

# 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

肖晶<sup>1</sup>, 王宝利<sup>1,\*</sup>, 张海涛<sup>1</sup>, 时节<sup>1</sup>, 仇晓龙<sup>1</sup>, 刘涛泽<sup>2</sup>

(1. 天津大学 表层地球系统科学研究院 天津市环渤海地球关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072;  
2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

**摘要:** 筑坝拦截阻断了河流连续体,改变了河流原始自然的生态系统。为了解河流筑坝对浮游植物功能群的影响,按季度对乌江流域支流猫跳河和三岔河的水库及入库河流进行调查,分析了浮游植物功能群及其相关环境因子。结果表明,河流出现频率大于20%的浮游植物功能群有6种,主要优势功能群均为BAMP;而不同水库中功能群组成各不相同,且出现频率大于20%的浮游植物功能群有11种,其中红枫湖水库以功能群S1\D为绝对优势功能群,平寨水库优势功能群为BVC,而普定水库和引子渡水库的优势功能群均为B\D\PA\Lo。冗余分析(RDA)结合逐步多元回归分析显示,营养盐对河流浮游植物功能群组成影响并不显著,而库区浮游植物功能群动态变化主要受温度以及溶解无机碳(DIC)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>等环境因子的影响,红枫湖水库优势功能群丰度与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>显著正相关,而三岔河流域的3座梯级水库优势功能群丰度均与DIC和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>显著正相关。

**关键词:** 筑坝;水库;浮游植物功能群;环境因子;乌江

**中图分类号:** P592 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2019)06-0829-10 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.149

河流是地球表层系统中陆地和海洋生态系统的主要连接纽带,对表层系统的物质循环和能量流动起着重要作用。据统计,全球河流每年向海洋输送的溶解态物质和颗粒态物质占陆地向海洋输送量的90%,是海洋生态系统外源物质的输入主体<sup>[1]</sup>。近年来,随着社会发展对电力及水资源的需求量增加,河流筑坝不断增加,截至目前河流筑坝有1600多万座<sup>[2]</sup>。河流筑坝将异养型的自然河流改造成类似湖泊的自养型水库生态系统,改变自然河流的连续性和水文形式,干扰河流生源要素(碳、氮、磷、硅)的生物地球化学循环,阻碍陆地颗粒态和溶解态物质向海洋的输送通量<sup>[3-5]</sup>。而浮游植物作为筑坝水库中主要初级生产者,对水库生态系统内能量流动、物质循环和生态系统稳定性构建至关重要<sup>[6-9]</sup>。

浮游植物的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,能够直接快速反映水生态环境变化并通过光合作用和微生物分解作用调节水体物质循环过程<sup>[10-12]</sup>。传统林奈同源分

类法根据物种的形态和同源性特征将物种归入不同的类群,很少考虑物种的生境特征,具有一定的局限性。为了弥补这个分类缺陷,Reynolds等<sup>[13]</sup>提出了浮游植物功能群理论,该理论以浮游植物生理生态特征及其环境适应性机制为基础,在浮游植物生长策略C-R-S的分类基础上,将通常生长在相同生境条件且对环境具有相似敏感性和耐受性的藻类归为一个功能群,以便于更精确地揭示生境变化对藻类集群的选择机制,预测藻类群落结构的演替规律<sup>[14-16]</sup>。在Padisák等<sup>[17]</sup>的进一步补充完善下,迄今为止共鉴定了39种浮游植物功能群,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。

为了解筑坝对浮游植物功能群的影响,本研究选取贵州三岔河和猫跳河流域的梯级水库和入库河流作为研究对象,分析水体理化参数和浮游植物组成,了解浮游植物功能群演替特征,以及水温、溶解氧、营养盐等主要环境因子是如何影响浮游植物功能群的演替,为河流-水库体系浮游植物生态学

收稿日期:2019-07-07;改回日期:2019-09-18

基金项目:国家自然科学基金-贵州喀斯特科学研究中心联合项目(U1612441);国家重点研发计划项目(2016YFA0601001)。

第一作者简介:肖晶(1988-),男,博士研究生,研究方向为浮游植物对生物地球化学循环影响。E-mail:befortime0629@126.com.

\* 通讯作者:王宝利(1976-),男,教授,博士,研究方向为流域生物地球化学循环及其生态效应。E-mail:baoli.wang@tju.edu.cn.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

的完善提供数据基础,并为梯级水库水资源管理提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 区域概况及采样点设置

三岔河和猫跳河均是乌江南岸的两条主要支流,三岔河发源于贵州省西部乌蒙山片区,全长325.6 km,自东向西落差1 300 m,平均比降为4%,经东风水库汇入乌江干流;猫跳河发源于贵州省安顺市,全长181 km,自南向北总落差为549.6 m,平均比降0.306%。研究区域属于亚热带季风气候区,气候温和湿润,雨量充沛,年均温度在12~16℃,年降雨量1 300 mm,75%降雨量集中在4~10月。本研究按季度从2017年7月到2018年4月进行4次调查,设置16个采样点(图1),其中包括三岔河流域上的平寨(PZ)水库、普定(PD)水库、引子渡(YZD)水库以及猫跳河上的红枫湖(HF)水库,主要水文特征如表1所示。

## 1.2 样品采集与分析

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“∞”字形缓慢拖网收集,浮游植物定量样品是采集1.5 L水样,用3%~5%的鲁格试剂固定,静置沉淀24~48 h后用虹吸法浓缩至80

mL,在光学显微镜下进行藻类鉴定计数。藻类鉴定方法参考胡鸿钧和魏印心<sup>[18]</sup>的《中国淡水藻类—系统、分类及生态》。

表1 研究水库主要水文特征

Table 1 The main hydrological characteristics of the studied reservoirs

特征	平寨水库	普定水库	引子渡水库	红枫湖水库
截流时间	2016年	1995年	2004年	1981年
库容/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	10.89	4.21	5.43	7.53
集水面积/km <sup>2</sup>	3 492	5 871	6 425	1 596
平均水深/m	80.07	23.95	60.01	13.16
滞留时间/a	0.551	0.117	0.113	0.823
水库用途	发电,灌溉,饮用水源	发电,灌溉,饮用水源	发电,灌溉,饮用水源	发电,灌溉,饮用水源

现场用美国金泉公司的水质参数仪 YSI (EX01) 原位测定水样的温度、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)。用德国WALZ公司的 phyto-PAM 测定叶绿素 a (Chl-a) 含量。用标定过的盐酸现场滴定水样碱度(ALK)。水样采集后24 h内用0.45 μm (Merck Millipore) 醋酸纤维膜过滤,收集滤液,用于测定阴阳离子和营养盐。测定阳离子(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>)的水样加入纯硝酸酸化至pH<2,用ICP-OES测定阳离子;阴离子采用Dionex公司ICS-90型离子色谱仪测定。用荷兰SKALAR SAN++连续

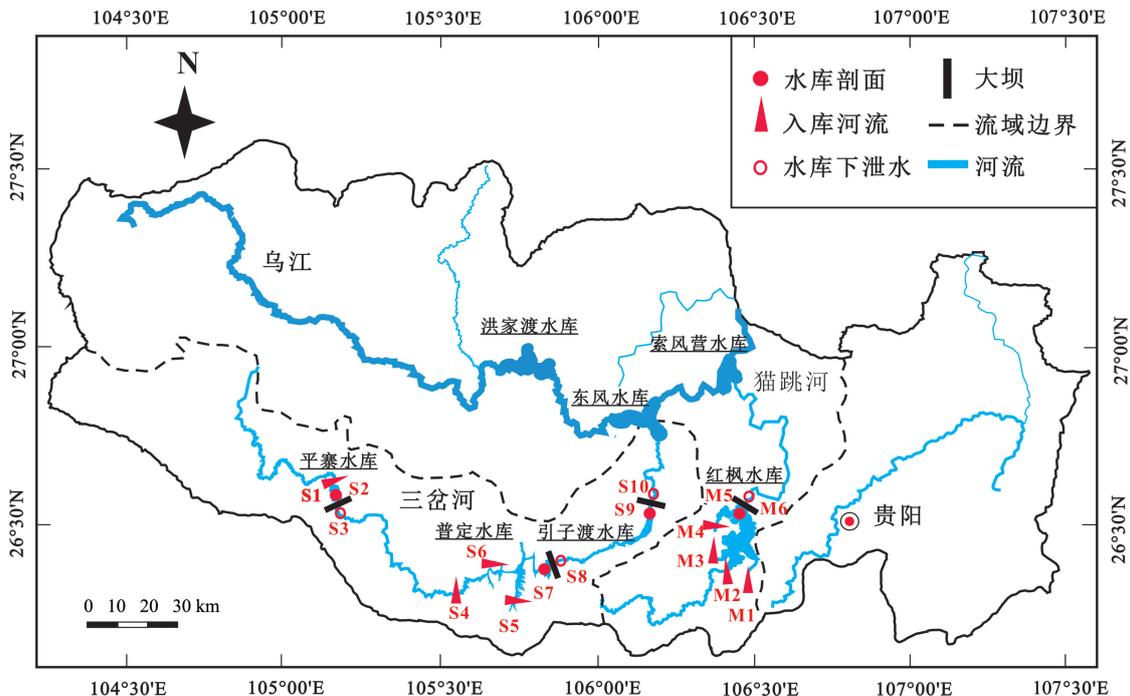


图1 研究区域采样点

Fig.1 Sampling sites in the studied area

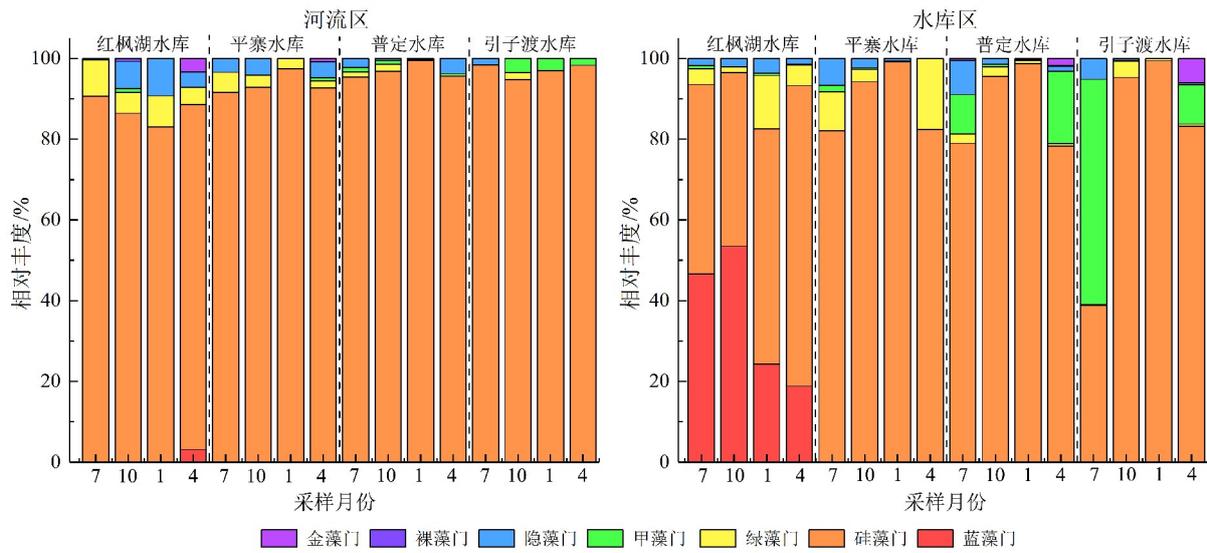


图 2 河流区和水库区浮游植物相对丰度的季节性变化

Fig.2 Seasonal variation of relative abundance of phytoplankton in the rivers and reservoirs

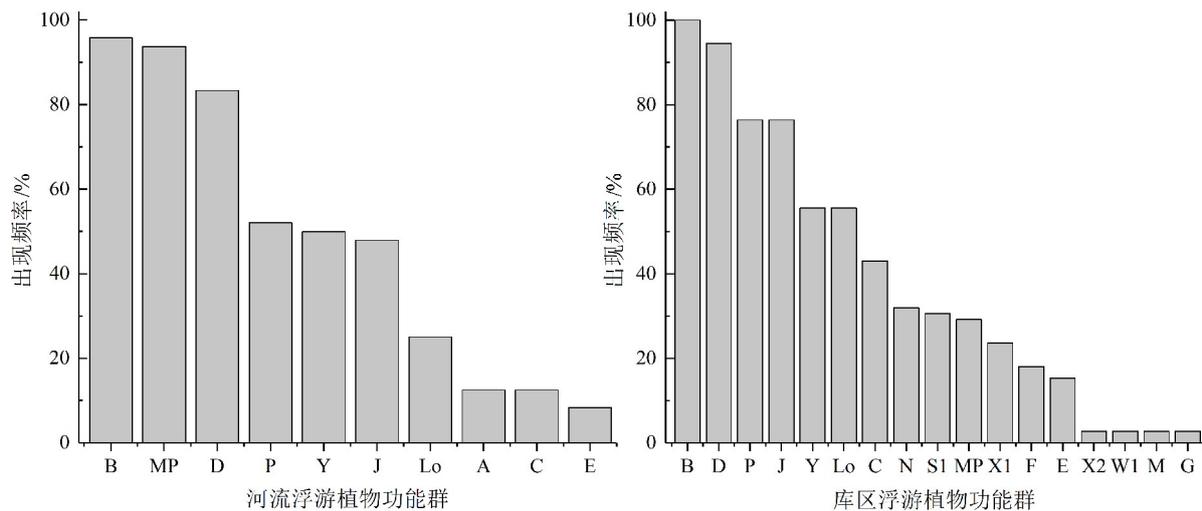


图 3 河流区和水库区浮游植物功能群出现频率

Fig.3 Frequency distribution of functional groups in the rivers and reservoirs

流动分析仪测定溶解性硅 (DSi)、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 。

### 1.3 数据分析方法

RDA 分析用 CANOCO4.5, 相关性统计分析及多元回归分析用 IBM SPSS 24, 图表用 Origin Pro 2017 进行绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物组成及功能群划分

研究区域共鉴定出 7 门 47 种(属), 硅藻门种类数最多为 20 种, 占总物种数的 42.55%; 绿藻门

15 种, 占总物种数的 31.91%; 甲藻门和蓝藻门均占总物种数的 8.51%; 裸藻门占 2.13%; 金藻门和隐藻门均占 2.13%。其中, 河流区以硅藻门种类数最多, 占总物种数的 56.67%, 其次是绿藻门占 23.33%; 而水库区域则以绿藻门种类数最多, 占总物种数的 44.44%, 其次是硅藻门占 25.00%。浮游植物的细胞丰度表现出明显的时空差异(图 2), 库区的浮游植物丰度明显高于河流, 河流的硅藻门丰度最高均值为  $0.95 \times 10^6$  cells/L, 占总丰度的 92.48%; 其次是绿藻门丰度为  $0.03 \times 10^6$  cells/L, 占总丰度的 2.98%。而库区的硅藻门丰度为  $6.61 \times$

$10^6$  cells/L, 占总丰度的 74.73%, 较河流明显下降; 其次蓝藻门丰度为  $1.26 \times 10^6$  cells/L, 占总丰度的 14.20%, 主要分布在红枫湖水库; 甲藻门丰度为  $0.505 \times 10^6$  cells/L, 占总丰度的 5.71%, 主要分布在引子度水库和普定水库(图2)。

根据功能群分类方法对鉴定出的浮游植物进行分类, 可分为 18 个功能群, 即 A、B、C、D、E、F、G、J、Lo、M、MP、N、P、S1、W1、X1、X2、Y。河流区域共鉴定出 10 个功能群, 其中功能群 B 的出现频率最高为 95.83%, 出现频率大于 20% 的功能群有 6 种; 而库区共鉴定出 17 个功能群, 其中也以功能群 B 的出现频率最高为 100%, 在所有采样点全年均有功能群 B 的出现, 出现频率大于 20% 的功能群有 11 种(图3)。各浮游植物功能群代表性物种的适应性生境特征及其 C-R-S 生长策略见表 2, 以 R 和 CR 生长策略的功能群最多。其中 C 型为竞争者(Competitors), 在能量和物质均充裕的条件下能快速繁殖

并占据优势; R 为杂食者(Ruderals), 在物质充沛的环境中能对能量的输入具有较高耐受性, 能长期生长于高或低光照条件下; S 型为胁迫耐受者(Stress-tolerations), 在物质相对不足的环境中能通过其他途径吸收生长所需的物质<sup>[19]</sup>。

## 2.2 浮游植物功能群时空分布特征

### 2.2.1 浮游植物功能群季节性变化特征

通过计算每个采样点浮游植物功能群的相对丰度, 选择细胞相对丰度超过 10% 以上的功能群作为该点的优势浮游植物功能群。水库区和河流区的浮游植物功能群均表现出明显的季节性差异(图4)。河流区共鉴定出 8 个优势浮游植物功能群: A, B, C, D, J, MP, P, Y。其中功能群 B 和 MP 的优势度最大, 在所有点的相对丰度平均值分别是 44.94% 和 43.97%, 功能群 B 和 MP 代表物种分别是小环藻和舟形藻。红枫湖入库河流以 B 和 MP 为季节性演替浮游植物功能群, 其中功能群 MP 四季

表 2 研究区域主要浮游植物功能群生境特征及其 C-R-S 生长策略<sup>[12]</sup>

Table 2 Representative species of phytoplankton functional groups and their growth strategies in the studied area

功能群	代表性物种(属)	生长策略	环境特征	耐受性	敏感性
A	普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i>	R	贫营养、洁净、深水	低营养	pH 升高
B	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	CR	中富营养、大型深水或浅水水体	低光照、低温	pH 升高、硅缺乏、水体分层
C	华丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	R	中营养、中小型水体	低光照、低温	硅缺失、水体分层
D	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	R	富营养、透明度低	冲刷	营养缺失
E	锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.	CS	贫营养或中营养、小型浅水水体	低营养	二氧化碳缺失
F	并联藻 <i>Quadrigula</i> sp.	CS	中到富营养、洁净、水体混合强	低营养、高浑浊	二氧化碳缺失
G	空球藻 <i>Eudorina elegans</i> ; 实球藻 <i>Pandorina</i> sp	CS	富营养、停滞水体	高光照	营养盐缺失
Lo	甲藻 <i>Pyrrophyta</i>	S	中到富营养、中到大型水体、可深可浅	营养分层	长时间或深层混合
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	S	富到超富营养、静水、透明度低	高光照高辐射	冲刷作用、低光照
Y	隐藻 <i>Cryptophyta</i>	CRS	静水环境、中到富营养	低光照	冲刷、吞噬作用
N	角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp.	R	持续或半持续混合水体	低营养	水体分层、pH 升高
P	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.; 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	R	中到富营养、持续或半持续混合水体、低温	低光照、低碳含量	水体分层、硅缺失
S1	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> ; 拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	R	中到富营养、混合水体、低透明度	高光照高辐射	冲刷作用
W1	裸藻 <i>Euglenophyta</i> sp.	R	有机污染、浅水	高生化需氧量	滤食作用
X1	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i> ; 小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	R	超富营养、浅水	水体分层	营养缺乏、滤食作用
X2	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.	R	中富营养、浅水	水体分层	营养缺乏、滤食作用
J	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.; 微小四角藻 <i>Tetraedon minimum</i> ; 转板藻 <i>Mougeotia</i> sp.; 顶棘藻 <i>Chodatella longiseta</i> ; 网状空星藻 <i>Coelastrum reticulatum</i> ; 盘星藻 <i>Pediastrum</i> ;	CR	中到富营养、分层	低碳氮含量	水体浑浊、低光照、低磷量
MP	舟形藻 <i>Navicula</i> ; 异极藻 <i>Gomphonema acuminatum</i> ; 扁圆卵形藻 <i>Cocconeis</i> ; 窗格平板藻 <i>Tabellaria</i> ; 桥湾藻 <i>Cymbella</i> sp	CR	经常性搅动、浑浊、浅水	混合搅动	高光照

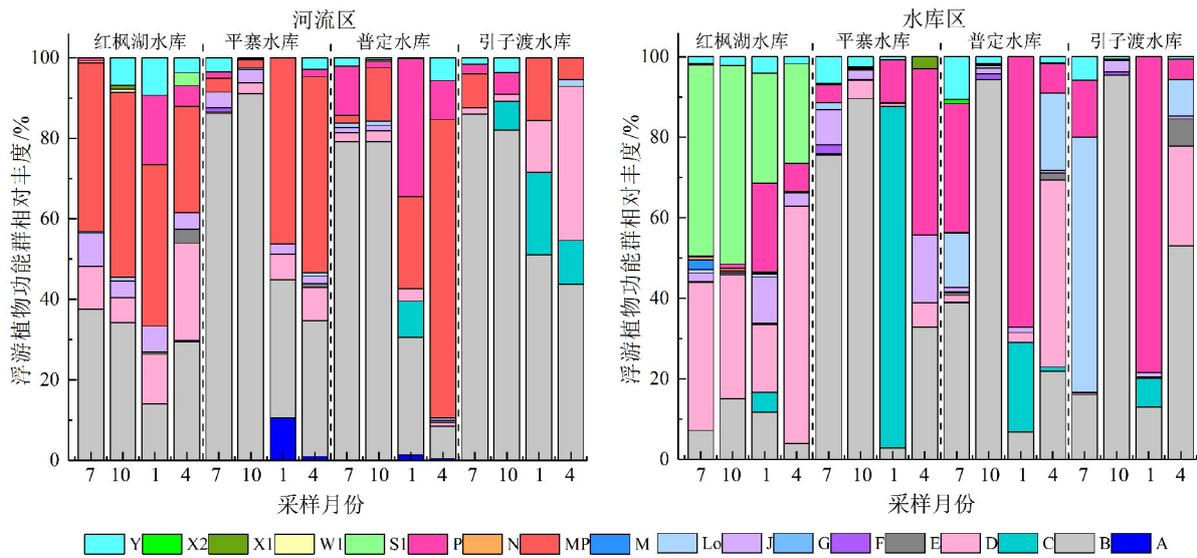


图 4 河流区和水库区的浮游植物功能群相对丰度

Fig.4 The relative abundance of phytoplankton functional groups in the rivers and reservoirs

均占有绝对优势;而普定水库和平寨水库入库河流功能群季节性演替规律相似,冷季(1月和4月)的优势功能群是MP,而暖季(7月和10月)为功能群B,相对丰度超过70%。而引子渡水库入库河流暖季优势功能群均是B,相对丰度超过80%,冷季优势功能群演变为B和D。水库区共鉴定出8个优势浮游植物功能群:B、C、D、J、Lo、P、S1、Y。其中功能群B、P、D的优势度相对较大,相对丰度平均值分别是50.49%、42.13%和36.61%(图4)。不同水库的浮游植物功能群季节性演替特征各不相同,猫跳河的红枫湖水库具有独特的演替规律,主要以功能群S1和D为绝对优势功能群,代表物种分别是假鱼腥藻和针杆藻。三岔河的平寨水库以B、C、P为季节性演替功能群;普定水库和引子渡水库主要以B、P、D、Lo为主要浮游植物演替功能群,B功能群主要在10月占优势,拟多甲藻为代表物种的功能群Lo在7月出现短时间甲藻水华现象,功能群P则集中出现在冬季。

2.2.2 浮游植物功能群在库区垂直剖面上的变化特征

4座水库的浮游植物功能群在垂直剖面上存在显著差异(图5),浮游植物功能群细胞丰度都随着水深的增加而降低,且浮游植物主要生长在水深5m以上,在5m处的细胞丰度最高。红枫湖水库主要优势功能群为S1和D,以蓝藻门的假鱼腥藻为代表物种的功能群S1细胞丰度在阳光充足的表层占据优势,但是相对丰度在剖面上呈递减趋势。平寨

水库垂直剖面上的优势功能群为B,相同季节在垂直剖面上无显著功能群演替。普定水库和引子渡水库浮游植物功能群在垂直剖面的演替规律相似,1月以P为优势功能群,其余季节均以B为优势功能群,且在表层5m以上均出现过功能群Lo。剖面浮游植物功能群丰度的最大值和最小值的差值分别为:红枫湖 $3.60 \times 10^6$  cells/L,平寨水库 $2.78 \times 10^6$  cells/L,普定水库 $2.63 \times 10^6$  cells/L,引子渡 $2.74 \times 10^6$  cells/L,红枫湖在垂直剖面的变化幅度最大;4座水库的功能群丰度的年均值大小依次为红枫湖( $2.30 \times 10^6$  cells/L)>引子渡( $2.11 \times 10^6$  cells/L)>普定( $2.05 \times 10^6$  cells/L)>平寨( $1.72 \times 10^6$  cells/L),红枫湖水库丰度最高,平寨水库最低。

2.2.3 环境因子与浮游植物功能群的线性回归及冗余分析(RDA)分析

本研究调查的相关环境因子概况见表3。对河流区和水库区的环境因子和浮游植物功能群丰度做RDA分析(图6),采用蒙特卡罗显著性检验对物种数据与环境因子进行显著性检验。结果显示,河流区筛选出 $PO_4^{3-}$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ 三个具有显著解释性的环境变量( $F = 1.4$ ,  $P = 0.048$ ),而库区筛选出7个具有显著解释性的环境变量( $F = 8.9$ ,  $P = 0.002$ )。其中河流区排序图轴1和轴2的累计解释率为58.92%(轴1:36.82%;轴2:22.10%),库区排序图轴1和轴2的累计解释率为75.69%(轴1:46.65%;轴2:29.04%)。河流区共筛选 $PO_4^{3-}$ ( $p = 0.044$ )、 $NO_3^-$ ( $p = 0.016$ )、 $NO_2^-$ ( $p = 0.034$ )3个

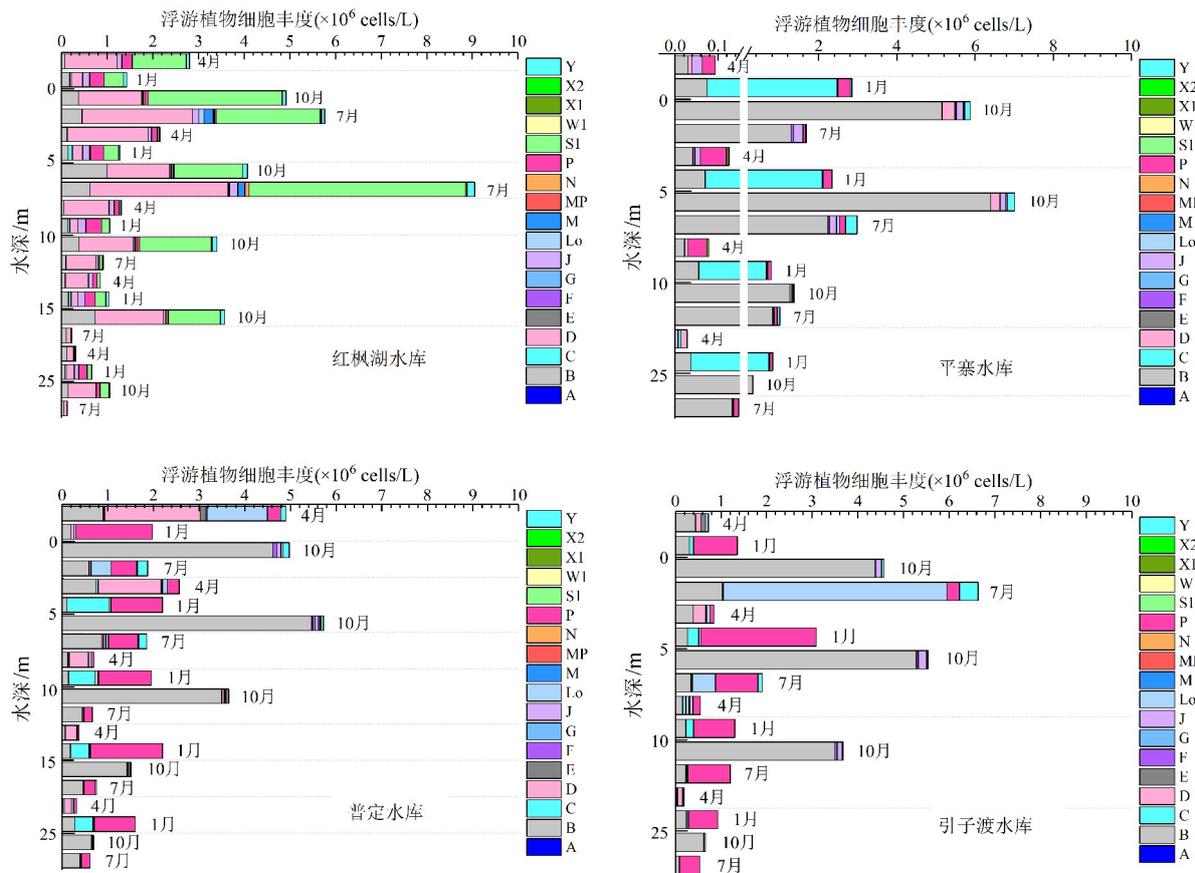


图5 水库浮游植物功能群在垂直剖面上的变化

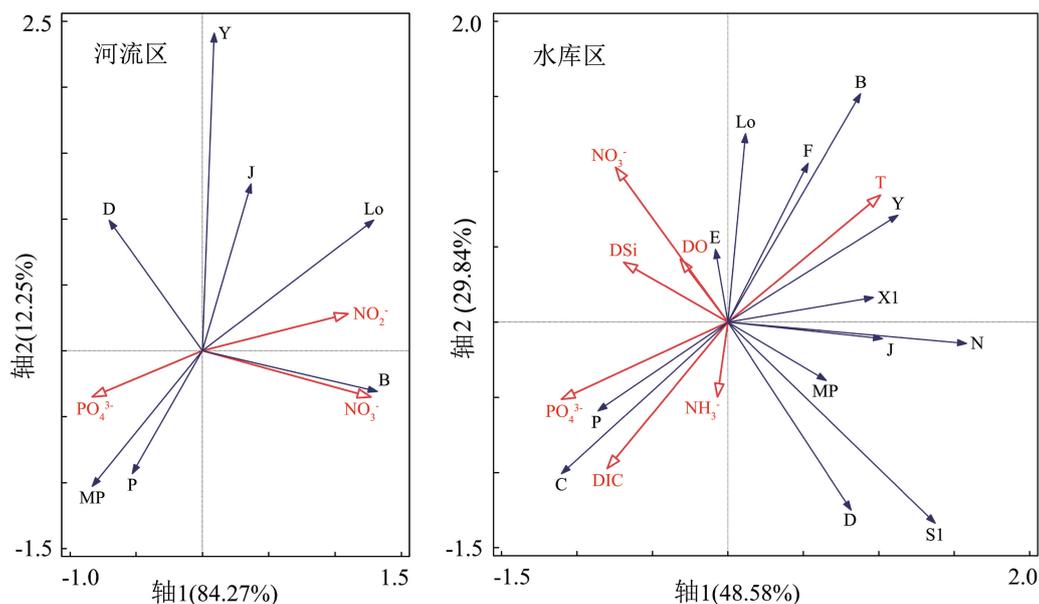
Fig.5 The vertical variation of phytoplankton functional groups in the different reservoirs

表3 入库河流及水库的环境因子统计表

Table 3 The summary of environmental factors in the rivers and reservoirs

mg/L

项目	入库河流				水库				
	HF	PZ	PD	YZD	HF	PZ	PD	YZD	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	范围	0.449~0.005	0.499~0.007	0.434~0.018	0.815~0.004	0.417~0.011	0.695~0.007	0.711~0.029	0.625~0.023
	平均值	0.107±0.117	0.188±0.184	0.126±0.123	0.168±0.291	0.144±0.146	0.199±0.224	0.216±0.261	0.181±0.200
NH <sub>3</sub>	范围	0.450~0.058	0.658~0.067	0.322~0.046	0.107~0.067	0.148~0.083	0.131~0.066	0.133~0.067	0.217~0.058
	平均值	0.132±0.097	0.187±0.213	0.129±0.079	0.088±0.017	0.106±0.021	0.097±0.023	0.096±0.022	0.102±0.047
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	范围	5.691~0.351	4.034~2.799	5.283~2.311	4.669~2.567	1.609~0.387	4.022~2.478	4.767~2.322	3.925~2.423
	平均值	1.780±1.473	3.220±0.387	3.328±0.901	3.207±0.715	0.755±0.354	2.961±0.513	3.162±0.919	2.904±0.527
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	范围	0.106~0.003	0.203~0.009	0.117~0.008	0.081~0.008	0.019~0.003	0.088~0.007	0.051~0.003	0.047~0.003
	平均值	0.031±0.031	0.068±0.067	0.041±0.042	0.036±0.030	0.007±0.005	0.037±0.033	0.018±0.016	0.022±0.019
DSi	范围	2.814~0.041	3.811~1.972	3.365~1.929	2.475~0.0485	0.912~0.005	3.531~1.185	2.285~0.094	1.528~0.081
	平均值	1.581±0.803	2.546±0.599	2.766±0.468	1.542±0.702	0.405±0.367	2.031±0.811	1.331±0.662	0.855±0.635
DIC	范围	3.637~2.475	2.929~2.068	3.363~1.726	3.500~2.123	2.524~1.645	2.491~1.668	2.472~1.374	2.311~1.311
	平均值	2.953±0.353	2.462±0.257	2.428±0.551	2.591±0.563	2.132±0.265	2.037±0.309	1.989±0.354	1.878±0.409
温度/°C	范围	23.825~5.585	18.68~12.70	21.49~11.923	21.15~13.595	25.06~10.438	21.34~13.128	24.30~12.067	25.23~13.954
	平均值	16.673±6.299	16.35±2.379	17.35±3.328	17.76±3.013	18.73±5.319	17.56±3.189	18.77±4.491	19.86±4.208
pH	范围	8.19~7.41	8.330~7.690	8.340~7.680	7.930~7.650	8.810~7.330	8.640~7.770	8.600~7.890	8.590~7.780
	平均值	7.81±0.237	8.050±0.202	8.040±0.190	7.837±0.074	8.138±0.515	8.133±0.292	8.229±0.204	8.326±0.283
DO	范围	10.25~1.390	9.820~6.490	9.380~7.010	9.140~6.920	12.23~1.490	10.95~5.940	13.04~8.270	16.35~8.460
	平均值	7.248±2.238	8.605±1.065	8.381±0.598	8.308±0.847	7.235±3.532	8.107±1.544	9.735±1.388	10.04±2.506



红色箭头表示环境因子;黑色箭头表示浮游植物功能群丰度

图 6 优势浮游植物功能群丰度与环境因子的冗余分析

Fig.6 Redundancy analysis of dominant phytoplankton functional groups and related environmental factors

具有显著解释性的环境变量,可看出主要优势功能群 MP 和 B 主要受这 3 个环境因子的影响。库区除去 pH 和  $\text{NO}_2^-$  之外的所有环境变量均具有显著的解释性,其中温度、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、DIC、DSi、 $\text{NO}_3^-$  等环境变量对功能群的解释性最为显著 ( $P < 0.002$ ),轴 1 的特征值最大为 0.62,说明轴 1 能解释多数的浮游植物分布,而与轴 1 显著正相关的只有环境因子温度,说明温度是影响库区功能群分布的主要因素,而这些功能群与浮游植物生长所需的主要营养盐  $\text{PO}_4^{3-}$ 、DIC、DSi、 $\text{NO}_3^-$  等呈显著负相关,说明游植物生长过程中消耗了这些营养元素。

基于浮游植物功能群细胞丰度和环境因子之

间的逐步多元回归分析结果(表 4)发现,河流区主要优势浮游植物功能群 B、D、MP 都筛选出了主要环境影响因子,绝对优势功能群 B 主要受营养盐  $\text{PO}_4^{3-}$  和  $\text{NO}_3^-$  影响,而优势功能群 MP 主要受温度和营养盐  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  的影响,但 3 个功能群的逐步回归相关系数(依次为 0.163, 0.228, 0.144)均较低,暗示营养盐不是影响河流浮游植物功能群分布的主要环境因子。水库区共 6 个优势功能群(B、C、D、Lo、P、S1)筛选出了主要环境影响因子,逐步回归相关性系数(依次为 0.448、0.321、0.440、0.504、0.497、0.380)均比河流区大,其中温度是主要的环境影响因子,除与功能群 P 呈显著负相关外,温度

表 4 水库和河流区域浮游植物功能群丰度与环境因子逐步回归分析

Table 4 Stepwise multiple regression between abundance of phytoplankton functional groups and environmental factors in the rivers and reservoirs

采样区域	优势功能群(y)	筛选出变量(x)	逐步回归方程	$R^2$	P
河流区	B	$\text{NO}_3^-(x_1), \text{PO}_4^{3-}(x_2)$	$y = 0.289x_1 - 0.256x_2 + 0.107$	0.163	0.024
	D	$\text{pH}(x_1), \text{DSi}(x_2)$	$y = 0.351x_1 - 0.329x_2 - 3.56$	0.228	0.002
	MP	$\text{NH}_4^+(x_1), T(x_2), \text{NO}_2^-(x_3)$	$y = 0.486x_1 - 0.374x_2 - 0.361x_3 - 0.988$	0.144	0.027
水库区	B	$\text{DIC}(x_1), \text{PO}_4^{3-}(x_2)$	$y = -0.591x_1 - 0.199x_2 + 7.952$	0.448	0.035
	C	$\text{PO}_4^{3-}(x_1)$	$y = 0.558x_1 - 0.082$	0.312	3.484 4E-7
	D	$T(x_1), \text{NO}_3^-(x_2)$	$y = 0.423x_1 - 0.621x_2 + 0.157$	0.440	0.000 022
	Lo	$\text{NH}_4^+(x_1), \text{NO}_3^-(x_2), T(x_3)$	$y = -0.512x_1 - 0.441x_2 + 0.244x_3 - 2.119$	0.504	0.006
	P	$T(x_1), \text{PO}_4^{3-}(x_2)$	$y = -0.334x_1 + 0.310x_2 - 0.490$	0.497	0.005
	S1	$T(x_1), \text{NO}_3^-(x_2)$	$y = 0.451x_1 - 0.541x_2 - 0.204$	0.380	0.000 017

与功能群 D、Lo、S1 均存在显著正相关。从回归方程中环境变量系数可看出,功能群 B 主要受 DIC 的影响,而  $\text{PO}_4^{3-}$  均是影响功能群 C 和 P 重要环境因子,Lo 主要受  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的影响,蓝藻门的功能群 S1 主要受温度和  $\text{NO}_3^-$  的影响。

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物功能群结构组成特征

梯级筑坝形成河流和水库两个不同的水生态系统,由于这两个生态系统水文水生态环境的差异,导致浮游植物组成在这两个生态系统中存在不同的动态变化规律。本研究中,河流区域的硅藻门占据了绝对优势,出现的 10 种功能群中只有 7 种的出现频率超过 20%,其中以适应浅水且浊度较高的功能群 B 和 MP 为主要优势功能群,代表物种为广生型小环藻和附生型扁圆卵形藻<sup>[14]</sup>。功能群 MP 主要出现在红枫湖水库、普定水库以及平寨水库的入库河流,红枫湖入库河流的优势度最高,且主要出现在冷季 1 月和 4 月。功能群 B 在所有河流体系中均占有一定优势度,不同季节均有分布,但主要生长在暖季 7 月和 10 月,在红枫湖水库支流上的优势度明显低于 MP。这一点验证了功能群 B 是广生型藻类,对温度的适应范围大,也证实功能群 MP 适应经常搅动的浅水河流生境<sup>[12]</sup>。

水库区浮游植物组成与河流区显著不同,且不同水库间存在显著差异。研究库区共鉴定出 17 种功能群,其中出现频率大于 20% 的有 11 种,显著高于河流区域,这是因为筑坝拦截以后增加了水库水体滞留时间、营养盐累计效率以及引起水库的热力学分层等湖沼学效应,从而促进浮游植物快速繁殖,增加了库区浮游植物的多样性<sup>[20-22]</sup>。三岔河的 3 座水库除平寨水库以外,普定水库和引子渡水库具有相似的功能群组成特征,主要演替功能群为 B/P/Lo/D,这些功能群均适应中到富营养水体,说明普定水库和引子渡水库富营养化程度高,水生态系统结构及物质循环过程相似,而上游新建的平寨水库主要代表功能群为 B/C/P,群落多样性低,均以适应高透明度水体的小环藻为主。猫跳河上的红枫湖水库浮游植物功能群组成最为独特,平均水深浅,水体滞留时间长,主要代表功能群为 S1/D,其中指示富营养化水体的功能群 S1 占据绝对优势,代表物种为蓝藻门的假鱼腥藻,说明红枫湖的富营养化程度较高<sup>[23]</sup>。

浮游植物功能群组成在水库垂直剖面上差异显著,优势功能群主要生长在 5 m 以上,在水深 5 m 以下生物量逐渐降低,这是因为垂直剖面的水温和光照强度随水深的增加而降低,限制了浮游植物光合作用,水温高和光照充足的表层是符合浮游植物生长的适应性生境<sup>[24]</sup>。且由于季节性温度的变化和营养水平的不同,水库垂直剖面的浮游植物功能群结构组成在季节上也存在差异,但水深 5 m 以上的功能群结构组成变化较为明显。

#### 3.2 河流水库化过程中浮游植物功能群演替的环境驱动因素

浮游植物功能群组成与水生态环境是相对应的。浮游植物功能群结构组成的动态变化是水动力学过程、营养盐含量、光照条件、水库热力学分层以及浮游植物生理适应特征等物理、化学和生物因素相互作用的结果,这些环境因子的综合改变成为浮游植物演替的选择性机制,且浮游植物在适应生境变化的过程中也调节水生态系统中的物质循环过程<sup>[25-27]</sup>。

RDA 分析结果表明,影响河流和水库两种不同水生态系统浮游植物生长的环境因素有显著差异。河流区的优势功能群 B、MP 主要受到  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  的影响,但逐步多元回归方程的拟合优度值  $R^2$  都普遍偏低,说明这些环境因子不完全是浮游植物功能群组成变化的主要影响因素;MP 类群能适应频繁扰动的浊水态无机型浅水河流水体,而 B 功能群的适应生境广泛,也常分布于河流水体,原因是这两种功能群的表面积较大且有较厚的硅壳,能适应快速流动的河流水体环境,这与本研究结果一致<sup>[28-29]</sup>,因此还需要进一步研究水体流速对河流浮游植物的影响。水库区域的优势功能群 B、C、D、P、Lo、S1 受营养盐的影响较河流区显著,除 pH 和  $\text{NO}_2^-$  以外,其他环境因子均对库区浮游植物功能群分布有显著影响,且逐步多元回归分析结果显示主要优势物种与环境因子之间的回归方程拟合优度值  $R^2$  均较高,说明库区浮游植物功能群对温度及营养盐变化有显著影响。其中红枫湖水库的主要优势功能群为 D 和 S1,D 功能群对营养盐耗尽敏感,有较高的光合辐射耐受性<sup>[30]</sup>,代表物种为针杆藻,而 S1 功能群适应生长在富营养化混合水体,耐高温和光照,代表物种为具有固氮作用的异形胞的假鱼腥藻<sup>[12,31]</sup>,主要优势功能群 D 和 S1 类群均主要受温度和  $\text{NO}_3^-$  影响,从回归系数看出丰度与温度呈显著

正相关,和  $\text{NO}_3^-$  呈显著负相关,说明氮源作为红枫湖水库浮游植物生长的重要营养元素,在温度升高促进浮游植物生长的过程中加速了对氮源的利用。三岔河三座水库的主要优势功能群为 B、C、P、Lo、B 类群和 DIC,  $\text{PO}_4^{3-}$  呈显著负相关,这是因为功能群 B 的优势度大,年均生物量最高,其在光合作用过程中吸收  $\text{HCO}_3^-$  导致 DIC 含量降低,调控库区碳循环。而且还发现三座水库的主要优势功能群丰度均与  $\text{PO}_4^{3-}$  呈显著负相关,说明磷元素是这三座水库浮游植物生长的重要营养元素。以甲藻为代表物种的功能群 Lo 主要出现在普定水库和引子渡水库的表层水体,结果与胡月敏等<sup>[32]</sup>的研究一致。已有研究发现甲藻常生长在贫到富营养水体,最适宜生长温度为 13 °C 左右,甲藻具有鞭毛结构,促使甲藻能垂直迁移,比其他物种更具趋光性优势<sup>[33-34]</sup>,因此普定水库和引子渡水库的甲藻主要出现在 4 月份,且主要分布在表层水体。

## 4 结论

1) 研究区域河流区浮游植物功能群季节性演替规律基本相似,以功能群 MP、B、D 的交替变化为主;而库区的演替变化在不同水库之间有显著差异,其中猫跳河的红枫湖水库以功能群 S1、D、P 为主要演替物种,平寨水库以功能群 B、C、P 为主要演替物种,而普定水库和引子渡水库的群落结构相似,均以功能群 B、D、P、Lo 为主要演替物种。

2) RDA 分析结合逐步多元回归分析结果显示,河流区功能群受营养盐影响不显著,而库区浮游植物功能群动态变化主要受温度以及 DIC、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  等环境因子的影响,其中红枫湖水库优势功能群丰度与  $\text{NO}_3^-$  呈显著负相关。三岔河的平寨水库,普定水库以及引子渡水库优势功能群丰度均与 DIC、 $\text{PO}_4^{3-}$  呈显著负相关。

## 参 考 文 献

- [1] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers[J]. *American Journal of Science*, 1982, 282(4): 401-405.
- [2] Lehner B, Liermann C R, Revenga C, et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9): 494-502.
- [3] Carey J C, Fulweiler R W. Human activities directly alter watershed dissolved silica fluxes[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1-3): 125-138.
- [4] Hughes H J, Bouillon S, André L, et al. The effects of weathering variability and anthropogenic pressures upon silicon cycling in an intertropical watershed (tana River, Kenya)[J]. *Chemical Geology*, 2012, 308/309(2): 18.
- [5] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*[J]. *Science (New York, N.Y.)*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [6] Song X, Huang L, Zhang J, et al. Variation of phytoplankton biomass and primary production in Daya Bay during spring and summer[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 49(11): 1036-1044.
- [7] 向鹏,王仕禄,卢玮琦,等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究[J]. *地球与环境*, 2016, 44(5): 492-501.
- [8] 李惠男. 北盘江梯级水库浮游植物群落特征及水环境评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2018.
- [9] 邓浩俊,陶贞,高全洲,等. 河流筑坝对生源物质循环的改变研究进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(12): 1237-1247.
- [10] Cardinale B J, Palmer M A, Collins S L. Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecific facilitation[J]. *Nature*, 2002, 415(6870): 426-429.
- [11] 陈姝,郭照冰,方华,等.  $\text{CO}_2$  浓度升高对湖泊浮游藻类与浮游细菌耦合关系的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(7): 2209-2216.
- [12] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton[M]. England: Cambridge University Press, 2006: 20-42.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 418-428.
- [16] 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子[J]. *水生生物学报*, 2013, 37(5): 836-843.
- [17] Padišak J, Crossetti L, 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.
- [18] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] Reynolds C S. Phytoplankton periodicity: The interactions of form, function and environmental variability[J]. *Freshwater Biology*, 1984, 14(5): 111-142.
- [20] 王崇. 红水河流域梯级水库夏季浮游植物群落结构特征[J]. *水生态学杂志*, 2014, 35(6): 75-80.

- [21] 刘丛强. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. 长江资源与环境, 2009, 14(4): 385-396.
- [22] 申恒伦. 三峡水库香溪河流域梯级水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 197-205.
- [23] 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.
- [24] 田泽斌, 刘德富, 姚绪姣, 等. 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2014(5): 700-707.
- [25] Zhu K, Bi Y, Hu Z. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China[J]. The Science of the Total Environment, 2013, 450/451(2): 169-177.
- [26] 于晨, 张萌, 陈宏文, 等. 仙女湖及入湖河流浮游植物功能类群与环境因子的相互关系[J]. 水生生物学报, 2018, 42(3): 622-634.
- [27] 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[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3604-3611.
- [28] Reynolds C S. The long, the short and the stalled: On the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers[J]. Hydrobiologia, 1994, 289(1-3): 9-21.
- [29] 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[J]. 环境科学研究, 2016, 29(5): 680-691.
- [30] Salmaso N, Naselli-Flores L, Padišák J. Functional classifications and their application in phytoplankton ecology[J]. Freshwater Biology, 2015, 60(4): 603-619.
- [31] Berman-Frank I, Lundgren P, Falkowski P. Nitrogen fixation and photosynthetic oxygen evolution in cyanobacteria [J]. Research in Microbiology, 2003, 154(3): 64-157.
- [32] 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.
- [33] 吴兴华, 李翀, 陈磊, 等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻(Peridiniopsis)的昼夜垂直迁移行为对碳磷分布的响应[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 121-129.
- [34] 汤宏波, 胡圣, 胡征宇, 等. 武汉东湖甲藻水华与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2007, 19(29): 632-636.

## Succession of Phytoplankton Functional Groups in the Wujiang River-reservoir System and Its Environmental Impact Factors Identification

XIAO Jing<sup>1</sup>, WANG Baoli<sup>1</sup>, ZHANG Haitao<sup>1</sup>, SHI Jie<sup>1</sup>, QIU Xiaolong<sup>1</sup>, LIU Taoze<sup>2</sup>

(1. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** A dam can block the continuous stream and affect the original ecosystem of the river. In order to understand how the dam affects the composition of phytoplankton functional groups, water and phytoplankton samples were collected seasonally in streams and reservoirs on the river to analyze the phytoplankton functional group succession and its relationship with environmental factors. The results showed that there were 6 species in the river ecosystem whose occurrence frequency were more than 20% and their dominated functional groups were B\MP, while there were 11 species in reservoir ecosystems whose occurrence frequency were more than 20% and their functional group compositions showed significant spatial heterogeneity, the S\VD was the predominant functional group in the Hongfenghu reservoir, the B\C was dominant functional group in the Pingzhai reservoir, and the B\D\P\Lo was the dominate functional group in Yinzidu and Puding reservoirs. The redundancy analysis (RDA) combined with the stepwise multiple linear regression analysis showed that nutrients had no significant effect on the composition of phytoplankton functional group in the river ecosystems. However, the dynamic changes of phytoplankton functional group in reservoirs were mainly affected by temperature, DIC,  $\text{NO}_3^-$ , and  $\text{PO}_4^{3-}$ . The study also found that the abundance of dominant functional group correlated significantly negatively with  $\text{NO}_3^-$  in the Hongfenghu reservoir but with DIC and  $\text{PO}_4^{3-}$  in other three reservoirs on the Sanchahe river.

**Key words:** damming; reservoir; phytoplankton functional groups; environmental factors; Wujiang River