → 丰水期 B+P; 桂家湖水库优势功能群水期分布特征: 枯水期 B+J+Y → 丰水期 B+J. 垂直层面上, 普定水库枯水期以甲藻组成的优势功能群 L_0 在三岔街采样点表层藻类生物量达到峰值(18529 $\mu\text{g/L}$), 远高于中层和底层水体以及其他采样点, 与该点水文特性以及组成 L_0 的甲藻特征有关. 丰水期以硅藻组成的功能群 P 在小河采样点的中层藻类生物量最大(2741 $\mu\text{g/L}$), 远高于该点的表层水体及其他采样点, 与 P 类群耐受低光有关. 而桂家湖水库由于面积小、水位浅且少有人为干扰, 故样点间环境因子差异小, 整个水体优势功能群分布高度一致. (3) 经 RDA 分析, 水动力学参数、营养盐、pH 和电导率是影响普定水库浮游植物群落分布的主要环境因子; 桂家湖水库仅水动力学参数(水温和水柱相对稳定性)是主要因子. (4) 从浮游植物功能群适宜生境来看, 普定水库为富营养水体, 桂家湖水库为中到富营养水体. 由分析得出隶属于不同水域的 2 座水库浮游植物群落结构及水环境均存在显著性差异.

关键词: 功能群; 时空分布; 普定水库; 桂家湖水库; 浮游植物; 群落结构

Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province

HU Yuemin¹, LI Qiuhua^{1**}, ZHU Chongchong¹, OU Teng¹, LI Hongmei¹, CHEN Fengfeng², GAO Yongchun³ & LUO Lan³

(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 Medical University, Guiyang 550003, P.R.China*)

(3: *Guizhou Province Hydrology and Water Resources Bureau, Guiyang 550002, P.R.China*)

Abstract: In order to explore the phytoplankton community structure characteristics in the Central of Guizhou Province and the indication of functional groups on water environment, Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir were selected and phytoplankton samples were collected in different depths in the dry (January 2015) and wet (August 2015) seasons. The results showed that: (1) There was no significant difference in nutrients but significant difference in hydrodynamic conditions (water temperature, mixing depth, transparency, true optical depth, water column relative stability and the availability of light) between the two reservoirs. (2) There were 18 and 15 functional groups of phytoplankton in Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir, respectively. The obvi-

* 国家自然科学基金项目(U1612442)、贵州省水利厅项目(KT201401)、贵州省科技厅项目(黔科合人字(2015)10号)和贵州省教育厅项目(黔教合 KY[2017]032)联合资助. 2017-05-08 收稿; 2017-06-07 修改稿. 胡月敏(1993~), 女, 硕士研究生; E-mail: lucky_yuemin@163.com.

** 通信作者; E-mail: qiuhua2002@126.com.

ous distribution patterns in Puding Reservoir; L_0 in the dry season and B+P in the wet season. The distribution patterns in Guijiahu Reservoir; B+J+Y in the dry season and B+J in the wet season. On the vertical level in Puding Reservoir the biomass of L_0 reached the peak (18529 $\mu\text{g/L}$) in the surface water of Sanchajie, which was much higher than the middle and bottom and other sampling points. This is related to the hydrological properties of Sanchajie and the characteristics of Dinophyta. The biomass of algae in the middle layer of the river (2741 $\mu\text{g/L}$) which was much higher than that of the surface water and other samples at Xiaohe which was related to P the low tolerance of light. The distribution of the dominant function groups of the Guijiahu Reservoir was highly consistent, it most related to the small water area the shallow water level and few human disturbance, resulting in small environmental difference between the samples. (3) Redundancy analysis revealed that hydrodynamic parameters, nutrient, pH and conductivity were the key factors driving variation in phytoplankton groups in Puding Reservoir. The hydrodynamic parameters (water temperature and RWCS) were the key factors driving variation in phytoplankton groups in Guijiahu Reservoir. (4) The phytoplankton functional group's suitable habitat showed that the Puding Reservoir was eutrophic while the Guijiahu Reservoir was mesotrophic to eutrophication. The result showed that there were significant difference in phytoplankton community structure and water environment between the two reservoirs belonging to different water.

Keywords: Functional groups; spatial and temporal distribution; Puding Reservoir; Guijiahu Reservoir; phytoplankton; community structure

用浮游植物来评价水质具有悠久的历史,浮游植物是水体中主要的初级生产者,其群落组成和种群变化能够直接并快速地反映水环境的动态变化^[1]. 浮游植物的生长受营养盐、光照、温度、水动力条件等诸多环境要素的复合影响,水生态系统中浮游藻类的群落结构、种群数量随水环境改变而发生相应的转变,并且藻类能对水环境的改变做出灵敏的响应^[2-3]. 传统的分类方法能够在一定程度上反映浮游植物群落结构组成,但不能充分体现浮游植物的生态学功能^[4-5],具有一定局限性. 浮游植物功能群是由 Reynolds 等^[6]提出, Padišák 等^[7]进一步补充完善形成的重要理论,目前在藻类生态学中成为重要的热点问题. 根据物种的生理、形态和生态属性定义了环境中主导或共同控制的功能群,它能够很好地反映浮游植物与生境之间的关系,并在水环境生态学及水质管理领域显示出良好的应用前景^[6-7].

目前,国外已有许多学者采用这种新型分类方法研究水体的富营养化状况和浮游植物群落特征. Maria Cellamare 等对意大利贫营养型湖泊 Tovel 湖无冰期进行了研究,从浮游植物功能群的角度来探讨其中 2 个相互连接但水文形态存在差异的盆地中的浮游植物群落结构^[8]; Gábor 等通过研究喀尔巴阡盆地的水体认为湖泊尺寸对水体形态和化学性质有着显著的影响,并通过这些变量作用,进一步影响水体中浮游植物功能群的变化^[9]. 国内有关浮游植物功能群的研究近年来也逐渐增多^[10-13],董静等^[10]研究了抚仙湖、洱海、滇池浮游植物功能群自 1960 年以来的演变特征,证明 3 个高原湖泊在近几十年极有可能由于营养程度的增加而导致功能群的演替;易齐涛等^[13]通过研究淮南矿区 3 个塌陷湖泊站点的浮游植物功能群变化,得出水温和光照条件是驱动浮游植物功能群季节演替的关键环境因子,而营养盐和生物因素则是导致 3 个湖泊功能群组成差异的主要因子. 现今运用浮游植物功能群方法对贵州高原水库的研究多集中在单个水库^[14-15],对比分析 2 座水库的研究尚未见报道. 普定水库及桂家湖水水库属于黔中 2 座中小型水库,2 座水库地理位置接近但水文形态迥异且分别隶属于长江流域和珠江流域. 本文基于功能群对比分析 2 座水库浮游植物群落结构及主要影响的环境因子,揭示大小不一且隶属不同流域的水库浮游植物群落结构时空变化特征以及导致这种变化的主要水环境参数. 同时探究浮游植物功能群对贵州高原水库水环境的指示,为贵州省水资源管理与改善提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

普定水库又名夜郎湖水库,位于贵州省安顺市以北 35 km 普定县境内,库区流域面积 5871 km^2 ,主航道 42 km,蓄水 4.2 亿 m^3 ,水深 24~41 m,属于长江水系,是安顺市人民的主要饮用水源地. 桂家湖水水库位于贵州省镇宁布依族苗族自治县北部可梦河上游,库区流域面积 94.7 km^2 ,库容 1060 万 m^3 ,水深 15~26 m,属于珠江水系. 分别于枯水期(2015 年 1 月)和丰水期(2015 年 8 月)进行 2 次采样调查分析. 根据普定水库水域

特点自上游到下游设置为喇叭(26°21'49.36"N, 105°42'52.16"E)、三岔街(26°22'47.69"N, 105°43'19.00"E)、小河(26°23'30.91"N, 105°43'59.67"E)、码头(26°22'34.66"N, 105°45'18.72"E)、大坝(26°22'56.16"N, 105°48'04.86"E)5个采样点,分表层(0.5 m)、中层(10 m)和底层(20 m)3层采样;根据桂家湖水库水域特点自上游到下游设置为库中(26°08'29.67"N, 105°44'57.00"E)和大坝(26°08'37.90"N, 105°44'00.62"E)2个采样点,由于该水库水位较浅,故分表层(0.5 m)和底层(15 m)2层采样(图1)。

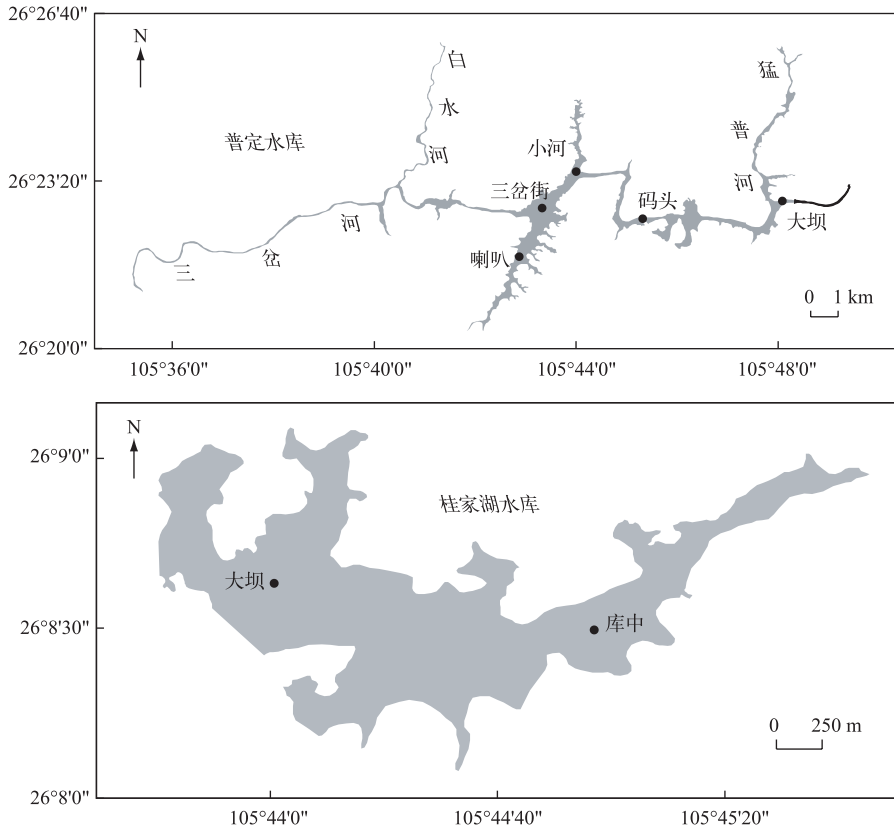


图1 普定水库和桂家湖水库采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir

1.2 样品采集、处理及鉴定方法

浮游植物定性样品采用25#浮游生物网在水体中水平及垂直方向呈“∞”字形缓慢拖网,用3%~5%甲醛固定。浮游植物定量样品在每层用采水器取1.5 L水,用甲醛固定,放置实验室中沉淀24~48 h后用虹吸法浓缩到50 ml,在显微镜下进行藻类鉴定及计数,藻种鉴定与分类方法参考文献[16]。

1.3 理化因子分析方法

用YSI-多参数水质检测仪现场测定水温(WT)、pH和电导率(EC)等,透明度(SD)通过赛氏盘(Secchi Disk)测定。按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)测定总磷(TP)、总氮(TN)、无机氮(DIN,包括硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)与正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)等指标。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(HJ-636—2012)测定TN浓度,紫外分光光度法测定 NO_3^- -N浓度,分光光度法测定 NO_2^- -N浓度,采用水杨酸法分光光度法测定 NH_4^+ -N浓度。叶绿素a(Chl.a)浓度采用0.45 μm 的醋酸纤维滤膜抽滤水样200~500 ml,反复冻融浸提,运用丙酮萃取方法测定^[17]。

1.4 数据分析方法

本文中以透明度的2.7倍为真光层深度(Z_{em})^[18]。已知当采样地点确定以后,水体中温度改变($\geq 1^\circ\text{C}$)

的深度被视作混合层深度(Z_{mix}),故可由温度曲线估计. 真光层与混合层的比率($Z_{\text{eu}}:Z_{\text{mix}}$)则成为光可获得性的评判标准^[19].

水柱相对稳定性(RWCS)依据 Padisák 等^[20]的方法计算:

$$RWCS = \frac{D_b - D_s}{D_4 - D_5} \quad (1)$$

式中, D_b 为底层水体的密度, D_s 为表层水体的密度, D_4 和 D_5 分别代表 4 和 5°C 下的水体密度. 水体密度由 Krambeck 方程计算:

$$\rho = 0.999869 + 6.67413 \times 10^{-5} WT - 8.85556 \times 10^{-6} WT^2 + 8.23031 \times 10^{-8} WT^3 - 5.51577 \times 10^{-10} WT^4 \quad (2)$$

式中, WT 表示水温. 在本文中, 0.5 m 为水体表层深度.

物种多样性(H')由 Shannon-Weaver 指数确定^[21]:

$$H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i \quad (3)$$

式中, $P_i = n/N$, n 为单个物种的数量, N 为所有物种的数量.

生物量由与简单几何体相近的生物体积以及丰度估算得出^[22], 单位为 $\mu\text{g/L}$.

本文中地图采用 ArcGIS 软件绘制, 浮游植物功能群与环境因子的相关关系用 Canoco 4.5 软件分析, 采用 SPSS 软件进行浮游植物功能群与环境因子之间的 Pearson 相关性分析、方差分析(ANOVA)以及绘制叶绿素 a 浓度与生物量相关分析图, 采用 R 软件进行非度量多维尺度分析(NMDS), 其余的图表均采用 Origin 8.6 软件绘制.

2 结果与分析

2.1 环境因子

2 座水库营养盐差别不大, 总体上普定水库浓度要高于桂家湖水库(表 1). 此外, 营养盐的变化体现出较强的季节性. 氮自枯水期至丰水期有所增加, DIN 浓度增加明显(普定水库自枯水期至丰水期 DIN 浓度均值由 2.894 mg/L 增加至 3.198 mg/L; 桂家湖水库自枯水期至丰水期 DIN 浓度均值由 2.737 mg/L 增加至 3.347 mg/L), 相反磷则有所降低. 水温作为重要的环境因子之一, 丰水期明显高于枯水期. 2 座水库水温无显著性差异($P>0.05$), 枯水期稳定在 10°C 左右, 丰水期稳定在 23.5°C 左右. 2 座水库电导率和 pH 无显著性差异($P>0.05$), 丰水期略有降低, 均属于弱碱性水体. 2 座水库 SD 存在显著性差异($P<0.05$). 普定水库 SD 均值枯水期(0.80 m)远低于丰水期(3.51 m), 桂家湖水库 SD 均值则是枯水期(5.512 m)高于丰水期(2.533 m). Z_{eu} 与 SD 呈现相同的变化. Z_{mix} 则与 Z_{eu} 变化相反, 丰水期混合层深度低于枯水期($P<0.05$). 反映光可获

表 1 普定水库和桂家湖水库枯水期和丰水期的环境因子对比

Tab.1 Comparison of environmental factors of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in dry season and wet season

环境因子	普定水库		桂家湖水库	
	2015 年 1 月	2015 年 8 月	2015 年 1 月	2015 年 8 月
TP/(mg/L)	0.042±0.007	0.031±0.023	0.033±0.001	0.011±0.002
PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	0.006±0.003	0.007±0.003	0.009±0.002	0.008±0.003
TN/(mg/L)	3.448±0.331	3.627±0.198	3.406±0.131	3.869±0.216
DIN/(mg/L)	2.894±0.018	3.198±0.136	2.737±0.017	3.347±0.187
WT/°C	9.813±0.320	23.280±0.681	10.020±0.340	24.020±1.144
EC/(MS/cm)	437.0±8.417	387.0±12.650	431.5±4.000	385.0±19.166
pH	8.700±0.188	8.000±0.117	8.383±0.200	7.968±0.176
SD/m	0.800±0.101	3.510±0.912	5.512±0.500	2.533±0.523
Z_{eu} /m	2.160±0.246	9.470±2.210	14.850±1.350	6.670±1.350
Z_{mix} /m	25.600±2.332	14.600±3.492	17.500±0.521	7.400±0.222
$Z_{\text{eu}}:Z_{\text{mix}}$	0.013±0.016	0.202±0.247	0.851±0.112	0.913±0.154
RWCS	1.476±1.005	37.720±8.629	6.425±1.681	64.260±2.083

得性的 $Z_{eu}:Z_{mix}$ 比率在普定水库枯水期明显低于丰水期 ($P<0.05$), 但桂家湖水库无显著性差异 ($P>0.05$). 普定水库的 $RWCS$ 远低于桂家湖水库 ($P<0.05$) (普定水库自枯水期至丰水期 $RWCS$ 均值由 1.476 增加至 37.720; 桂家湖水库自枯水期至丰水期 $RWCS$ 均值由 6.425 增加至 64.260), 说明桂家湖水库水体对流小. 2 座水库 $RWCS$ 在值枯水期均远低于丰水期, 丰水期水体稳定性高, 发生分层.

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 浮游植物分类 普定水库 5 个采样点 2 次采样调查共鉴定出藻类 7 门 82 种(属), 其中蓝藻门 9 种(属), 绿藻门 46 种(属), 硅藻门 19 种(属), 甲藻门 4 种, 裸藻门 1 种, 金藻门 2 种, 隐藻门 1 种. 绿藻门最多, 约占总种数的 56%, 硅藻门和蓝藻门次之, 约占 23% 和 11%, 其余所占比例较小. 枯水期检出 7 门 46 种(属), 丰水期检出 6 门 50 种(属). 桂家湖水库 2 个采样点 2 次采样调查共鉴定出藻类 7 门 26 种(属), 其中蓝藻门 3 种(属), 绿藻门 15 种(属), 硅藻门 4 种, 甲藻门 2 种, 裸藻门 1 种, 金藻门 1 种, 隐藻门 1 种. 绿藻门所占比例最大, 约占总种数的 57%, 硅藻门和蓝藻门次之, 分别占 15% 和 12%. 桂家湖水库枯水期共鉴定出 6 门 13 种(属), 丰水期共鉴定出 5 门 21 种. 普定水库生物量 2 个水情期占比最大的是甲藻 (77.1%), 其次是硅藻 (17.9%), 而桂家湖水库则是硅藻主导 (71.7%), 绿藻次之 (19.1%), 2 座水库浮游植物群落结构存在较大差异 (表 2).

表 2 普定水库与桂家湖水库浮游植物组成对比
Tab.2 Species number, percentage and biomass of phytoplankton in Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir

浮游植物	普定水库			桂家湖水库		
	物种数	物种数/%	生物量/%	物种数	物种数/%	生物量/%
蓝藻门	9	11	0.3	3	12	1.5
绿藻门	46	56	2.9	15	57	19.1
硅藻门	19	23	17.9	4	15	71.7
甲藻门	4	5	77.1	2	7	5.5
金藻门	2	3	1.6	1	4	0.2
裸藻门	1	1	0.19	1	4	1.5
隐藻门	1	1	0.01	1	4	0.5
总计	82	100	100	26	100	100

根据 Reynolds 等^[6] 和 Padisák 等^[7] 提出的浮游植物功能群分类方法, 对鉴定出的藻种进行分类, 普定水库共归类出 18 个功能类群, 分别为 A、B、D、E、F、G、J、K、L_m、L₀、MP、P、S1、T、W2、X1、X2、Y; 桂家湖水库共归类出 15 个功能类群, 分别为 B、D、E、G、J、K、L₀、MP、P、S1、T、W2、X1、X2、Y (表 3).

2.2.2 浮游植物功能群时空分布 将相对生物量大于 5% 的功能类群定义为该采样点的优势功能群, 大于 50% 则该功能类群占据绝对优势. 根据普定水库和桂家湖水库 2 个水情期的功能群相对生物量排序图 (图 2) 可得出, 桂家湖水库枯水期以功能群 B、J、Y 为主, 丰水期以功能群 B、J 为主; 普定水库枯水期主要以功能群 L₀ 为主, 而丰水期则以功能群 P、B 为主.

枯水期至丰水期普定水库浮游植物群落结构更替明显, 喇叭采样点: 枯水期 L₀→丰水期 B+P+L₀ (表层 B, 中层 P, 底层 L₀); 三岔街采样点: 枯水期 L₀→丰水期 B+P (表层 B, 中层和底层 P); 对比 2 个水情期浮游植物功能群相对排序图和生物量变化趋势图发现, 小河与码头 2 个采样点存在较大相似性, 小河采样点是枯水期 L₀→丰水期 B+P+L₀ (表层 B+P+L₀, 中层 P, 底层 P); 码头采样点: 枯水期 L₀→丰水期 B+P+J (表层 J, 中层 B+P, 底层 P) (图 2). 枯水期普定水库 L₀ 占据绝对优势, 几乎每个采样点每一层其相对生物量占比都达到了 90%, 生物量 (枯水期: 151~18529 μg/L) 表层>中层>底层 (大坝除外), 以三岔街表层水体生物量最高. 而丰水期各采样点表层水体以功能群 B+L₀+J 为主, 中层和底层水体则以 P 为主要优势功能群 (生物量占比大于 60%, 部分水体大于 90%), B 为次级优势功能群. 与枯水期不同, 中层水体等于甚至大于表层水体, 小河及码头采样点底层水体高于其他样点的表层水体, 藻类生物量 (丰水期: 328~2741 μg/L) 在小河采

样点中层水体中达到峰值.

表 3 浮游植物功能群的代表性藻种及适宜生境

Tab.3 Phytoplankton functional groups and their suitable habitat

功能群 代表性藻(种)	环境特征
A 根管藻(<i>Rhizosolenia</i> sp.)	贫营养、深水、洁净水体
B 小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	中营养、中小型或大型浅水水体
D 针杆藻(<i>Synedra</i> sp.), 菱形藻(<i>Nitzschia</i> sp.)	含有营养盐、浑浊水体
E 锥囊藻(<i>Dinobryon</i> sp.), 鱼鳞藻(<i>Mallomonas</i> sp.)	贫营养或异养型、小型水体
F 卵囊藻(<i>Oocystis</i> sp.), 蹄形藻(<i>Kirchneriella</i> sp.), 微芒藻(<i>Micractinium pusillum</i>)	中到富营养、洁净、混合强水体
G 空球藻(<i>Eudorina elegans</i> sp.), 实球藻(<i>Pandorina morum</i> sp.)	富营养、停滞水体
J 栅藻(<i>Scenedesmus</i> sp.), 盘星藻(<i>Pediastrum</i> sp.), 空星藻(<i>Coelastrum</i> sp.), 四角藻(<i>Tetraedron</i> sp.)	高营养、混合、浅水水体
K 隐球藻(<i>Aphanocapsa</i> sp.)	富营养的浅水水体
L _M 蓝纤维藻(<i>Dactylococcopsis</i> sp.)	富到超富营养、中小型水体
L ₀ 甲藻(<i>Pyrrophyta</i>), 色球藻(<i>Chroococcus</i> sp.), 平裂藻(<i>Merismopedia</i> sp.)	贫到富营养、营养分层水体
MP 舟行藻(<i>Navicula</i> sp.), 桥弯藻(<i>Cymbella</i> sp.), 颤藻(<i>Oscillatoria prnceps</i> sp.), 曲壳藻(<i>Achnanthes</i> sp.)	经常性搅动、浑浊、浅水水体
P 角星鼓藻(<i>Staurastrum</i> sp.), 脆杆藻(<i>Fragilaria</i> sp.), 新月藻(<i>Closterium</i> sp.), 颗粒直链藻(<i>Aulacoseria granulate</i>)	持续或半持续的混合水层
S1 假鱼腥藻(<i>Pseudanabaena</i> sp.), 湖丝藻(<i>Limnothrix</i> sp.)	混合浑浊、透明度低水体
T 并联藻(<i>Quadrigula</i> sp.), 水绵(<i>Spirogyra</i> sp.)	持续混合水层
W2 囊裸藻(<i>Trachelomonas</i> sp.)	中营养、浅水水体
X1 小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>), 纤维藻(<i>Ankistrodesmus</i> sp.), 弓形藻(<i>Schroederia</i> sp.)	超富营养、浅水水体
X2 衣藻(<i>Chlamydomonas</i> sp.)	中到富营养、浅水水体
Y 隐藻(<i>Cryptophyta</i>)	静水环境

枯水期至丰水期桂家湖水水库浮游植物群落结构更替不是很明显,库中采样点:枯水期整个断面均以功能群 B 为主(生物量占比高达 90%)→丰水期 B+J(表层 B+J,底层 B);大坝采样点:枯水期 B+J+Y(表层 B+J,底层 B+J+Y)→丰水期 B+J+L₀(表层 B+J+L₀,底层 B+J). 桂家湖水水库总生物量(枯水期:31~603 μg/L,丰水期:329~698 μg/L)明显低于普定水库.

2.2.3 对比两座水库浮游植物群落结构特征 根据 NMDS 分析图可以清晰的看出,2 座水库随时间浮游植物群落结构更替的不同特征. 普定水库枯水期以甲藻和金藻为主,对应功能群 L₀和 E,丰水期以硅藻和绿藻为主,对应功能群 P/B 以及 F/X1/G. 在图 3 中,由于功能群 E 生物量占比过低,相对生物量排序图不能明显看出, NMDS 图则很好地反映了普定水库浮游植物群落的时空分布. 而对于桂家湖水水库, NMDS 中显示枯水期隐藻为典型物种,对应功能群 Y. 丰水期硅藻为典型物种,对应功能群 B. 会出现这样的分布也反映出普定水库与桂家湖水水库存在共同占优势的功能群,故不属于 2 座水库的典型物种,而介于二者之间. 由于枯水期桂家湖水水库总生物量过低,即使其硅藻生物量远大于隐藻但仍远低于 2 座水库的丰水期,故硅藻在图中并没有显示为桂家湖枯水期的典型物种.

2.3 叶绿素 a 浓度与生物多样性指数

叶绿素 a 作为评价水质的一个重要指标,其与浮游植物生物量有很高的相关性($R^2 = 0.604$),说明 2 座水库浮游植物生物量均对叶绿素 a 有巨大贡献,叶绿素 a 浓度的变化也反映浮游植物生物量的变化(图 4b). Shannon-Weaver 指数与叶绿素 a 浓度变化趋势相反(图 4a). 普定水库枯水期三岔街样点(0.83)与丰水期小河(0.84)和码头(0.51)样点 Shannon-Weaver 指数偏低,对应的叶绿素 a 浓度偏高,分别为 53.5、15.7 和 15.3 mg/m³,与图 2 相对应,叶绿素 a 浓度越高,藻类生物量越高,Shannon-Weaver 指数越低. 叶绿素 a 浓度和藻类生物量偏低的水域可能 Shannon-Weaver 指数也会偏低,如枯水期桂家湖库中采样点(Chl.a:3.31 mg/m³,生物量 478 μg/L,Shannon-Weaver 指数 0.302). 普定水库枯水期叶绿素 a 浓度高于丰水期(枯水期:13.9~

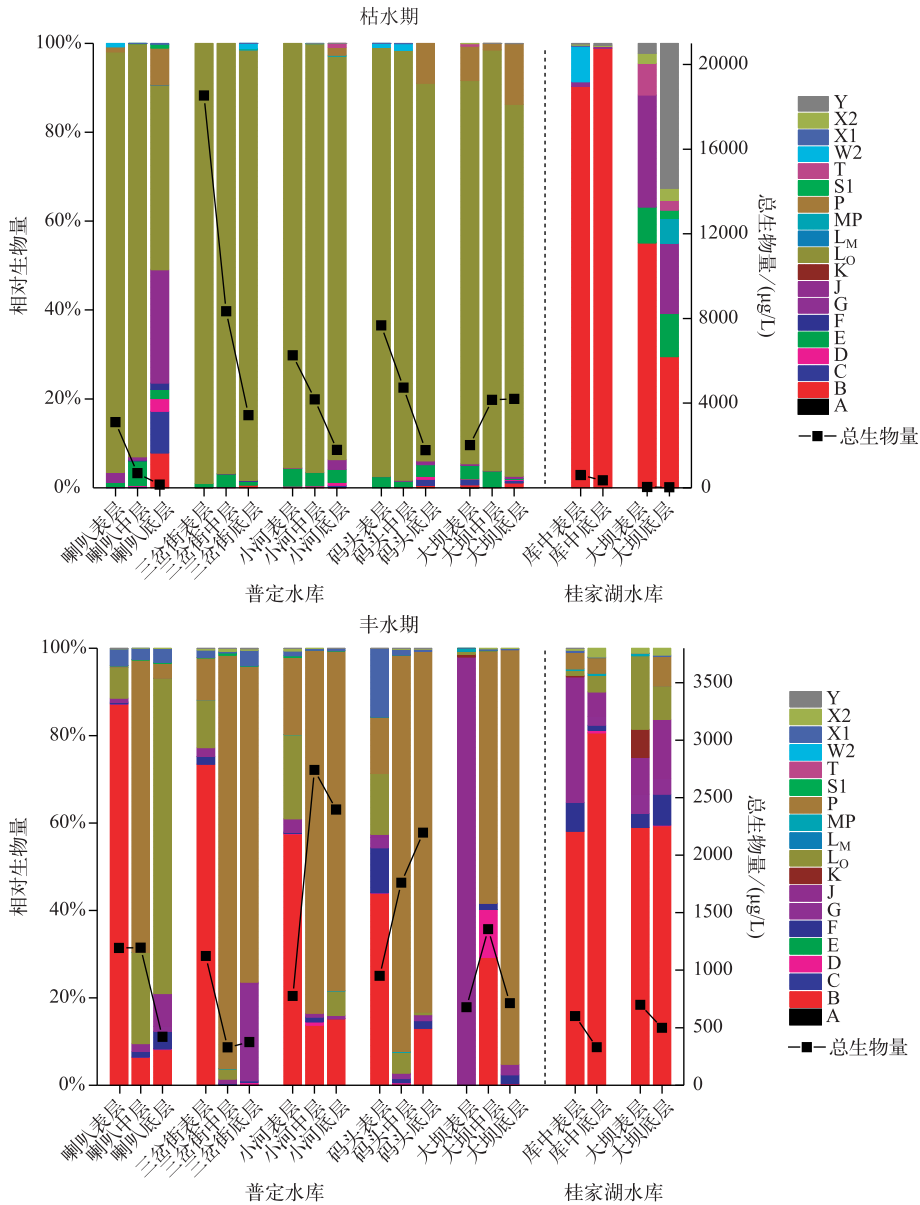


图2 普定水库和桂家湖水库枯水期和丰水期相对生物量排序图和总生物量折线图

Fig.2 Relative biomass and total biomass of algae functional groups in Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir of dry season and wet season

53.5 mg/m³, 丰水期:7.3~15.7 mg/m³), 桂家湖水库枯水期和丰水期叶绿素 a 浓度分别在 3.4 和 4.5 mg/m³ 左右波动。

2.4 浮游植物功能群与环境因子的相关分析

2.4.1 RDA 分析 分析选取普定水库 2 个水情期浮游植物优势功能群生物量数据(分层数据平均值)进行 DCA 分析,长度梯度小于 3,故选择线性模型. 共有 13 个环境因子 TN、DIN、TP、PO₄³⁻-P、Chl.a、WT、EC、pH、SD、Z_{cu}、Z_{mix}、Z_{cu}:Z_{mix} 和 RWCS 进行 RDA 分析. 采用蒙特卡拟合方法对浮游植物功能群数据和环境因子进行显著性检验,通过筛选,pH(P=0.002,P<0.05)、WT(P=0.002,P<0.05)、Z_{mix}(P=0.021,P<0.05)、SD(P=0.012,P<0.05)、

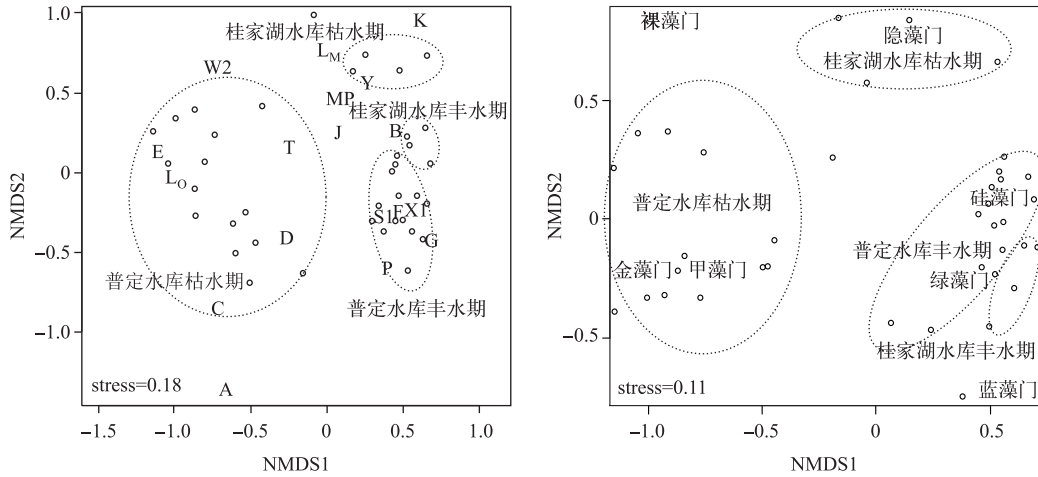


图3 普定水库和桂家湖水库浮游植物功能群和浮游植物群落 NMSD 分析图 (分析数据来自所有分层样点)
 Fig.3 Results of NMSD analysis of different phytoplankton functional groups and different phytoplankton community in Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir (Analyses are based on all values of all the sampling sites)

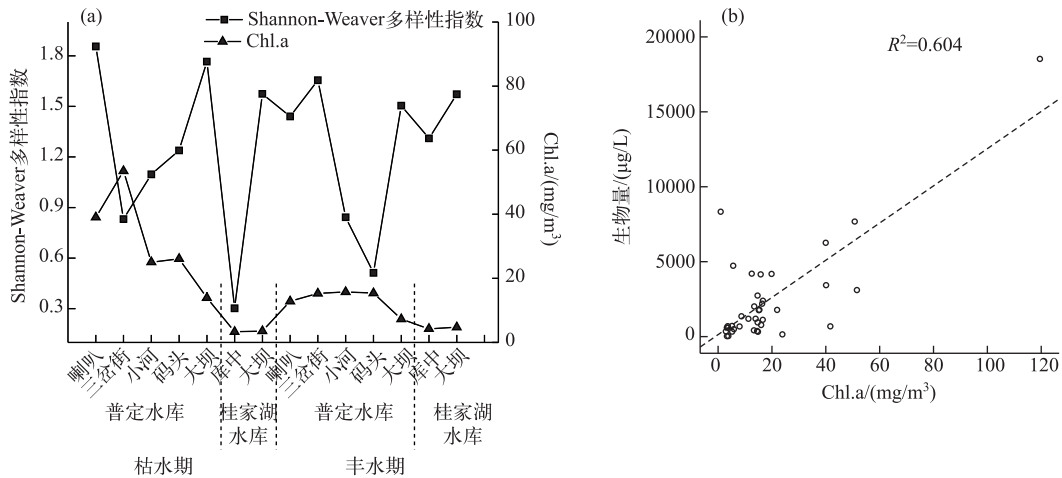


图4 普定水库和桂家湖水库 Shannon-Weaver 多样性指数和叶绿素 a 浓度均值变化趋势图 (a), 叶绿素 a 浓度与生物量相关分析图 (b)

Fig.4 Seasonal changes of Shannon-Weaver diversity index and chlorophyll-a concentration at different sampling sites(a), correlation between chlorophyll-a concentration and phytoplankton biomass in Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir (Analyses are based on all values of all the sampling sites)

Z_{eu} ($P=0.014, P<0.05$)、 DIN ($P=0.022, P<0.05$)、 $RWCS$ ($P=0.006, P<0.05$)、 $Z_{eu}:Z_{mix}$ ($P=0.032, P<0.05$) 和 EC ($P=0.022, P<0.05$) 是具有显著解释性的环境变量 (图 5)。影响并不显著 ($P>0.05$) 的环境变量去除。结果显示,轴一和轴二的特征值分别为 0.831 和 0.017,说明轴一、二就可以解释绝大部分的浮游植物分布状况。 EC 、 pH 、 Z_{mix} 与轴一均呈正相关,相关系数分别为 0.653、0.825 和 0.726, DIN 、 WT 、 SD 、 Z_{eu} 、 $RWCS$ 以及 $Z_{eu}:Z_{mix}$ 与轴一均呈负相关,相关系数分别为 -0.694、-0.744、-0.701、-0.701、-0.673 和 -0.673。

将桂家湖水库 2 个水情期浮游植物优势功能群生物量数据 (分层数据平均值) 进行 DCA 分析,长度梯度小于 3,故选择线性模型。对同样的 13 个环境因子和浮游植物功能群数据采用蒙特卡洛拟合方法进行检验,

通过筛选,仅有 WT($P=0.018, P<0.05$)和 RWCS($P=0.018, P<0.05$)具有显著解释性(图 5). 结果显示,轴一和轴二的特征值分别为 0.737、0.155,说明轴一、二可以解释绝大部分的浮游植物分布状况. WT 和 RWCS 均与轴一呈负相关,相关系数分别为-0.985 和-0.991.

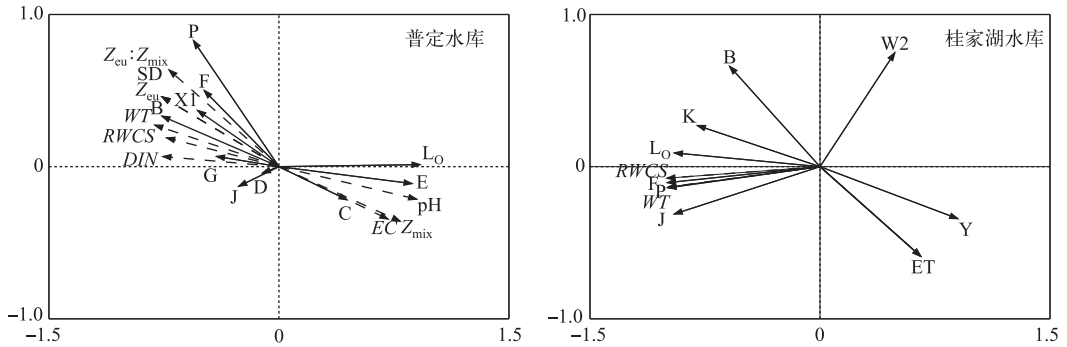


图 5 普定水库和桂家湖水库浮游植物优势功能群与环境因子的 RDA 分析

Fig.5 Redundancy analysis of phytoplankton functional groups related to environmental factors of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir

2.4.2 Pearson 相关性分析 根据 Pearson 相关性分析,可知 2 座水库浮游植物优势功能群与非生物变量的相关关系,包括水温、光照、营养盐以及水动力学参数等(表 4). 普定水库功能群 B 与无机氮、WT、SD、 Z_{eu} 、

表 4 普定水库和桂家湖水库浮游植物优势功能群与环境因子的 Pearson 相关关系

Tab.4 Pearson correlations between different phytoplankton groups and environmental factors in Puding Reservoirs and Guijiahu Reservoir

	TP	PO ₄ ³⁻ -P	TN	DIN	WT	EC	pH	SD	Z _{eu}	Z _{mix}	Z _{eu} :Z _{mix}	RWCS
普定水库												
B	-0.486	0.250	0.244	0.760 *	0.881 **	-0.767 **	-0.862 **	0.784 **	0.784 **	-0.858 **	0.857 **	0.829 **
C	0.275	-0.121	-0.803 **	-0.612	-0.691 *	0.776 **	0.675 *	-0.628	-0.628	0.648 *	-0.605	-0.684 *
D	-0.648 *	-0.116	0.284	0.456	0.230	-0.391	-0.176	0.168	0.168	-0.176	0.151	0.398
E	0.471	-0.548	-0.003	-0.782 **	-0.835 **	0.749 *	0.921 **	-0.790 **	-0.790 **	0.841 **	-0.741 *	-0.776 **
F	0.123	-0.026	0.160	0.405	0.609	-0.632	-0.574	0.846 **	0.846 **	-0.380	0.576	0.349
G	0.056	0.505	0.133	0.282	0.548	-0.469	-0.523	0.527	0.527	-0.356	0.319	0.374
J	-0.663 *	0.060	0.271	0.591	0.352	-0.486	-0.341	0.270	0.270	-0.314	0.222	0.512
L ₀	0.528	-0.427	0.175	-0.692 *	-0.739 *	0.648 *	0.821 **	-0.694 *	-0.694 *	0.720 *	-0.650 *	-0.669 *
P	-0.375	0.171	-0.093	0.461	0.669 *	-0.676 *	-0.672 *	0.801 **	0.801 **	-0.731 *	0.921 **	0.556
X1	0.197	-0.070	0.146	0.415	0.610	-0.568	-0.567	0.811 **	0.811 **	-0.347	0.523	0.334
桂家湖水库												
B	-0.340	-0.319	0.255	0.311	0.304	-0.211	0.091	-0.105	-0.105	-0.377	0.480	0.353
E	0.603	0.319	-0.536	-0.582	-0.571	0.487	0.204	0.365	0.365	0.633	-0.552	-0.610
F	-0.980 *	-0.567	0.962 *	0.971 *	0.984 *	-0.981 *	-0.904	-0.974 *	-0.974 *	-0.984 *	0.044	0.989 *
J	-0.954 *	-0.111	0.976 *	0.968 *	0.951 *	-0.944	-0.881	-0.848	-0.848	-0.943	0.424	0.938
K	-0.612	-0.964 *	0.549	0.576	0.626	-0.632	-0.580	-0.758	-0.758	-0.633	-0.523	0.651
L ₀	-0.671	-0.942	0.612	0.637	0.684	-0.689	-0.633	-0.802	-0.802	-0.690	-0.471	0.707
P	-0.999 **	-0.395	0.996 **	0.999 **	1.000 **	-0.994 **	-0.917	-0.948	-0.948	-0.997 **	0.211	0.998 **
T	0.603	0.319	-0.536	-0.582	-0.571	0.487	0.204	0.365	0.365	0.633	-0.552	-0.610
W2	0.551	0.141	-0.614	-0.572	-0.583	0.660	0.855	0.730	0.730	0.519	0.312	-0.543
Y	0.746	0.377	-0.687	-0.727	-0.719	0.647	0.390	0.536	0.536	0.771	-0.502	-0.752

* 表示 $P<0.05$, 显著相关; ** 表示 $P<0.01$, 极显著相关.

$Z_{eu}:Z_{mix}$ 、 $RWCS$ 显著正相关,与 EC 、 pH 、 Z_{mix} 均呈显著负相关;功能群 E 相反,与无机氮、 WT 、 SD 、 Z_{eu} 、 $Z_{eu}:Z_{mix}$ 、 $RWCS$ 均呈显著负相关,与 EC 、 pH 、 Z_{mix} 均呈显著正相关;功能群 L_0 与无机氮、 WT 、 SD 、 Z_{eu} 、 $Z_{eu}:Z_{mix}$ 、 $RWCS$ 均呈显著负相关,与 EC 、 pH 、 Z_{mix} 均呈显著正相关;功能群 P 与无机盐不存在显著相关关系,它与 WT 、 SD 、 Z_{eu} 、 $Z_{eu}:Z_{mix}$ 均呈显著正相关,与 EC 、 pH 、 Z_{mix} 均呈显著负相关. 由 Pearson 相关分析得出,普定水库功能群 P 和 B 与环境因子的相关关系类似, L_0 和 E 与环境因子的相关关系类似,这也从侧面印证了 P/B 与 L_0 /E 分别属于两个不同水情期的优势功能群. 桂家湖水库 B/Y/ L_0 功能群与环境因子均无显著相关性,功能群 J 与 TN 、无机氮和水温均呈显著正相关,与 TP 均呈显著负相关.

3 讨论

3.1 2 座水库水环境因子的对比分析

2 座水库无机氮自枯水期至丰水期增加明显. 由于贵州地处喀斯特岩溶地貌,随着丰水期降水量的增加地表侵蚀大量含氮有机质流入水体. 伴随丰水期表层温度升高,水库水体出现垂直分层对流现象,使得底泥中含氮化合物释放至水体,从而丰水期无机氮显著增加. 由于普定水库和桂家湖水库 TN 、 TP 浓度已超出了国际公认富营养化的阈值标准 ($TN = 0.2 \text{ mg/L}$, $TP = 0.02 \text{ mg/L}$),因此氮、磷不再是影响植物生长的限制因子. 经调查研究,普定水库分别发生了甲藻水华和硅藻水华,桂家湖水库无水华现象. 对比 2 座水库水环境,营养盐无显著差异,流域面积、深度及水动力学参数存在显著性差异. 已有研究表明湖泊大小会通过影响水体形态和化学性质进而影响到浮游植物功能群的变化^[9],而普定水库的流域面积以及深度均远大于桂家湖水库,水库的大小是否会影响到浮游植物的变化需要进一步的研究. 普定水库 SD 、 Z_{eu} 、光的可获得性及 $RWCS$ 均远低于桂家湖水库,故桂家湖水库扰动小. 且桂家湖水库多样性指数高于出现水华现象的普定水库三岔街及小河样点,可知该水库群落结构复杂,生态系统内外稳定性较高,对环境变化适应性较强,不易发生水华.

3.2 2 座水库浮游植物群落结构时空分布特征及与水环境因子的关系

RDA 分析表明,普定水库出水动力参数 (WT 、 Z_{mix} 、 SD 、 Z_{eu} 、 $RWCS$ 、光的可获得性)、营养盐、 pH 和 EC 是影响浮游植物分布的主要环境因子;桂家湖水库中水体动力学参数 (水温和 $RWCS$) 是主要环境因子,营养盐不是.

普定水库优势功能群自枯水期至丰水期分布特征: $L_0 \rightarrow P+B$,以 L_0 (甲藻) 为绝对优势转向以 P (硅藻) 为绝对优势. 由 Pearson 相关性分析表明,功能群 L_0 与无机氮及水动力学参数均呈显著负相关,与 EC 、 pH 、 Z_{mix} 均呈显著正相关. 普定水库自枯水期至丰水期无机氮显著增加,优势功能群由 L_0 转为 P/B. 同时 P/B 适宜生存在营养盐较高的水体中,而 L_0 在贫到中营养水体中报道较多^[42]. 本文中普定水库虽氮、磷营养盐较高但无机氮枯水期远低于丰水期,经分析 L_0 与无机氮显著负相关,故在无机氮偏低的枯水期大量繁殖. 普定水库枯水期水温稳定在 10°C ,丰水期水温则稳定在 24°C . 甲藻虽为广温性藻类 ($10 \sim 28^\circ\text{C}$),但最适宜生长的温度在 13°C 左右. 且甲藻具有鞭毛结构,能够游动利用周围的营养,在低温条件下极易占优势^[23]. 所以相比较而言,枯水期水温更适宜甲藻繁殖^[24]. 而垂直方向上,几乎每一层枯水期 L_0 生物量占比都达到 90%,在三岔街的表层水体生物量达到峰值,丰水期表层水体藻类生物量波动较小,小河和码头样点的中层以及底层水体功能群 P 占绝对优势,并在小河样点藻类生物量达到峰值. 据报道,浮游植物功能群在垂直方向上的变化与光照、水体分层以及牧食压力有关^[25]. 当 $Z_{eu}:Z_{mix} < 1$,光照属于限制因子. 普定水库枯水期透明度低导致真光层深度低,而甲藻具有趋光性,因此在表层水体中甲藻大量聚集,中层和底层藻类生物量远低于表层. 研究表明,在充足的营养盐、适宜的光照以及特定的水流条件下,藻类聚集大量繁殖形成水华^[26]. 甲藻的垂直迁移特性^[27]使它能够在水体中上下迁移以选择适宜的水体环境生长,由此甲藻在枯水期获得比其他藻类例如蓝藻更强的生存能力,白天聚集在表层水体,获得光照、营养盐等,夜晚远离表层,避免受到低温的伤害并躲避牧食压力. Wang 等^[28]和 Kunihiko 等^[29]研究表明,水体分层形成的稳定水体是某些甲藻在水体表层增殖的主要原因. 由于随着水体分层的加强,甲藻在向下迁移的过程中受到温跃层的干扰从而影响迁移,所以甲藻适宜在弱分层水体中大量繁殖. 本文普定水库枯水期 $RWCS$ 值小,水体处于混合状态 (Z_{mix} 均值为 25.6 m). 三岔街样点处于普定水库中间地带,面积最广,既不是入水口也不是出水口,水流缓慢,水体扰动

较其他采样点较小,这种水文特性利于甲藻聚集发生水华. 普定水库枯水期表层水体的生物量要高于丰水期,这与林秋奇等^[30]对广州流溪河水库枯水期和丰水期浮游植物调查结果相同. 丰水期普定水库优势功能群为 P/B,功能群 P 主要由硅藻组成,适宜生长在 2~3 m 的热分层混合且营养水平较高的水体中^[7],本次研究功能群 P 在中层和底层水体丰度远高于表层水体(小河及码头采样点). 根据 Pearson 相关性分析,功能群 P 与无机盐不存在显著相关关系,与水动力学参数均呈显著正相关(水温、透明度、 $Z_{\text{混}}$ 和光的可获得性). 普定水库丰水期水体稳定出现分层. 从三岔街流向小河的河道逐渐变窄并在小河发生分流,此处水力滞留时间短,水体扰动较其他样点强烈,故耐冲刷的功能群 P 在这里形成优势. 同时功能群 P 的硅藻适宜生活在低光且碳缺乏的富营养化变温层中,对缺硅、成层现象敏感^[7],故功能群 P 在中层和底层水体中获得绝对优势. 水体 pH 的升高则表明碳源的减少,会影响浮游植物对碳的利用,不利于对 pH 变化敏感的藻类生长,耐受 pH 值的藻类将发挥其竞争优势,成为优势类群^[31]. 功能群 P 虽耐受碳缺乏的水体,但本文中它在 pH 值偏低的丰水期中占据绝对优势,说明耐受 pH 值有一定的范围,超出这个范围以外,P 类群不再具有竞争优势. 同时研究表明,电导率的变化会导致浮游植物多样性的变化,高的电导率说明营养盐浓度高^[32],自枯水期至丰水期普定水库电导率有所下降,对应丰水期氮营养盐浓度高于枯水期,磷营养盐浓度略低于枯水期,磷浓度影响了水体营养盐的变化. 叶绿素 a 浓度与多样性指数分析也为普定水库枯水期发生甲藻水华,丰水期发生硅藻水华提供理论依据,多样性指数的改变是由生态进程例如竞争、捕食和演替控制^[33],水华期间多样性指数降低,群落结构趋于单一. 同时研究发现,甲藻水华和硅藻水华具有一定联系,2 种水华常常相伴而生^[34],目前还需通过探索硅藻和甲藻之间相互作用机理来进一步研究水华种间关系.

桂家湖水库优势功能群自枯水期至丰水期分布特征: B+J+Y→B+J. 垂直方向上,该水库水位较浅,表层和底层水体变化趋势类似,差别较小. 该水库功能群演替特征不明显,原因可能是外界干扰小,水体稳定. RDA 分析表明,影响桂家湖水库浮游植物群落结构分布的不再是营养盐,而是水动力学参数(水温和 RWCS). 一直以来大量研究表明水温是影响藻类生长的重要环境因子^[1,35],这与本研究结论一致. 功能群 B 以小细胞个体的小环藻为主,繁殖速度快,耐受低营养环境,对分层敏感,适宜生存在中营养的中小型浅水水体中^[6-7],与 RDA 中功能群 B 与 RWCS 呈正相关一致. 以绿藻组成的功能群 J 适宜生存在富营养的浅水水体,与氮营养盐呈显著正相关,与磷呈显著负相关,氮自枯水期至丰水期递减,磷也递减,促进了 J 类群的生长. 该水库主要以小环藻组成的功能群 B 占绝对优势,季节演替不明显,水库流域面积小,垂直变化差异小. 董静等^[36]研究东江水系得出,硅藻易在冬季和早春形成优势,而蓝藻和绿藻易在夏季和初秋生长,这与本研究结果不符,本文普定水库枯水期甲藻形成了绝对优势,同时硅藻在桂家湖水库一直占据优势地位.

普定水库与桂家湖水库优势功能群存在显著性差异,普定水库自枯水期至丰水期优势功能群由 L_0 演替为 P/B,而桂家湖水库则演替不明显,以功能群 B/J 为主. 2 座水库分别隶属于长江流域和珠江流域,藻种来源不同,导致群落结构存在差异. 两座水库营养盐无显著性差异,流域面积、深度及水动力学参数均存在显著性差异. 藻种来源的不同以及水环境参数的显著差异共同造成普定水库与桂家湖水库浮游植物功能群的显著性差异. 国内外水库中以蓝藻为主的 S1 为优势功能群的现象普遍存在^[37-39],而普定水库与桂家湖水库均不以 S1 为优势功能群,在湖北省丹江口水库^[40]及法国南部的卡佐河^[41]曾出现 L_0 为优势功能群. 蓝藻在 2 座水库均不占据优势,具体原因有待进一步研究.

3.3 浮游植物功能群对水环境的指示作用

从浮游植物功能群适宜生境来看^[42],桂家湖水库主要优势功能群 B/J/Y. B 代表性藻类为硅藻门的小环藻,对分层较敏感,适宜中营养浅水水体. 功能类群 J 由绿藻门的栅藻、盘星藻等构成,适宜混合浅水的、高富营养水体. 功能群 Y 喜静水水体. 可知该水库人为干扰小,由功能群判断该水库属于中营养到富营养水体. 功能群 B/J/Y 均适宜浅水水体,桂家湖水库正是一个水域面积较小的水库,库容量小(1060 万 m^3)且水位较浅. 枯水期大坝样点 B 为绝对优势功能群,该处水体为中营养水体,库中多了功能群 J/Y,该点水体接近富营养水体. 丰水期 B/J 功能群遍布整个水体,水体环境呈中到富营养状况. 普定水库 2 个水情期功能类群变化较大,枯水期功能群 L_0 作为常见优势功能群分布在水体中. 已知功能类群 L_0 主要由甲藻构成,适宜的生境从贫营养到富营养,从深水到浅水,生境范围较广^[42]. 在枯水期广布的还有功能类群 E,它适宜贫营养的小型水体. 由于 E 生物量占比过小,故而不影响功能群对水环境的指示. 由环境因子分析,我们已知普

定水库枯水期水体中氮、磷浓度很高(TN:3.099~4.232 mg/L, TP:0.034~0.059 mg/L), 枯水期普定水库应属于富营养水体; 丰水期普定水库的主要优势功能群为 B/P, 功能群 P 适宜于分层的富营养水体, 这一时期水体发生了硅藻水华, 水体呈中到富营养. 由以上分析可知桂家湖水库富营养程度与普定水库相比较低, 为中到富营养水体, 普定水库自枯水期至丰水期均属于富营养水体.

4 结论

1) 两座水库营养盐无显著性差异, 水动力学参数(WT、 Z_{mix} 、SD、 Z_{eu} 、RWCS、光的可获得性)存在显著性差异.

2) 根据 Reynolds 和 Padisák 等提出的浮游植物功能群分类方法, 对普定水库枯水期和丰水期进行分类, 共分出 18 个功能类群. 自枯水期至丰水期存在明显的季节演替: 枯水期 $L_0 \rightarrow$ 丰水期 P+B. 枯水期几乎每个采样点每一层绝对优势功能群均是 L_0 , E 作为次级优势功能群但其生物量与 L_0 相比较低, 在三岔街样点表层以甲藻为主的藻类生物量达到峰值(18529 $\mu\text{g/L}$), 这与该点水文特性以及甲藻特征有关; 丰水期以脆杆藻组成的功能群 P 在小河样点的中层生物量最高(2741 $\mu\text{g/L}$), 这与 P 类群耐受低光有关. 桂家湖水库共归类出 15 个功能类群. 桂家湖水库优势功能群自枯水期至丰水期分布特征: B+J+Y \rightarrow B+J, 该水库枯水期和丰水期功能群变化较小.

3) RDA 分析表明, 普定水库出水动力学参数(WT、 Z_{mix} 、SD、 Z_{eu} 、RWCS、光的可获得性)、营养盐、pH 和 EC 是影响浮游植物分布的主要环境因子. 桂家湖水库仅水动力学参数(水温和 RWCS)是主要环境因子.

4) 从浮游植物功能群适宜生境来看, 普定水库为富营养型水库, 桂家湖水库是中到富营养型水库, 桂家湖水库水质优于普定水库.

5 参考文献

- [1] Reynolds CS ed. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [2] Lu BL, Yan PC, Tian XH *et al.* Characteristics of algal facies of planktonic algae in Lake Honghu and its response to habitat. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(3): 680-689. [卢碧林, 严平川, 田小海等. 洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应. 生态学报, 2012, **32**(3): 680-689.]
- [3] Tan X, Xia XL, Cheng XL *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir. *Environmental Science*, 2011, **10**: 2875-2882. [谭香, 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, **10**: 2875-2882.]
- [4] Costa LS, Huszar VLM, Ovalle AR. Phytoplankton functional groups in a tropical estuary: Hydrological control and nutrient limitation. *Estuaries and Coasts*, 2009, **32**: 508-521.
- [5] Reynolds CS ed. Vegetation processes in the pelagic: A model for ecosystem theor. Oldendorf/Luhe, Germany: Ecology Institute, 1997.
- [6] 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.
- [7] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical view with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-9.
- [8] Maria C, Anne ML, Maria L *et al.* Phytoplankton functional response to spatial and temporal differences in a cold and oligotrophic lake. *Hydrobiologia*, 2016, **764**: 199-209.
- [9] Gábor B, Béla T, Gábor V *et al.* Functional phytoplankton distribution in hypertrophic systems across water body size. *Hydrobiologia*, 2016, **764**: 81-90.
- [10] Dong J, Li GB, Song LR. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi 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] Wu AQ, Guo N, Qin XB. Seasonal variation of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in a typical cold regions wetland. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **35**(5): 1341-1349. [武安泉, 郭宁, 覃雪波. 寒区典型湿地浮游植物功能群季节变化及其与环境因子关系. 环境科学学报, **35**(5): 1341-1349.]

- [12] Zhang M, Deng DG, Huang D *et al.* Functional group diversity of planktonic diatoms and the driving pattern of water-period guild succession in Ganjiang River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(5): 680-691. [张萌, 邓道贵, 黄丹等. 赣江流域浮游硅藻功能群多样性及其水期演替的驱动特征. 环境科学研究, 2016, **29**(5): 680-691.]
- [13] Yi QT, Chen QW, Zhao DH *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the artificial lakes created by mining subsidence in Huainan coal mine areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(15): 4843-4854. [易齐涛, 陈求稳, 赵德慧等. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子. 生态学报, 2016, **36**(15): 4843-4854.]
- [14] 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.]
- [15] Li L, Li QH, Jiao SL *et al.* Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan Reservoir. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4436-4443. [李磊, 李秋华, 焦树林等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应. 环境科学, 2015, **36**(12): 4436-4443.]
- [16] Hu HJ, Wei YX eds. Chinese freshwater algae—system, classification 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.]
- [17] Lin SJ, He LJ, Huang PS *et al.* Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in the phytoplankton. *Ecological 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.]
- [18] Cole GA ed. Text book of limnology. Illinois: Waveland Pressinc, 1994.
- [19] Jensen JP, Jeppesen E, Olrik K *et al.* Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish Lakes. *Can J Fish Aquat Sci*, 1994, **51**(8): 1692-1699.
- [20] Padisák J, Barbosa FAR, Koschel R *et al.* Deep layer cyanoprokaryota maxima are constitutional festures of lakes; examples from temperate and tropical regions. *Arch Hydrobiol Spec Issues Advanc Limnol*, 2003, **58**: 175-199.
- [21] Luding JA, Reynolds JF. Statistical ecology: A primer on methods and computing. New York: John Wiley and Sons, 1988.
- [22] Rott E, Salmaso N, Hoehn E. Quality control of Utermohl based phytoplankton biovolume estimates e an easy task or a Gordianknot? *Hydrobiologia*, 2007, **578**: 141-146.
- [23] Huszar V, Kruk C, Caraco N. Steady-state assemblages of phytoplankton in temperate lakes (NE U.S.A.). *Hydrobiologia*, 2003, **502**: 97-109.
- [24] Zhu AM, Li SX, Hu J *et al.* The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(11): 3071-3080. [朱爱民, 李嗣新, 胡俊等. 三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制. 生态学报, 2014, **34**(11): 3071-3080.]
- [25] Becker V, Huszar VLM, Crossetti LO. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia*, 2009, **628**(1): 137-151.
- [26] Fu G. Study of the hydrodynamic probability parameters on eutrophication sensitivity classification of lake and reservoirs. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **18**(6): 80-84. [富国. 湖库富营养化敏感分级水动力概率参数研究. 环境科学研究, 2015, **18**(6): 80-84.]
- [27] Yang ZJ, Liu DF, Yi ZQ *et al.* Diurnal vertical migration of peridiniopsis in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Research of Environmental Science*, 2010, **23**(1): 26-32. [杨正健, 刘德富, 易仲强等. 三峡水库香溪河库拟多甲藻的昼夜迁移特性. 环境科学研究, 2010, **23**(1): 26-32.]
- [28] Wang L, Cai QH, Xu YY *et al.* Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(1): 197-212.
- [29] Kunihiko A, Masataka W, Kunio K *et al.* Conditions necessary for *Chattonella antiqua* red tides outbreaks. *Limnology and Oceanography*, 2011, **43**(1): 117-128.
- [30] Lin QQ, Hu R, Han BP. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2278-2285. [林秋奇, 胡韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响. 生态学报, 2003, **23**(11): 2278-2285.]
- [31] 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. *Chin J Appl Environ Biol*, 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.]
- [32] Lu ZJ, Yang J, Du GS *et al.* Relationship between environmental variables and succession in phytoplankton functional groups in the Guanting Reservoir. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 74-81. [陆晓江, 杨劼, 杜桂森等. 官厅水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子. 中国环境监测, 2016, **32**(3): 74-81.]
- [33] Sabanci FC. Phytoplankton distribution and its relationship to the physico-chemical environment in a Coastal Lagoon. *Ekoloji*, 2014, **23**(90): 61-72.
- [34] Tang HB, Hu S, Hu ZY *et al.* Relationship between *Peridiniopsis* sp. and environmental factors in Lake Donghu, Wuhan. *J Lake Sci*, 2007, **19**(6): 632-636. DOI:10.18307/2007.0602. [汤洪波, 胡圣, 胡征宇等. 武汉东湖甲藻水华与环境因子的关系. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 632-636.]
- [35] Koch RW, Guelda DL, Bukaveckas PA. Phytoplankton growth in the Ohio, Cumberland and Tennessee Rivers, USA: inter-site difference in light and nutrient limitation. *Aquatic Ecology*, 2004, **38**: 17-26.
- [36] Dong J, Li YH, Li GB *et al.* Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 837-843. [董静, 李艳晖, 李根保等. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因素. 水生生物学报, 2013, **37**(5): 837-843.]
- [37] Soylu EN, Gönülol A. Functional classification and composition of phytoplankton in Liman Lake. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2010, **10**(1): 53-60.
- [38] Borics G, Tóthmérész B, Lukács BA *et al.* Functional groups of phytoplankton shaping diversity of shallow lake ecosystems. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 251-262.
- [39] Zhang T, Li L, Song LR *et al.* Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(6): 2971-2979. [张婷, 李林, 宋立荣. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化. 生态学报, 2009, **29**(6): 2971-2979.]
- [40] Shen HL, Li B, Cai QH *et al.* Phytoplankton functional groups in a high spatial heterogeneity subtropical reservoir in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**: 859-869.
- [41] Cellamare M, Pinto PD *et al.* Using functional approaches to study phytoplankton communities in a temperate region exposed to tropical species dispersal. *Hydrobiologia*, 2013, **702**(1): 267-282.
- [42] 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.]