

FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较：以贵州三座水库为例

陈倩^{1,2} 李秋华^{1,2*} 马欣洋^{1,2} 熊梅君^{1,2} 何应^{1,2} 韩孟书²

(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)

【摘要】浮游植物分类是揭示浮游植物群落演替规律和开展水生态调查工作的基础。为了比较 FG、MFG 和 MBFG 功能群分类方法之间的差异, 运用功能群分类和冗余分析(RDA)等方法, 于 2017 年 4 月(平水期)和 2017 年 8 月(丰水期)对浮游植物群落结构和水环境理化指标进行采样分析, 结果表明:①MFG 功能群与 FG 功能群具有重叠部分, 而 MBFG 功能群与 FG 和 MFG 相比差异较大。②FG 功能群考虑了浮游植物的生理、生态学等特征, 能更好地解释与环境的相关性, 并且更准确反映环境因子与浮游植物生态位之间的关系。同时可以根据浮游植物优势功能群预测水库环境因子及富营养化状态, 但是 FG 功能群需要具备系统的浮游植物鉴定知识, 工作量大。MFG 功能群分类方法简单易懂, 能够较好的解释浮游植物与环境因子的关系, 但功能群与环境因子联系较弱。MBFG 功能群分类方法最为简单、高效, 但是 MBFG 功能群对环境的解释度不够, 分类依据过于简单, 分组太少。③3 个分类方法各有优缺点, 根据研究目的不同以及实际需要选择合适的分类方法。

【关键词】浮游植物;功能群(FG、MFG 和 MBFG);红枫水库;百花水库;阿哈水库

【中图分类号】 X171 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 0250-3301(2019)09-4061-11¹

DOI:10. 13227/j. hjkx. 201901192

Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG: Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau

CHEN Qian^{1,2}, LI Qiu-hua^{1,2*}, MA Xin-yang^{1,2}, XIONG Mei-jun^{1,2}, HE Ying^{1,2}, HAN Meng-shu²

¹ 收稿日期: 2019-01-23; 修订日期: 2019-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41563012, U1612442); 贵州省科技厅项目(黔科合支撑[2017]2863, 黔科合平台人才[2018]5805); 贵州省教育厅项目(黔教合 KY 字[2017]032); 贵阳市科技局项目(筑科合同[2018]11-7 号)

作者简介: 陈倩(1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学, E-mail: cq19931229@126.com

* 通信作者, E-mail: qiuhua2002@126.com

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. International Joint Research Centre for Aquatic Ecology, Guiyang 550001, China)

【Abstract】 Phytoplankton classification is the foundation for revealing the succession rules of phytoplankton communities and for conducting water ecology investigation. At present, the classification methods of functional group (FG), morpho-functional group (MFG), and morphology-based functional group (MBFG) are widely used, although great differences occur among the classification methods of different FGs. In order to compare the differences among FG, MFG and MBFG classification methods, FG classification and redundant analysis (RDA) were used to sample and analyze the phytoplankton community structures and the physical and chemical indicators of water environment in April 2017 (normal seasons) and August 2017 (wet seasons). The following results were noted. ① The MFG and FG had overlapping parts, whereas the MBFG was differed significantly from FG and MFG. ② The FG considers the physiological and ecological characteristics of phytoplankton, which can better explain the correlation with the environment and can accurately reflect the relationship between environmental factors and the phytoplankton niche. Moreover, the environmental factors and eutrophication status of the reservoir can be predicted according to the dominant FGs of phytoplankton; however, the FG needs to have systematic knowledge of phytoplankton identification and a large workload. The MFG classification method is simple and easily understood, which can better explain the relationship between phytoplankton and environmental factors; however, it is weakly connected with environmental factors. The MBFG classification method is the simplest and most efficient, although its interpretation degree to the environment is not sufficient. ③ Each of the three classification methods has advantages and disadvantages; therefore, appropriate classification methods are selected according to different research purposes and their actual needs.

【Key words】 phytoplankton; functional groups (FG, MFG, and MBFG); Hongfeng Reservoir; Baihua Reservoir; Aha Reservoir

浮游植物作为生态系统主要的初级生产者, 在水生态系统中重要的作用, 其群落结构和物种变化能够直接而灵敏地反映水环境的动态变化 [1]. 浮游植物群落结构的种类组成、数量分布和物种多样性等是评价水库生态系统十分重要的指标, 可以反映水体污染状况 [2]. 研究水生态系统中浮游植物群落结构是了解水生生态系统的基础, 而浮游植物功能群的分类方法是理解浮游植物功能群的重要工具 [3]. 传统的林氏分类法和分子鉴定法都是根据物种同源性特点形成的、反映不同生物间的进化关系, 没有考虑浮游植物的生态学功能 [4]. 2002 年 Reynolds 等 [5] 提出浮游植物功能群理论, 将浮游植物划分为 31 个不同的功能群 (functional group, FG); 2003 年 Weithoff [6] 依据浮游植物的形态和功能特征, 提出了植物功能群 (plant functional types, PFT) 的概念; 2007 年 Salmaso 等 [7] 结合 FG 功能群和 PFT 功能群的优点, 提出了 MFG (morpho-functional group) 功能群划分法, 将浮游植物划分为 31 个 MFG 类群; 2009 年和 2012 年 Padisák [8] 和 Tolotti 等 [9] 分别对这两种方法进行了修正和补充; 2010 年 Kruk 等 [10] 主要根据形态 (生理和功能) 特征参数, 提出 MBFG (morphology-based functional group) 划分法, 将所有浮游植物划分为 7 个功能类群, 使得功能群的应用大为简化.

近年来已将 MBFG、FG 和 MFG 功能群分类作为水质管理的一个重要工具 [11], FG 功能群已经广泛地应用在世界各地的湖泊, 但大多数集中在 FG 功能群分类上 [12, 13], 许多学者对水库 [14, 15] 和湖泊 [16, 17] 进行了研究, 表明环境变量对浮游植物群落结构有重要的影响. 有研究表明浮游植物群落结构的相似性随着距离的衰减, 趋向于增加 [18]. 而红枫水库、百花水库和阿哈水库属于深水型水库, 又位于云贵高原, 具有海拔高、太阳辐射强度大、水面宽、水深大、流速缓等特征, 并且由于水体流速缓慢, 上游入库水体携带的营养物质会在库区富集, 容易造成水体富营养化, 进而导致藻类的季节性高发 [19]. 并且红枫水库、百花水库和阿哈水库作为贵阳市的三大重要饮用水源地 [20], 探究高原水库的功能群分类具有重要意义. 比较 FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群分类方法的不同以及浮游植物功能群的差异性, 验证 3 种分类方法中生物对环境变化方面的有效性, 以为高原水库浮游植物功能群的选择提供一定的理论基础.

1 材料与amp;方法

1.1 水库概况及采样点设置

红枫水库(26°26'~26°35'N, 106°19'~106°28'E)位于贵阳市清镇市,属于亚热带湿润型季风气候,流域面积 1596km²,最大水深约 45m,平均水深约 10.52m,总蓄水量 6.01×10⁹m³. 百花水库(26°35'~26°41'N, 106°27'~106°32'E)位于贵阳市西北部,属于亚热带湿润型季风气候,流域面积 1895km²,最大水深约 36m,平均水深约 12.55m,总蓄水量 1.82×10⁹m³. 阿哈水库(106°39'E, 26°33'N)位于贵阳市南郊,属于亚热带湿润型季风气候,年平均气温 15.3℃,流域面积 190km²,最大水深约 25m,平均水深约 13m,总蓄水量 5.42×10⁸m³.

根据采样点设置规范以及水库生态特点于 2017 年的 4 月(平水期)和 8 月(丰水期)自上游到下游选取 14 个采样点,其位置详见图 1. 红枫水库,三岔河(26°27'0"N、106°23'12"E)、将军湾(26°28'43"N、106°24'54"E)、后午(26°30'20"N、106°25'5"E)、花渔洞(26°31'47"N、106°25'50"E)、腰洞(26°32'10"N、106°23'15"E)和大坝(26°32'55"N、106°25'19"E);百花水库,岩脚寨(26°38'22"N、106°30'42"E)、观音山(26°39'21"N、106°31'36"E)、码头(26°39'17"N、106°32'1"E)和大坝(26°41'12"N、106°32'28"E);阿哈水库,大荒坡(26°31'57"N、106°38'7"E)、中曹司(26°32'15"N、106°38'55"E)、南郊(26°32'36"N、106°39'8"E)和金钟河(26°32'2"N、106°39'7"E).

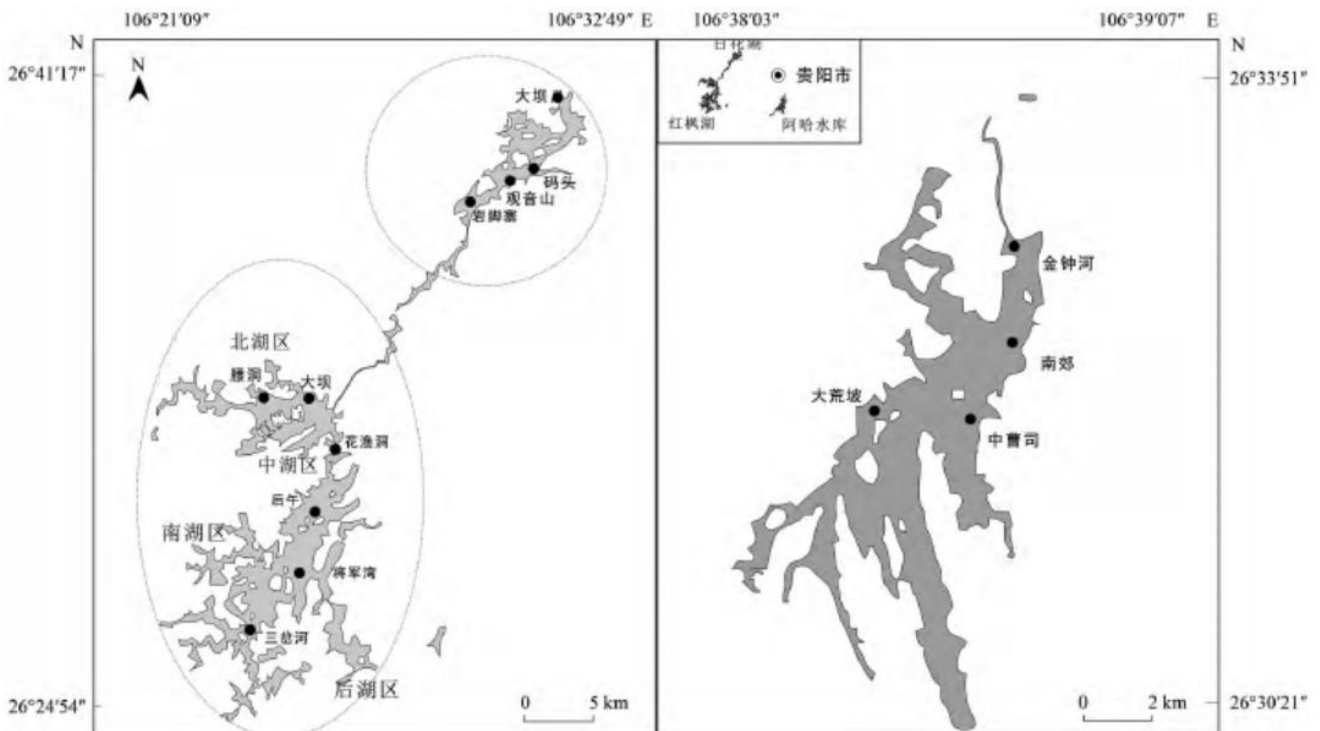


图 1 红枫水库、百花水库和阿哈水库样点设置示意

Fig. 1 Sampling sites in Hongfeng Reservoir, Baihu Reservoir, and Aha Reservoir

1.2 样品采集与分析

浮游植物定性样品:采用 25 号浮游生物网在水库中呈“∞”缓慢拖网 3min 进行采集,立刻加入 3%~5%的鲁哥溶液固定. 浮游植物定量样品:用采水器在各水层取 1.5L 水,立刻加入鲁哥溶液固定,带回实验室静置沉淀 24h 后,用虹吸法吸取上清液,浓缩至 30mL,用显微镜镜检 [21]. 根据 2002 年 Reynolds 等 [5] 提出浮游植物 FG 功能群,2007 年 Salmaso 等 [7] 提出的 MFG 功能群,2010 年 Kruk 等 [10] 提出 MBFG 功能群,将所有浮游植物划分为不同的功能类群.

水温(water temperture, WT)、溶解氧(dissolve doxygen, DO)、电导率(electrical conductance, EC)和 pH 值等用多功能水质参数仪现场测定, 透明度(secchi disk, SD)用赛氏盘现场测定, 化学指标:总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、可溶性无机氮(dissolve din organic nitrogen, DIN)、正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)、高锰酸盐指数和氮磷比(N:P), 参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)分析方法进行测定. 浮游植物叶绿素 a(Chla)采用 0.45 μ m 的醋酸纤维滤膜抽滤水样 500mL, 反复冻融, 用丙酮萃取法测定 [22].

1.3 数据处理与分析

浮游植物生物量公式如下:

$$\text{生物量} = \text{密度} \times \text{体积} \times \text{丰度} \times 10^{-6}$$

式中, 浮游植物密度为 1g cm^{-3} 、体积单位为 μm^3 , 丰度单位为 cells L^{-1} , 生物量单位为 $\mu\text{g L}^{-1}$. 其中, 浮游植物平均体积根据目微尺实测浮游植物体积, 根据藻类形状, 使用相应的体积公式进行计算 [23].

综合营养状态指数 [11] 公式如下

$$\text{TLI}(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times \text{TLI}(j)$$

式中, $\text{TLI}(\Sigma)$ 表示综合营养状态指数, $\text{TLI}(j)$ 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.

为获得数据的正态分布, 将 9 个环境因子(TP、TN、DIN、 PO_4^{3-} -P、高锰酸盐指数、WT、pH、SD 和 Chla)进行 $\lg(x+1)$ 转换(除 pH), 用 SPSS19.0 软件进行方差分析(ANOVA), 浮游植物生物量与环境因子之间的相关性分析. 浮游植物功能群与环境因子的去趋势对应分析(detrend correspondence analysis, DCA)和冗余分析(redundancy analysis, RDA)采用 CANOCO4.5 软件, 为获得数据的正态分布, 将浮游植物功能群生物量和 12 个环境因子(TP、TN、DIN、 PO_4^{3-} -P、高锰酸盐指数、WT、pH、N:P、SD、Chla、DO 和 EC)进行 $\lg(x+1)$ 转换(除 pH 和 N:P 外), 选择排序模型, 如果 4 个排序轴中梯度最大值 >4 , 则选择单峰模型, <3 则选择线性模型, $3\sim 4$ 则选择单峰模型或线性模型均可. 其他图表用 Origin8.5 绘制.

2 结果与分析

2.1 环境因子

对比 3 座水库营养盐整体来看, 阿哈水库浓度高于百花水库, 红枫水库浓度与其他两座水库相比处于较低水平(表 1), 3 座水库营养盐之间存在显著性差异($P<0.05$), 并且 3 座水库营养盐体现出明显的季节变化, 丰水期均高于平水期. 3 座水库 TP 无显著差异($P>0.05$), 总磷平水期至丰水期都有所增加, 阿哈水库和百花水库的磷酸根($P<0.05$)有所下降. 3 座水库 TN 和 DIN 均显著相关($P<0.05$), 阿哈水库的总氮、DIN 和叶绿素($P<0.05$)明显高于其他两座水库. 3 座水库氮和磷在平水期和丰水期均以达到“中-富”级富营养化水平 [24], 阿哈水库平水期至丰水期, DIN 有明显的增加(1.367mg L^{-1} 增加至 2.186mg L^{-1}). 高锰

表1 三座水库平水期和丰水期环境因子对比

Table 1 Comparison of environmental factors among the three reservoirs at level and flood periods

环境因子	红枫水库		百花水库		阿哈水库	
	平水期	丰水期	平水期	丰水期	平水期	丰水期
TP/mg·L ⁻¹	0.038 ± 0.018	0.039 ± 0.008	0.037 ± 0.015	0.047 ± 0.017	0.038 ± 0.007	0.039 ± 0.027
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	0.008 ± 0.005	0.009 ± 0.008	0.014 ± 0.015	0.004 ± 0.004	0.03 ± 0.035	0.019 ± 0.018
TN/mg·L ⁻¹	0.568 ± 0.649	1.622 ± 0.531	1.496 ± 0.552	1.827 ± 0.142	2.05 ± 1.007	2.471 ± 0.557
DIN/mg·L ⁻¹	0.347 ± 0.222	0.864 ± 0.462	1.182 ± 0.313	1.425 ± 0.259	1.367 ± 0.889	2.186 ± 0.449
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	2.437 ± 0.474	2.604 ± 0.315	2.256 ± 0.75	2.863 ± 0.555	1.96 ± 0.506	2.624 ± 0.576
Chla/mg·m ⁻³	1.542 ± 1.14	6.317 ± 4.556	1.392 ± 0.685	6.357 ± 4.985	10.913 ± 10.44	12.789 ± 10.269
pH	8.457 ± 0.246	8.063 ± 0.404	8.501 ± 0.201	8.182 ± 0.363	7.749 ± 0.307	7.899 ± 0.205
WT/°C	19.44 ± 1.411	25.265 ± 1.86	18.54 ± 1.611	23.69 ± 2.287	17.197 ± 1.388	24.567 ± 0.711
SD/m	1.583 ± 0.376	0.983 ± 0.113	1.675 ± 0.15	1.075 ± 0.096	1.063 ± 0.111	0.963 ± 0.048

酸盐指数(P>0.05)丰水期均高于平水期, 3座水库差异不大. 3座水库 pH(P<0.05)都显示为弱碱性. 3座水库水温无显著差异(P>0.05), 平水期3座水库水温稳定在18℃左右, 丰水期稳定在24℃左右. 3座水库透明度均无显著差异(P>0.05), 平水期3座水库透明度稳定在1.5m左右, 丰水期稳定在0.9左右.

2.2 浮游植物群落结构

调查期间, 红枫水库6个采样点2次采样调查共检测出浮游植物6门32种, 其中蓝藻门6种, 绿藻门15种, 硅藻门7种, 甲藻门2种, 裸藻门1种, 隐藻门1种. 硅藻门(65.7%)最多, 蓝藻门(24.8%)、绿藻门(7.0%)和甲藻门(1.9%)次之, 隐藻门和裸藻门所占比例较小;百花水库4个采样点2次采样调查共检测出浮游植物5门25种, 其中蓝藻门3种, 绿藻门13种, 硅藻门6种, 甲藻门2种, 裸藻门1种. 硅藻门(70.9%)最多, 蓝藻门(14.5%)和绿藻门(7.2%)次之, 甲藻门和裸藻门所占比例较小;阿哈水库4个采样点2次采样调查共检测出浮游植物5门28种, 其中蓝藻门3种, 绿藻门14种, 硅藻门9种, 甲藻门1种, 裸藻门1种. 硅藻门(68.8%)最多, 蓝藻门(26.6%)和绿藻门(4.4%)次之, 裸藻门所占比例较小.

2.2.1 FG 功能群

根据 Reynolds 等 [5] 和 Padisák 等 [8] 提出的 FG 功能群分类方法, 红枫水库共检测出 18 个功能群, 分为 B、D、F、G、J、L_M、L_O、M、MP、N、P、S1、SN、W1、X1、X2、X3 和 Y, 将相对生物量大于 10% 的功能群定义为优势功能群, 优势功能群为 B、D、LO、N 和 P, 功能群演替为平水期 L_O+B+N+D+P→丰水期 B+D;百花水库共检测出 12 个功能群, 分为 B、D、F、J、L_M、MP、P、S1、T、W1、X1 和 X2, 优势功能群为 B 和 D, 功能群演替为平水期 D+B →丰水期 B+D;阿哈水库共检测出 13 个功能群, 分为 B、D、F、J、L_M、L_O、MP、P、S1、W1、X1、X2 和 X3, 优势功能群为 B、D 和 MP, 功能群演替为平水期 B+D+MP→丰水期 B+D+MP, 如图 2 所示.

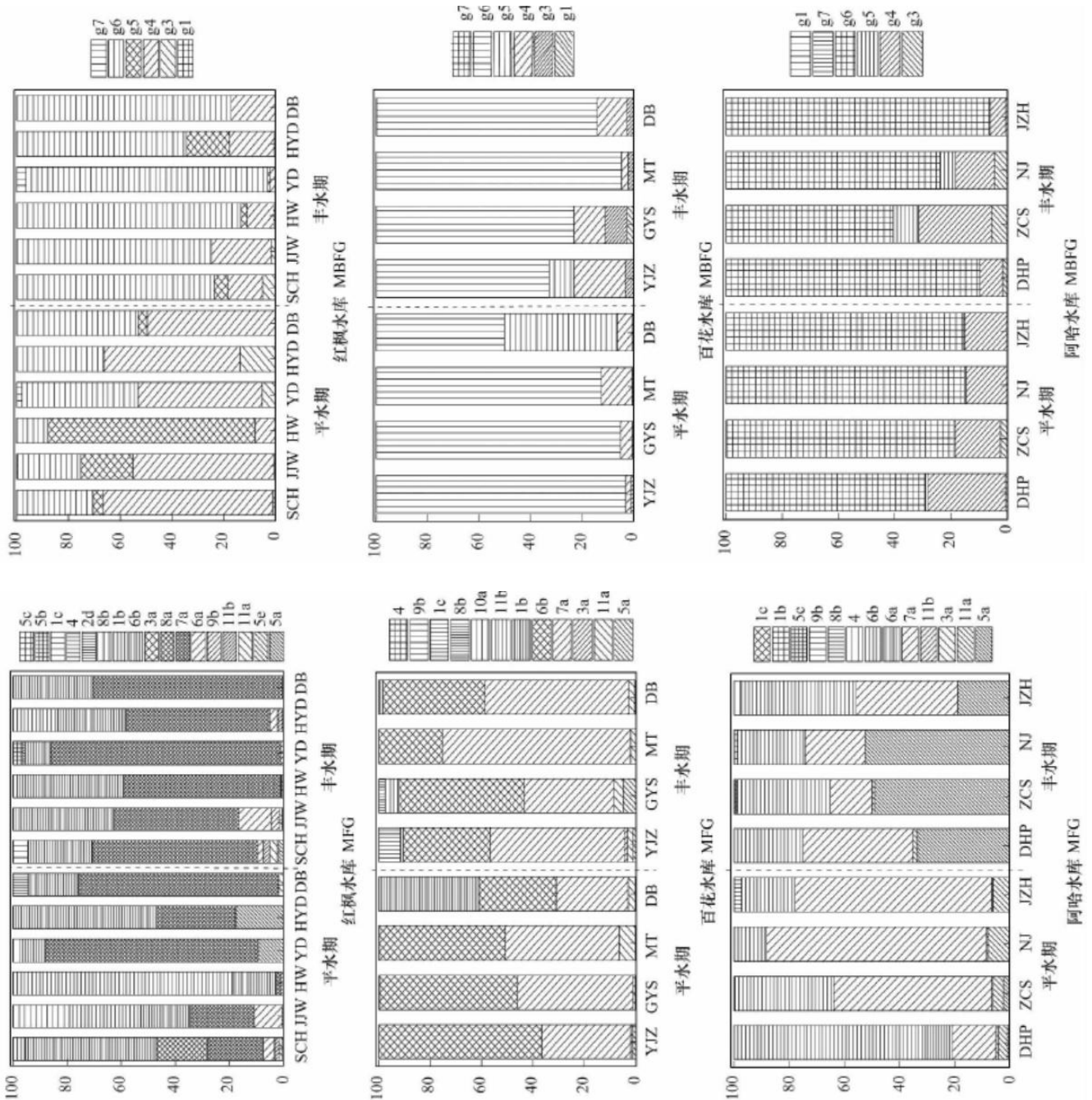
红枫水库平水期至丰水期优势功能群季节演替明显, 三岔河和将军湾采样点平水期以扁鼓藻组成的 N 功能群占优势至丰水期 N 功能群相对生物量明显减少, 花渔洞采样点平水期以湖泊假鱼腥藻组成的 S1 功能群占优势至丰水期 S1 功能群相对生物量明显减少(18%~0%), 平水期后午采样点以多甲藻组成的 LO 功能群占绝对优势(相对生物量 81%), 平水期腰洞采样点以小环藻组成的 B 功能群占绝对优势(相对生物量 79%), 丰水期 6 个采样点均以 B 功能群占主要优势(相对生物量>46%). 百花水库和阿哈水库优势功能群季节演替差异不大. 百花水库平水期至丰水期 D 功能群的相对生物量明显减少(53%~27%), 岩脚寨平水期至丰水期 P 功能群显著增加(0%~12%), 大坝平水期至丰水期 MP 功能群增加不明显(5%~10%). 平水期功能群 B、D 在 4 个采样点相对生物量差异不大, 丰水期 B 功能群占主要优势(相对生物量>35%). 阿哈水库平水期大荒坡以针杆藻组成的 D 功能群占主要优势(相对生物量 55%), 其他采样点均以小环藻组成的 B 功能群占绝对优势(相对生物量>57%);丰水期 4 个采样点均以 B 功能群占据绝对优势(相对生物量>43%).

2.2.2 MFG 功能群

2007 年 Salmaso 等 [7] 结合 FG 功能群和 PFT 功能群的优点, 提出 MFG 功能群, 红枫水库划分为 17 个功能群, 分为:1b、1c、2d、3a、4、5a、5b、5c、5e、6a、6b、7a、8a、8b、9b、11a 和 11b, 优势功能群(相对生物量大于 10%, 下同)为 6b、7a 和 1b, 功能群演替为平水期 6b+1b+7a →丰水期 7a+6b;百花水库划分为 12 个功能群, 分为:1b、1c、3a、4、5a、6b、7a、8b、9b、10a、

11a 和 11b, 优势功能群为 6b、7a 和 1b, 功能群演替为平水期 6b+7a+1b → 丰水期 7a+6b; 阿哈水库划分为 13 个功能群, 分为: 1b、1c、3a、4、5a、5c、6a、6b、7a、8b、9b、11a 和 11b, 优势功能群为 7a、6b 和 5a, 功能群演替为平水期 7a+6b → 丰水期 5a+6b+7a.

3 座水库 MFG 功能群季节演替差异不大, 红枫水库和百花水库平水期至丰水期群落结构演替大致相同, 均以 7a 和 6b 功能群以及以拟多甲藻(*Peridinium* sp.) 和裸甲藻(*Gymnodinium* sp.) 组成的 1b 功能群占优, 丰水期以 7a 和 6b 功能群占优势, 红枫水库平水期三岔河采样点以新月藻(*Closterium* sp.) 组成的 8a 占一定优势, 将军湾采样点以颗粒直链藻(*Melosira granulata*) 组成的 6a 以及飞燕角甲藻组成的 8b 占一定优势, 花渔洞采样点以湖泊假鱼腥藻组成的 5a 占一定优势, 午后采样点 1b 占绝对优势(相对生物量 81%), 腰洞采样点以 7a 占绝对优势(相对生物量 79%). 丰水期将军湾采样点 6a 占有一定优势, 花渔洞采样点 1b 占有一定优势, 其他采样点均以 7a 和 6b 占优. 百花水库平水期大坝采样点以拟多甲藻和裸甲藻组成的 1b 功能群占优, 其他采样点均以 7a 和 6b 占优, 丰水期各采样点均以 7a 和 6b 占优. 阿哈水库平水期



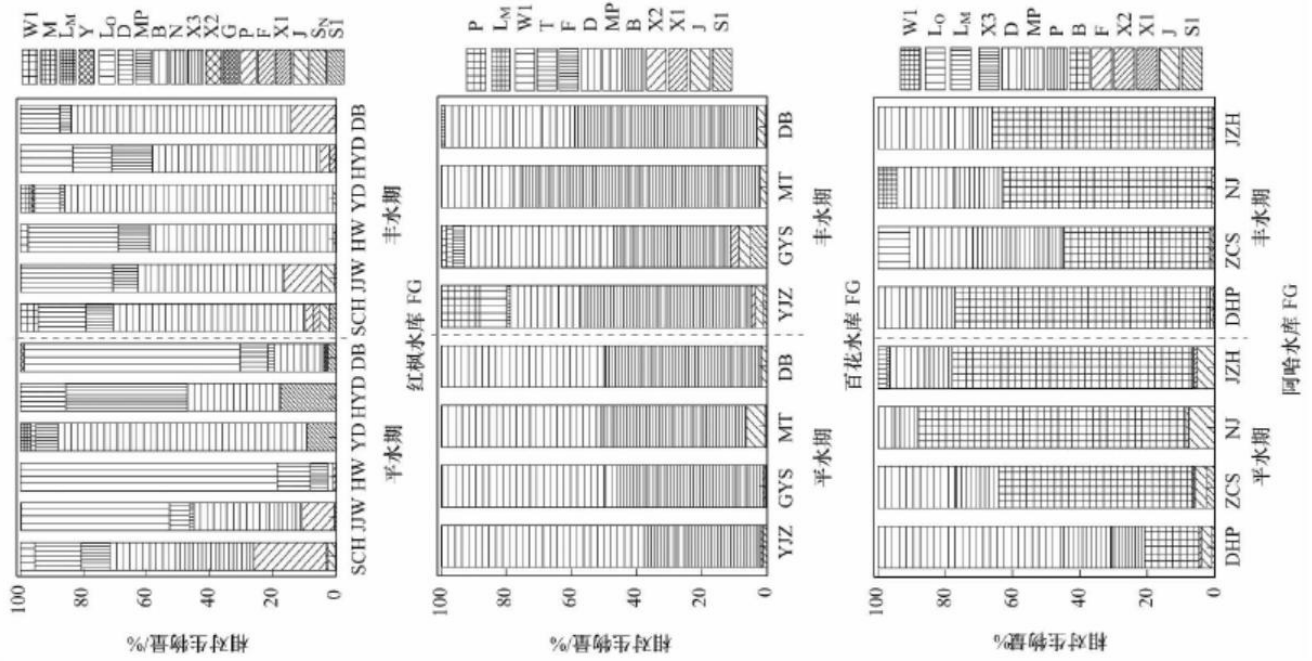


图 2 三座水库各采样点各时期浮游植物功能群相对生物量

Fig. 2 Relative biomass of phytoplankton functional group at each sampling point of the three reservoirs

至丰水期以 7a 和 6b 和 5a 为主，其中平水期以小环藻组成的 7a 功能群以及针杆藻(*Synedrassp.*)和曲壳藻(*Achnanthesp.*)组成的 6b 功能群一直占据绝对优势，丰水期以湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)和湖丝藻(*Limnothrixsp.*)组成的 5a 明显增加

(1%~48%)。平水期大荒坡以 6b 占主要优势(相对生物量 69%)，其他采样点均以 7a 功能群占绝对优势(相对生物量>57%);丰水期 4 个采样点 5a、7a 和 6b 功能群相对生物量差异不大。

2.2.3MBFG 功能群

2010 年 Kruk 等 [10]提出了应用更加简化的 MBFG 功能群。如图 2 可知，红枫、百花和阿哈水库均划分为 6 个功能群，分为:g1、g3、g4、g5、g6 和 g7。红枫水库优势功能群为 g4、g6 和 g5，功能群演替为平水期 g4+g6+g5→丰水期 g6+g4;百花水库优势功能群为 g6、g5 和 g4，功能群演替为平水期 g6+g5 →丰水期 g6+g4;阿哈水库优势功能群为 g4 和 g6，功能群演替为平水期 g4+g6→丰水期 g6+g4。

3 座水库 MBFG 功能群季节演替差异不大，红枫水库平水期后午采样点以 g5 占绝对优势(相对生物量 80%)，其他采样点均以 g4 和 g6 占优势。丰水期各个采样点均以 g6 占主要优势(相对生物量>66%);百花水库平水期大坝采样点以 g6 和 g5 占优势，其他采样点均以 g6 占绝对优势(相对生物量>88%)。丰水期各个采样点均以 g6 占绝对优势(相对生物量>67%);阿哈水库各个采样点平水期(相对生物量>71%)和丰水期(相对生物量>59%)均以 g6 占绝对优势。

2.3 浮游植物功能群与环境因子 RDA

2.3.1FG 功能群与环境因子 RDA

通过对 3 座水库 FG 功能群生物量进行 DCA 分析，发现最大梯度长分别为:2.539、1.937 和 2.003，3 个水库浮游植物 FG 功能群落分布更接近线性模型，因此采用蒙特卡拟合方法对 3 个水库 FG 功能群生物和 12 个环境因子进行 RDA。通过筛选，红枫水库得出 TN(P<0.01)、TP(P<0.05)、SD(P<0.05)、高锰酸盐指数(P<0.01)、WT(P<0.05)、pH(P<0.05)和 N:P(P<0.01)这 7 个具有显著解释性的环境变量，轴 1 和轴 2 的特征值达到 0.556 和 0.083(见表 2，下同)，浮游植物与环境因子相关关系 56.4%体现在第一排序轴上，前两个排序轴集中了全部相关关系的 75.8%。说明轴 1 和轴 2 能解释大多数浮游植物的分布(见图 3，下同)。SD、高锰酸盐指数和 pH 与轴 1 呈正相关(见表 3，下同)，TP、WT、TN 和 N:P 与轴 1 呈负相关;百花水库得出 TN(P<0.05)、DO(P<0.05)、TP(P<0.05)、SD(P<0.05)、高锰酸盐指数(P<0.05)、DIN(P<0.05)、WT(P<0.01)、pH(P<0.05)和 N:P(P<0.05)这 9 个具有显著解释性的环境变量，轴 1 和轴 2 的特征值达到 0.545 和 0.098，浮游植物与环境因子相关关系 50.8%体现在第一排序轴上，前两个排序轴集中了全部相关关系的 71.6%。说明轴 1 和轴 2 能解释大多数浮游植物的分布。TP、SD、N:P 和 pH 与轴 1 呈正相关，TN、DO、DIN、WT 和高锰酸盐指数与轴 1 呈负相关;阿哈水库得出 WT(P<0.01)、TP(P<0.05)、DO(P<0.05)、TN(P<0.05)、高锰酸盐指数(P<0.01)和 DIN(P<0.01)这 6 个具有显著解释性的环境变量，轴 1 和轴 2 的特征值达到 0.610 和 0.095，浮游植物与环境因子相关关系 61.5%体现在第一排序轴上，前两个排序轴集中了全部相关关系的 75.8%。说明轴 1 和轴 2 能解释大多数浮游植物的分布。DO 与轴 1 呈正相关，WT、TP、TN、高锰酸盐指数和 DIN 均与轴 1 呈负相关。

表 2 三座水库功能群与主要环境因子间的 RDA

Table 2 RDA analysis among function groups of the three reservoirs and main environmental factors

类型 ¹⁾	红枫水库			百花水库			阿哈水库		
	FG	MFG	MBFG	FG	MFG	MBFG	FG	MFG	MBFG
A	0.556	0.396	0.223	0.545	0.468	0.203	0.610	0.472	0.200
B	0.083	0.071	0.048	0.098	0.126	0.183	0.095	0.114	0.129
C	0.742	0.707	0.691	0.831	0.859	0.772	0.908	0.876	0.736
D	0.722	0.694	0.671	0.853	0.815	0.674	0.809	0.832	0.598
E	56.4	46.0	40.3	50.8	42.4	40.6	61.5	47.6	41.4
F	75.8	69.3	51.0	71.6	66.6	57.3	75.8	69.5	68.0

1) A:特征值轴一, B:特征值轴二, C:物种-环境相关性轴一, D:物种-环境相关性轴二, E:物种-环境-关系累计百分比轴一(%), F:物种-环境-关系累计百分比轴二(%)

2.3.2MFG 功能群与环境因子 RDA

通过对 3 座水库 MFG 功能群生物量进行 DCA，发现最大梯度长分别为:3.138、1.750 和 1.802，3 个水库浮游植物 MFG 功能群落分布更接近线性模型，因此采用蒙特卡拟合方法对 3 个水库 MFG 功能群生物和 12 个环境因子进行 RDA。通过筛

表 3 三座水库优势功能群与主要环境因子间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis among dominant functional groups of three reservoirs and major environmental factors

水库名	功能群	优势功能群	主要环境因子	R ²	P
红枫水库	FG	B	TN	0.414	<0.01
			N:P	0.404	<0.01
		L ₀	TN	-0.473	<0.01
			N:P	-0.419	<0.01
	N	TN	-0.386	<0.05	
		高锰酸盐指数	0.406	<0.01	
	MFG	7a	TN	0.371	<0.05
			N:P	0.431	<0.01
		5a	高锰酸盐指数	0.341	<0.05
			TN	-0.431	<0.01
1b		高锰酸盐指数	-0.364	<0.01	
		WT	0.306	<0.05	
MBFG	g5	WT	-0.398	<0.05	
	g6	WT	-0.536	<0.01	
百花水库	FG	D	WT	-0.536	<0.01
	MFG	6b	WT	-0.485	<0.01
		1b	高锰酸盐指数	-0.550	<0.01
	MBFG	g5	高锰酸盐指数	-0.433	<0.05
			N:P	0.381	<0.05
阿哈水库	FG	B	WT	0.536	<0.01
			高锰酸盐指数	0.571	<0.01
			DIN	0.583	<0.01
	MFG	7a	高锰酸盐指数	0.427	<0.05
			DIN	0.452	<0.05
		5a	高锰酸盐指数	0.427	<0.05
			WT	0.473	<0.05
	MBFG	g4	—	—	>0.05
			g6	—	>0.05

选, 红枫水库得出 TN(P<0.01)、TP(P<0.05)、高锰酸盐指数(P<0.01)、pH(P<0.05)和 N:P(P<0.01)这 5 个具有显著解释性的环境变量, 轴 1 和轴 2 的特征值达到 0.396 和 0.071, 浮游植物与环境因子相关关系 46.0%体现在第一排序轴上, 前两个排序轴集中了全部相关关系的 69.3%。说明轴 1 和轴 2 能解释大多数浮游植物的分布。高锰酸盐指数和 pH 与轴 1 呈正相关, TP、TN 和 N:P 与轴 1 呈负相关;百花水库得出 EC(P<0.05)、DO(P<0.05)、Chla(P<0.05)、高锰酸盐指数(P<0.01)、WT(P<0.01)和 pH(P<0.05)这 6 个具有显著解释性的环境变量, 轴 1 和轴 2 的特征值达到 0.468 和 0.126, 浮游植物与环境因子相关关系 42.4%体现在第一排序轴上, 前两个排序轴集中了全部相关关系的 66.6%。说明轴 1 和轴 2 能解释大多数浮游植物的分布。EC、DO 和 pH 与轴 1 呈正相关, Chla、WT 和高锰酸盐指数与轴 1 呈负相关;阿哈水库得出 WT(P<0.01)、N:P(P<0.05)、DO(P<0.05)、TN(P<0.05)、高锰酸盐指数(P<0.05)、DIN(P<0.01)和 Chla(P<0.01)这 7 个具有显著解释性的环境变量, 轴 1 和轴 2 的特征值达到 0.472 和 0.114, 浮游植物与环境因子相关关系 47.6%体现在第一排序轴上, 前两个排序轴集中了全部相关关系的 69.5%。说明轴 1 和轴 2 能解释大多数浮游植物的分布。TN、DIN、Chla、N:P 和 DO 均与轴 1 呈正相关, 高锰酸盐指数和 WT 均与轴 1 呈负相关。

2.3.3MBFG 功能群与环境因子 RDA

通过对 3 座水库 MBFG 功能群生物量进行 DCA, 发现最大梯度长分别为:2.102、1.219 和 1.407, 3 个水库浮游植物 MBFG 功能群群落分布更接近线性模型, 因此采用蒙特卡拟合方法对 3 个水库 MBFG 功能群生物和 12 个环境因子进行 RDA。通过筛选, 红枫水库得出 WT(P<0.01)、PO₃-4-P(P<0.01)、EC(P<0.05)、pH(P<0.05)和 TP(P<0.05)这 5 个具有显著解释性的环境变量, 轴 1 和轴 2 的特征值达到 0.223 和 0.048, 浮游植物与环境因子相关关系 40.3%体现在第一排序轴上, 前两个排序轴集中了全部相关关系的 51.0%。说明轴 1 和轴 2 能解释大多数浮游植物的分布。WT、PO₃-4-P 和 TP 与轴 1 呈正相关, EC 和 pH 与轴

百花水库优势功能群为 B 和 D, 阿哈水库优势功能群为 B、D 和 MP. 3 座水库高度、经纬度大体相同, 并且红枫水库和百花水库位于猫跳河的上下游, 具有相同的藻种来源, 因此在群落组成上具有一定的相似性. LO 功能群代表性种类为拟多甲藻, 适应生境为贫到富营养、大中型深水或浅水湖泊 [8, 28, 29]. N 功能群代表性种类为扁鼓藻, 适应生境为栖息在 2~3m 的连续或不连续的水体混合层. P 功能群代表性种类为颗粒直链藻, 适应生境与 N 功能群相似 [8, 28, 29]. 本研究中 N 和 P 功能群底层生物量远远低于中层和表层. B 功能群代表性种类为小环藻, 适应生境为中营养型中小型浅水水体, 并且繁殖速度快, 耐受低光照低营养环境 [8, 28, 29]. D 功能群代表性种类为针杆藻, 适应生境为含有营养盐、浑浊浅水水体, 对营养缺乏敏感 [8, 28, 29]. MP 功能群代表性种类为曲壳藻, 适应生境经常扰动、浑浊和浅水水体 [8, 28, 29]. 综合营养状态指数评价显示, 红枫水库平水期(40.46)和丰水期(44.59)均处于中营养水平, 属于中型深水水库;百花水库平水期(44.59)和丰水期(40.82)均处于中营养水平, 属于中小型湖泊, 最大水深约 36m;阿哈水库平水期(45.12)和丰水期(47.02)均处于中营养水平, 属于小型湖泊, 最大水深约 25m. 因此 FG 功能群极大地提高了浮游植物对环境的响应能力, 更符合对水库环境的描述. MFG 功能群相比较, 红枫水库优势功能群为 7a、6b 和 1b, 百花水库优势功能群为 7a、6b 和 1b, 阿哈水库优势功能群为 7a、6b 和 5a. 3 座水库优势功能群差异不大. 红枫水库、百花水库和阿哈水库平水期至丰水期以无鞭毛的中心藻纲小个体硅藻为主的功能群 7a 以及无鞭毛的羽纹藻纲的大个体硅藻组成 6b 占主要优势. 红枫水库和百花水库平水期至丰水期以有鞭毛的混合营养的甲藻门大个体为主的功能群 1b 生物量减少, 甲藻为广温性(10~28℃)藻类, 但最适宜生长温度为 13℃作用, 并且甲藻具有鞭毛, 能够游动利用周边营养盐, 在低温条件下极易占优势 [8, 28, 29]. 红枫和百花水库丰水期温度(23.69℃和 25.27℃)较高, 夏季高温抑制了甲藻的生长繁殖. 阿哈水库丰水期以无鞭毛的颤目丝状体群体蓝藻为主的功能群 5a 占优势, 蓝藻适宜生境为较高温度水体, 最适温度在 25~35℃. 丰水期温度高适宜蓝藻的生长. MBFG 功能群相比较, 红枫水库优势功能群为 g5、g6 和 g4, 百花水库优势功能群为 g5、g6 和 g4, 阿哈水库优势功能群为 g6 和 g4. 3 座水库均以 g4、g5 和 g6 功能群占主要优势. 以功能群 g4 组成的为中等大小的单细胞或群体, 无特异性特征. 以功能群 g5 组成的为中型到大型的单细胞鞭毛类. 以功能群 g6 组成的为无鞭毛的具硅质外壳的藻类.

RDA 结果可以看出, 不同功能群(FG、MFG 和 MBFG)的演替都是环境因子共同作用的结果. 红枫水库 FG 功能群显著影响因子是 TN、高锰酸盐指数和 N:P. MFG 功能群显著影响因子是 TN、高锰酸盐指数和 N:P. MBFG 功能群显著影响因子是 WT 和 PO₃-4-P. 百花水库 FG 功能群显著影响因子是 WT. MFG 功能群显著影响因子是 WT 和高锰酸盐指数. MBFG 功能群显著影响因子是 WT、高锰酸盐指数和 N:P. 阿哈水库 FG 功能群显著影响因子是 WT、高锰酸盐指数和 DIN. MFG 功能群显著影响因子是 WT、DIN 和 Chla. MBFG 功能群显著影响因子是 WT. 通过相关性分析, 发现 3 座水库 FG 对环境具有较好的解释度和相关性, 3 座水库与环境因子均存在极显著相关性;MFG 功能群对环境的解释度差于 FG 功能群, 由于 MBFG 功能群 3 座水库与环境因子之间存在显著相关性;而 MBFG 功能群对环境的解释度较差, 阿哈水库与环境因子之间无显著相关性, 但对温度具有很高的解释度, 这与 Hu 等 [25] 的研究结果一致.

综上, 使用 FG 功能群能够很好地解释浮游植物群落结构的变化以及环境的相关性, 同时可以根据浮游植物优势功能群预测水库环境因子和营养状态, 而 MFG 和 MBFG 功能群对游植物群落结构以及环境的解释度相对较差. 3 座水库 MFG 和 MBFG 优势功能群具有高度相似性.

4 FG、MFG 和 MBFG 功能群分类方法的对比

对比 3 种功能群分类方法发现, MFG 功能群与 FG 功能群具有重叠部分, 而 MBFG 功能群与 FG 和 MFG 相比, 差异较大. FG 功能群考虑了浮游植物的生理、生态学等特征, 能更好地解释与环境的相关性, 能够更准确反映环境因子与浮游植物生态位之间的关系. 同时可以根据浮游植物优势功能群预测水库环境因子及富营养化状态, 也是目前应用最多的功能群分类方法. 但是 FG 功能群需要具备系统完善的浮游植物鉴定知识, 难度系数大. MFG 功能群分类方法简单易懂, 并且能够较好地解释浮游植物与环境因子的关系, 但功能群与环境因子联系较弱, 此外对个体大、小的鉴定标准不够明确. MBFG 功能群分类方法最为简单、高效, 弥补了 FG 功能群复杂、耗时耗力的缺点, 并且 MBFG 分类对温度显示出更高的敏感度, 对于筛选季节性非常有用. 但是 MBFG 功能群对环境的解释度不够, 分类依据过于简单, 分组太少. 3 个分类方法各有优点和缺点, FG 功能群对于具有专业浮游植物鉴定技术和经验以及分类学知识具有很好的应用性, MFG 功能群降低了 FG 功能群分类方法的难度, 对于浮游植物鉴

定技术不熟练并且需要解释环境因子具有很好的帮助。MBFG 对于缺少详细调查资料时，可以很好地进行功能群的分类。根据研究目的不同，确定问题的最佳方案，在选择分类方法时根据自己的实际需要选择合适的分类方法。

5 结论

(1)FG 和 MFG 功能群对环境具有较好地解释度和相关性，并且 MBFG 功能群分类对温度具有很高的解释度。

(2)FG 功能群能够很好地解释浮游植物群落结构的变化以及环境的相关性，同时可以根据浮游植物优势功能群预测水库环境因子和营养状态，而 MFG、MBFG 功能群对浮游植物群落结构以及环境的解释度相对较差。

(3)FG 功能群对于具有专业浮游植物鉴定技术和经验以及分类学知识具有很好的应用性，MFG 功能群降低了 FG 功能群分类方法的难度，对于浮游植物鉴定技术不熟练并且需要解释环境因子具有很好的帮助。MBFG 对于缺少详细调查资料时，可以很好地进行功能群的分类。高原水库选择功能群时，根据研究目的不同以及实际需要选择合适的分类方法。

参考文献:

- [1] Reynolds C. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 24-28.
- [2] Suikkanen S, Laamanen M, Httunen M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2007, 71(3-4): 580-592.
- [3] 刘足根, 张柱, 张萌, 等. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分[J]. 长江流域资源与环境 2012, 21(3): 375-384.
Liu Z G, Zhang Z, Zhang M, et al. Classification of functional groups and community structure of phytoplankton in the Ganjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(3): 375-383.
- [4] Salmaso N, Naselli-Flores L, Padisak J. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology[J]. Freshwater Biology, 2015, 60(4): 603-619.
- [5] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the Freshwater Phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(5): 417-428.
- [6] Weithoff G. The concepts of 'plant functional types' and 'functional diversity' in lake phytoplankton - a new understanding of phytoplankton ecology? [J]. Freshwater Biology, 2003, 48(9): 1669-1675.
- [7] Salmaso N, Padisak J. Morpho-functional groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany) [J]. Hydrobiologia, 2007, 578(1): 97-112.
- [8] Padisak J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. Hydrobiologia, 2009, 621(1): 1-19.
- [9] Tolotti M, Thies H, Nickus U, et al. Temperature modulated effects of nutrients on phytoplankton changes in a mountain lake[J]. Hydrobiologia, 2012, 698(1): 61-75.
- [10] Kruk C, Huszar V L M, Peeters E T H M, et al. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(3): 614-627.
- [11] Devercelli M. Phytoplankton of the Middle Paraná River during an anomalous hydrological period: a morphological and functional approach[J]. Hydrobiologia, 2006, 563(1): 465-478.
- [12] 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[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4436-4443.
Li L, Li Q H, Jiao S L, et al. Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4436-4443.
- [13] 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[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5573-5584.
Huang G J, Li Q H, Chen C, et al. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5573-5584.

- [14] De Souza D G, Bueno N C, Bortolini J C, et al. Phytoplankton functional groups in a subtropical Brazilian reservoir: responses to impoundment[J]. *Hydrobiologia*, 2016, 779(1) : 47-57.
- [15] Mieleitner J, Borsuk M, Burgi H R, et al. Identifying functional groups of phytoplankton using data from three lakes of different trophic state[J]. *Aquatic Sciences*, 2008, 70(1) : 30-46.
- [16] Gligora Udovic[˘] M, Utinic[˘] P, Kralj Borojevic[˘] K, et al. Co-occurrence of functional groups in phytoplankton assemblages dominated by diatoms, chrysophytes and dinoflagellates[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2015, 187(2) : 101-111.
- [17] 胡月敏, 李秋华, 朱冲冲, 等. 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[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2) : 403-416.
- Hu Y M, Li Q H, Zhu C C, et al. Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2) : 403-416.
- [18] Nekola J C, White P S. The distance decay of similarity in biogeography and ecology[J]. *Journal of Biogeography*, 1999, 26(4) : 867-878.
- [19] 刘信安, 湛敏, 马艳娥. 三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系[J]. *环境科学*, 2005, 26(4) : 95-99.
- Liu X A, Zhan M, Ma Y E. Relationship between algal growth and nutritious materials absorbability in the Three-Gorges Valley[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(4) : 95-99.
- [20] 李秋华. 贵州高原水库富营养化特征及评价[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(2) : 1-8.
- Li Q H. Characteristics and evaluation of eutrophication in Guizhou Plateau reservoirs [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science)*, 2018, 36(2) : 1-8.
- [21] 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[J]. *生态科学*, 2005, 24(1) : 9-11.
- Lin S J, He L J, Huang P S, et al. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton[J]. *Ecologic Science*, 2005, 24(1) : 9-11.
- [22] 朱为菊, 庞婉婷, 尤庆敏, 等. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(3) : 637-645.
- Zhu W J, Pang W T, You Q M, et al. Phytoplankton community structure and the evaluation of water quality in spring, Huaihe River Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(3) : 637-645.
- [23] 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[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(6) : 927-935.
- Chen C, Li S J, Hu R, et al. Comparative analysis of four methods for calculating biomass of phytoplankton community[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(6) : 927-935.
- [24] 谢炜平. 水质检验技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 07049 期 陈倩等: FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例 2011. 136.
- [25] Hu R, Han B P, Naselli-Flores J, et al. Comparing biological classifications of freshwater phytoplankton: a case study from south China[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 701(1) : 219-233.
- [26] Kruk C, Mazzeo N, Lacerot G, et al. Classification schemes for phytoplankton: a local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(9) : 901-912.
- [27] Kruk C, Segura A M, Costa L S, et al. Functional redundancy increases towards the tropics in lake phytoplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2016, 39(3) : 518-530.
- [28] 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[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1) : 11-23.
- Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, et al. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1) : 11-23.
- [29] 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6) : 1833-1840.
- Yang W, Zhu J Y, Lu K H, et al. The establishment, development and application of classification approach of fresh water phytoplankton based on the functional group: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6) : 1833-1840. 1704