

DOI: 10.5846/stxb201312253027

黄国佳, 李秋华, 陈椽, 商立海, 张垒, 欧滕, 高廷进, 李钊, 邓龙. 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): - .

Huang G J, Li Q H, Chen C, Shang L H, Zhang L, Ou T, Gao T J, Li Y, Deng L. Phytoplankton Functional Groups and their Spatial and Temporal Distribution Characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

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

黄国佳^{1,2}, 李秋华^{2,*}, 陈 椽¹, 商立海³, 张 垒², 欧 滕², 高廷进², 李 钊², 邓 龙²

1 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001

2 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

3 中科院地球化学研究所环境地球化学重点实验室, 贵阳 550002

摘要: 为了解贵州高原水源红枫湖水库的浮游植物功能类群及其时空分布特征, 于 2012 年至 2013 年枯水期(11 月)、平水期(4 月)、丰水期(7 月)对红枫湖浮游植物与水体进行分层采样分析。研究表明, 水库浮游植物可分为 25 个功能群, 其中 S1、F、J、B、D、S2、Y、L_M 是红枫湖主要代表性功能群, 而 W1、A、W2、K、X3 出现频率较低, 主要功能群生境特征都适应于中富营养水体, S1 适应于透明度较低、混合程度较高的中富营养水体, F 适应于深层混合的中至富营养湖泊, J 适应于混合的高富营养浅水水体, B 对分层敏感适应于中营养水体; 各采样点主要浮游植物功能群季节变化大体相同, 枯水期、平水期各采样点功能群较少, 丰水期功能群最为丰富; 水温是影响红枫湖浮游植物功能类群分布变化的主要因子; 浮游植物生长策略变化规律为: 枯水期 CR/R/S 策略藻种→平水期 R/CR/CS 策略藻种→丰水期 R/CR/CRS/C 策略藻种, 水体浮游植物优势功能群在物质供给、能量输入均较理想的条件下能充分生长, 随着能量限制程度的增加而较其他类群更具耐受性; 通过浮游植物功能群与水体环境相互关系可以得出: 红枫湖水体处于中富营养状态。

关键词: 浮游植物; 功能群; 时空分布; C-R-S 生长策略; 红枫湖

Phytoplankton Functional Groups and their Spatial and Temporal Distribution Characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province

HUANG Guojia^{1,2}, LI Qiuhua^{2,*}, CHEN Chuan¹, SHANG Lihai³, ZHANG Lei², OU Teng², GAO Tingjin², LI Yue², DENG Long²

1 School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

3 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: Hongfeng Reservoir is located at Guizhou Province, which has the most widely distributed and the most complex types of karst. The reservoir is one of the sources for drinking water for Guiyang city. Besides, it has many other functions, such as agricultural irrigation, flood control, and tourism. Management of the eco-environment and water resources of this reservoir are important for sustainable development of this area. This study identified functional groups of phytoplankton to

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 前期(2012CB426506); 国家自然科学基金(41163005); 贵州省科技厅(黔科合人才团队(2013)4024, 黔科合区域合[2013]7005 号); 贵州省教育厅(黔教合 KY 字[2013]113)

收稿日期: 2013-12-25; 网络出版日期: 2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiuhua2002@126.com

understand the distribution patterns of the Hongfeng Reservoir, which is different from the traditional approach of community identification. Phytoplankton and water samples were collected in dry period (November 2012), level period (April 2013), and flood period (July 2013). In total, 25 functional groups of phytoplankton were identified, wherein, the groups S1, F, J, B, D, S2, Y, and L_M were comparatively common functional groups, and the groups W1, A, W2, K, and X3 were less common. Habitat characteristics of the main functional groups that are adapted to the eutrophication of water bodies included codon S1 habitat template: turbid mixed environments, codon F habitat template: clear, deeply mixed meso-eutrophic lakes, codon J habitat template: shallow, mixed, highly enriched systems (including many low-gradient rivers), codon B habitat template: mesotrophic small- and medium-sized lakes with species sensitive to the onset of stratification. The seasonal changes among the three sampling sites were generally the same. During dry period and level period of phytoplankton functional groups of each site is less, the plentiful functional group of the largest number in the wet period. The dry period, level period, and wet period have 16, 19, and 22 function groups, respectively. The main representative functional groups are J/B/P for dry period, S1/J/B/F for average water season, and S1 (dominant functional group)/D/J for wet period. Phytoplankton functional groups changed at depth of 6 m for Jiangjunwan and Houwu, and at depth of 10 m for Dam. In addition, the analysis of changes in the environmental factors suggested that water nutrient is no longer the limiting factor for the phytoplankton growth, and that water temperature is the most important factor influencing the spatial and temporal distribution of the phytoplankton functional groups. The strategy of the phytoplankton growth followed the law: CR/R/S in dry period → R/CR/CS in level period → R/CR/CRS/C in wet period (C means Competitors; R means Ruderals; S means Stress-tolerators). Phytoplankton functional groups can grow well under ideal conditions of material supply and energy input. The phytoplankton functional groups increased with the increase in the degree of energy restriction and were more tolerant than other groups. It could be concluded that Hongfeng Reservoir is in the meso-eutrophic state based on the correlation of phytoplankton functional groups and aquatic environment.

Key Words: Phytoplankton; Functional groups; Spatial and temporal distribution; C-R-S strategy; Hongfeng Reservoir

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和快速地反映水环境的变化^[1]。浮游植物功能分组是由 Reynolds 等^[2] 2002 年提出,Padisák 等^[3] 2009 年补充完善形成的重要理论,在浮游植物生态学中成为研究的热点问题^[4-10]。浮游植物功能分组以浮游植物生理生长特征及其环境适应性机制为基础,在浮游植物生长的 C-R-S 策略分类基础上,对具有相同适应性特征的浮游植物种类进行分组,形成面向浮游植物群落生态属性的功能类别,便于更直接阐释生境变化对浮游植物集群的选择机制^[2,9,10]。

本研究基于对红枫湖浮游植物的研究近况,结合功能群分类特征首次对红枫湖浮游植物进行功能群划分并研究其分布特征。红枫湖位于贵州中部,湖面地理坐标东经 106°19′—106°28′,北纬 26°26′—26°35′,蓄水面 57.2 km²,库容 6.01 亿 m³,最大水深为 45 m,平均水深 10.52 m,是贵州高原最大的喀斯特人工湖泊,也是贵阳市饮用水源之一。对贵州省水库的浮游植物群落生态研究,一直沿用传统的群落分类方法,根据浮游植物分类性质来分析优势种的组成及其季节动态变化^[11,12],传统方法较为繁琐工作量大,对研究者分类水平的要求也相对较高,计算的误差也比较大,不能充分说明水体状况与浮游植物的相互关系,对各种浮游植物群落适应怎样的环境和水体环境对浮游植物群落变化将产生怎样的影响都欠缺分析依据和预测能力。而功能类群将生境与浮游植物群落演替动态结合起来,能有效的反应和预测水体中优势浮游植物功能类群^[13,14]。本研究将浮游植物功能分组运用到红枫湖的浮游植物群落时空变化中,从红枫湖浮游植物生长策略了解其对水体能量和物质的需求情况,探究浮游植物群落分组的时空分布特点,及影响浮游植物优势功能类群分布的主要环境因子,为贵州高原水库浮游植物研究及水资源管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置

2012 年 11 月—2013 年 8 月分别在枯水期,平水期,丰水期进行 3 次分层采样。根据《湖泊富营养调查规范》以及结合红枫湖水域特点设置 3 个采样点(图 1),分别为将军湾(JiangJunWan)(N26°29′12.26″, E106°24′50.79″),后午(Hou Wu)(N26°30′12.08″, E106°25′18.34″),大坝(Dam)(N26°32′34.23″, E 106°25′28.56″)。全文中 Dam、JJW、HW 分别表示三个采样点大坝、将军湾、后午。

1.2 样品的采集,处理与鉴定方法

浮游植物定性样品用 25#浮游生物网于水平及垂直方向“∞”字形缓慢拖网,拖网时间视浮游植物多少而定,将网垂直提出水面,打开闸阀用 100 mL 标本瓶接定性样品,然后用福尔马林固定。浮游植物定量样品在每层采取 1.5 L 水,用福尔马林固定,于实验室摇匀后静置沉淀 24—48 h 后利用虹吸法进行浓缩,镜检计数^[15]。

1.3 理化因子分析方法

水质参数包括温度、溶解氧、pH 值等用便携式 YSI 型水质仪现场测定;用赛氏盘现场目测水体透明度。营养盐浓度在实验室内按地表水环境质量标准 GB 3838-2002 分析方法测定总磷(Total Phosphorus, TP),总氮(Total Nitrogen, TN),硝酸盐(Nitrate, NO₃-N),亚硝酸盐(Nitrite, NO₂-N),氨氮(Ammonia Nitrogen, NH₄-N),正磷酸盐(Orthophosphate, PO₄-P)。浮游植物叶绿素 a(Chlorophyll a, Chla)采用经过 0.45 μm 的纤维滤膜抽滤 200—500 ml,反复冻融后,运用丙酮萃取方法测定^[16]。

1.4 数据分析方法

本文中浮游植物与环境因子垂直分布的关系采用 Surfer8.0 分析画等值线图,浮游植物丰度与环境因子之间的相关性分析用 SPSS 18.0,环境因子的主成分分析采用软件 CANOCO4.5 进行分析,其他图表均用 Excel 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 浮游植物功能群分组

2.1.1 红枫湖水库浮游植物组成

三个水情期,三个采样点共检出 7 门 102 种(属),绿藻门(Chlorophyta)种类数最多 61 种(属),约占总种数的 59.80%;蓝藻门(Byanobacteria)15 种(属),占总种类数的 14.71%;硅藻门(Bacillariophyta)20 种(属),占总种类数的 19.61%;甲藻门(Pyrrophyta)2 种(属),占总种类数的 1.96%;隐藻门(Cryptophyta)1 种(属),占总种类数的 0.98%;金藻门(Chrysophyta)1 种(属),占总种类数的 0.98%;裸藻门(Euglenophyta)2 种(属)占总种类数的 1.96%。红枫湖浮游植物丰度组成表现出明显的季节更替,浮游植物丰度为枯水期<平水期<丰水期,在枯水期和平水期以绿藻门浮游植物细胞丰度最高;到丰水期以蓝藻门丰度占最大百分比。三个时期均为后午采样点丰度最高分别为 0.95×10^6 cells/L, 1.74×10^6 cells/L 和 69.32×10^6 cells/L;枯水期和平水期均为大坝点浮游植物细胞丰度最低分别为 0.53×10^6 cells/L 和 0.61×10^6 cells/L;丰水期丰度最低点出现在将军湾为 37.34×10^6 cells/L(图 2)。

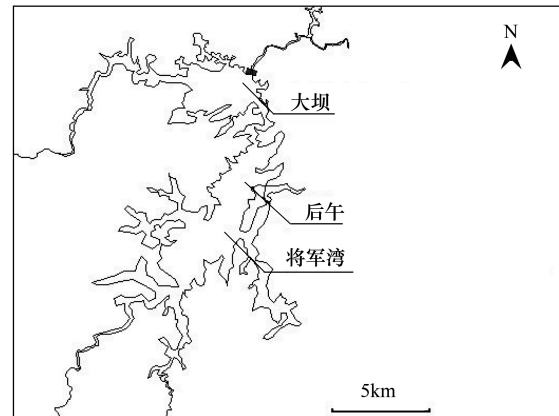


图 1 红枫湖样点设置图

Fig.1 Sampling sites in Hongfeng Reservoir

2.1.2 红枫湖浮游植物功能分组及其生长策略划分

采用 Reynolds 等^[2],Padisák 等^[3]提出的功能群分类方法对所检出浮游植物进行分类,可分为 25 个功能群 A,B,C,D,E ,F ,G ,J ,L_M,L_O,M,MP,P,S₁,S₂,S_N,T,W₁,W₂,X₁,X₂,Y,K,X₃,H₁。频率分析发现(图 3),功能群 A,B,D,J,F,MP,X₁,L_O,L_M,S₁,Y,T,G,X₂,P,S₂,C,E 在红枫湖三个水情期中较为常见,而 W₁,A,W₂,K,X₃ 出现频率较低,而 H₁ 组的藻种在定量样品中未被检出。各浮游植物功能群的代表性藻种(属)及其 C-R-S 生长策略见表 1,其中 C 型—竞争者(Competitors,)、R 型—杂生者(Ruderals,)、S 型—环境胁迫的耐受者(Stress-tolerators,)。

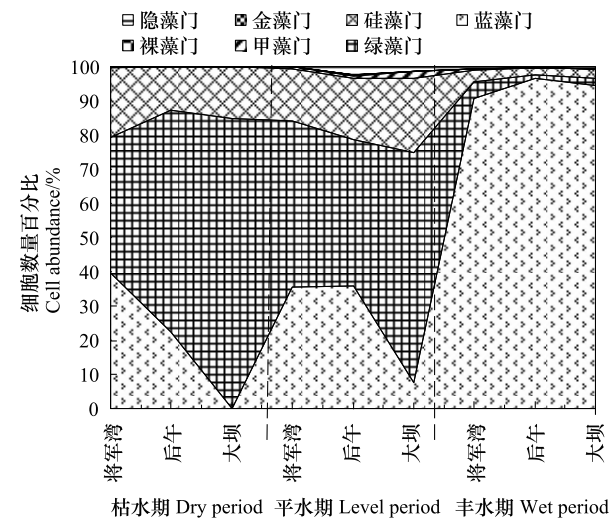


图 2 三个水情期各采样点浮游植物相对丰度
Fig. 2 Three Water-Regime Period Relative Abundance of Phytoplankton at each Sampling Point

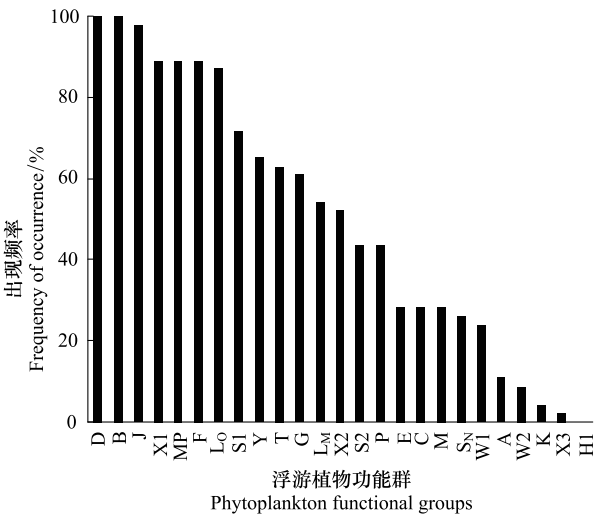


图 3 浮游植物功能群频率分布
Fig.3 Frequency distribution of functional groups

表 1 浮游植物功能群的代表性藻种及其 C-R-S 生长策略

Table 1 Phytoplankton functional groups and their growth strategies					
功能群 Functional groups	代表性藻种(属) Tpical representatives	生长策略 Growth strategies	功能群 Functional groups	代表性藻种(属) Tpical representatives	生长策略 Growth strategies
A	根管藻 <i>Rhizosolenia</i> sp.	R	Y	隐藻 <i>Cryptophyta</i>	CRS
B	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	CR	T	并联藻 <i>Quadrigula</i> sp.	R
C	华丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	R	G	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	CS
D	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	R	X ₂	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.	C
J	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp., 盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp., 空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.	CR	P	角星鼓藻 <i>Staurostrum</i> sp., 脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	R
F	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp., 蹄形藻 <i>Kirchneriella</i>	CS	S _N	尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> sp.	R
MP	舟形藻 <i>Navicula</i> sp., 曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.	CR	W ₁	裸藻 <i>Euglenophyta</i> sp.	R/CS
X ₁	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	C	W ₂	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.	R/CS
L ₀	甲藻 <i>Pyrrophyta</i> , 色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	S	K	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.	CS
L _M	蓝纤维藻 <i>Dactylocopsis</i>	S	S ₂	拟柱孢藻 <i>Cylindropermopsis</i> sp.	R
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	S	E	锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.	CS
S ₁	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	R	X ₃	布纹藻 <i>Gyrosigma</i> sp.	

2.2 浮游植物功能群时空分布特点

2.2.1 浮游植物功能群季节分布特征

通过功能群生物量相对丰度的排序,选择生物量相对丰度超过 10% 以上功能群组合或绝对占优(相对丰

度超过 50%) 的功能群代表该样品的浮游植物功能群。枯水期功能群 16 个分别为:K, J, X3, D, P, G, L_M, L_O, M, MP, P, S1, S2, T, W1, X1。平水期功能群 19 个分别为: M, MP, X3, B, C, D, E, F, G, H1, J, L_M, L_O, P, S1, T, X1, X2, Y。丰水期功能群 22 个分别为: M, L_M, S1, S2, L_O, M, MP, X1, J, P, F, G, E, A, B, C, D, T, S_N, W1, W2, X2, Y。三个采样点将军湾, 后午, 大坝三个水情期功能群分布特征图(图 4) 可看出将军湾采样点功能群分布序列是: 枯水期 J/B/MP/S1→平水期 S1/J/B/MP→丰水期 S1/J/B/D; 由枯水期占优势的 J/B(栅藻, 盘星藻, 小环藻) 功能群变化到平水期主要功能群 S1/J(假鱼腥藻, 栅藻) 再到丰水期占绝对优势的 S1(假鱼腥藻); 根据浮游植物生长策略划分, 水库浮游植物生长策略季节分布规律为: 枯水期 CR/S/R 策略藻种→平水期 R/CR/CS 策略藻种→丰水期 R/CR/CRS 策略藻种。

后午采样点功能群分布序列是: 枯水期 J/B/MP/L_O→平水期 S1/J/B/F→丰水期 S1/S2/D/J/B。由枯水期占优势的 J/B(栅藻, 盘星藻, 小环藻) 功能群转变到平水期主要功能群 S1/J/B(假鱼腥藻, 栅藻, 小环藻) 再到丰水期占绝对优势的 S1(假鱼腥藻)。根据浮游植物生长策略划分, 水库浮游植物生长策略季节变化规律为: 枯水期 CR/S 策略藻种→平水期 R/CR/CS 策略藻种→丰水期 R/CR/CRS 策略藻种。

大坝采样点功能群分布序列是: 枯水期 J/B/P→平水期 J/F/B/X1→丰水期 S1/D/S2/B/J。由枯水期占优势的 J/B(栅藻, 盘星藻, 小环藻) 功能群到丰水期主要功能群 J/F(栅藻, 盘星藻, 卵囊藻) 再到丰水期占绝对优势的 S1(假鱼腥藻)。根据浮游植物生长策略划分, 水库浮游植物生长策略季节变化规律为: 枯水期 CR/R 策略藻种→平水期 CR/CS/C 策略藻种→丰水期 R/S/CR 策略藻种。

研究发现, 各采样点主要浮游植物功能群的季节变化过程大体相同, 枯水期和平水期各采样点功能群较少, 丰水期功能群最为丰富, 由于图 4 中优势功能群相对丰度比其他功能群相对丰度差距较大, 所以从图中看丰水期功能群数量不是很明显。S1/J/B/MP/F/P 是红枫湖主要代表性功能群; 枯水期主要代表性功能群是 J/B/P, MP/P/S1/G/D/F/L_O 也较为常见; 平水期主要代表性功能群 S1/J/B/F, X1/P/MP 也占较大比重; 丰水期主要代表性功能群是 S1/D/J, 且功能群 S1 占绝对优势。

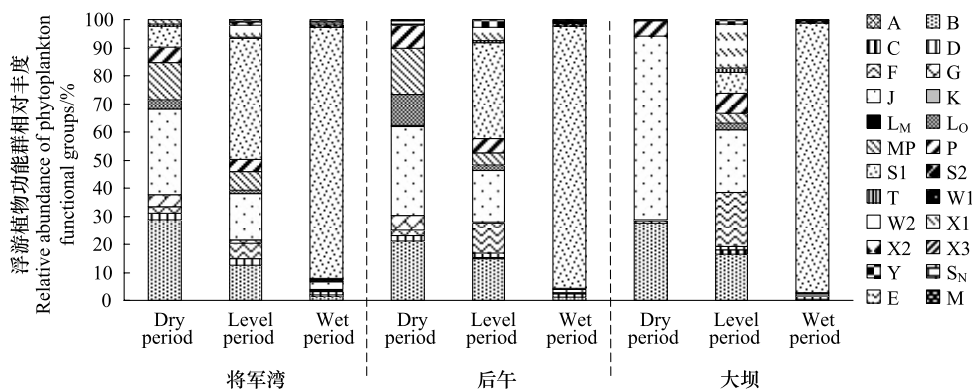


图 4 各采样点各时期浮游植物功能群相对丰度

Fig.4 Each sample point relative abundance of phytoplankton functional groups

2.2.2 浮游植物功能群空间分布特征

研究期间, 红枫湖主要浮游植物功能群结构的时空分布特征(表 2)。从垂直上看 J, B, S1 这三种功能群交替成为将军湾最优的功能群: 枯水期从 S1/J→J/B→J/B→B/J→B/MP, 0.5 m 以 S1 为主, 6 m 以上以功能群 J 为主, 6 m 以下以功能群 B 为主。平水期 0.5 m 以 B 为主, 6 m 以上以功能群 S1 为主, 6 m 以下以功能群 J 为主; 丰水期整个时期都是 S1 功能群占绝对优势。J, L_M, MP, S1 这四种功能群交替成为后午最优的功能群: 枯水期从 0.5 m 以下 J 为主, 6 m 以功能群 L_M 为主, 6 m 以下以功能群 MP 为主。平水期 0.5 m 以 B 为主, 3 m 以上以功能群 S1 为主, 3 m 以下以功能群 J 为主; 丰水期整个时期都是 S1 功能群占绝对优势。J, X1, F, S1 这四种功能群交替成为大坝最优的功能群: 枯水期各层均以 J 为主; 平水期 0.5 m 以 X1 为主, 10 m 以上以功能群

J 为主,10 m 以下以功能群 F 为主;丰水期整个时期都是 S1 功能群占绝对优势。整个水库浮游植物生长策略三个水情期变化规律为:枯水期 CR/R/S 策略藻种→平水期 R/CR/CS 策略藻种→丰水期 R /CR/ CRS/C 策略藻种。

表 2 红枫湖各采样点浮游植物功能群空间分布特征

Table 2 Functional groups at each sampling space distribution

时间/深度 Time/Deep	0.5 m	3 m	6 m	9 m	12 m
将军湾枯水期 JJW- Dry Period	S1/J/T/B	J/B/S1/L ₀	J/L _M /B/MP	B/J/F/P	B/MP/J/P
将军湾平水期 JJW- Level period	B/L _M /D/G	S1/J/B/MP	S1/B/J/P	J/S1/B/MP	J/P/B/MP
将军湾丰水期 JJW- Wet period	S1/J/B/D	S1/J/B/D	S1/J/B/D	S1/B/J/S2	S1/J/B/D
时间/深度 Time/Deep	0.5 m	3 m	6 m	9 m	12 m
后午枯水期 HW- Dry Period	J/B/P/S1	J/B/S1/P	L _M /J/G/B	MP/J/D/P	MP/J/B/P
后午平水期 HW- Level period	S1/B/J/F	S1/MP/J/F	J/S1/P/B	J/S1/B/P	J/S1/B/P
后午丰水期 HW- Wet period	S1/T/S2/G	S1/X1/S2/T	S1/T/S2/X1	S1/S2/T/G	S1/S2/T/X1
时间/深度 Time/Deep	0.5 m	5 m	10 m	15 m	20 m
大坝枯水期 Dam- Dry Period	J/B/P	J/B/P	J/B/P	J/B/P	J/B/P
大坝平水期 Dam- Level period	X1/J/F/P	J/F/B/X1	J/B/X1/F	F/J/B/X1	F/J/B/X1
大坝丰水期 Dam- Wet period	S1/D/L _M /J	S1/D/B/L _M	S1/D/B/S2	S1/S2/D/B	S1/D/S2/J

2.3 环境因子对浮游植物功能群的影响

2.3.1 环境因子的主成分分析

通过对红枫湖水库三个水情期三个采样点的总磷(TP),总氮(TN),氨氮(NH₄-N),硝酸盐(NO₃-N),亚硝酸盐(NO₂-N),正磷酸盐(PO₄-P),水温(WT),叶绿素(Chla),溶解氧(DO),10个环境因子与采样点进行PCA分析。结果表明:红枫湖水库中四个轴的特征值分别为0.454,0.308,0.211,0.013,轴1,2,3为主要排序轴。与轴1相关性较强的主要因子依次为氨氮(NH₄-N),总氮(TN);与轴2相关性较强的主要因子依次为水温(WT),总磷(TP);与轴3相关性较强的主要因子依次为叶绿素a(Chla),溶解氧(DO);其中氨氮(NH₄-N),总氮(TN),水温(WT)对样方分布有较大影响(图5)。

2.3.2 主要环境因子对浮游植物功能群的影响

研究期间各采样点主要环境因子总磷(TP),总氮(TN),氨氮(NH₄-N)的含量及其优势功能群垂直分布情况如图6—8所示。三个采样点在丰水期的TP含量比较高,为0.016—0.038 mg/L,平水期三个采样点TP含量均较其他两个水期含量低,将军湾和后午两个采样点在平水期底层12 m TP含量出现最低,大坝TP含量在平水期20 m出现最低值,枯水期由表层到底层含量逐渐降低。功能群S1,J,B,MP分布于较低浓度的水层(图6)。

TN含量与TP呈现出相似的分布趋势,整个时期TN含量在0.943—1.82 mg/L之间,三个采样点均在丰水期10 m处TN的含量出现高值,将军湾最大值为1.695 mg/L,后午最大值为1.735 mg/L,而大坝采样点在枯水期5 m与20 m两处出现含量高峰,分别为1.820 mg/L和1.800 mg/L,其他时期含量在1.600 mg/L左右(图7)。

NH₄-N在丰水期含量较高,并由表层至底层含量逐渐增加,底层含量最高,将军湾浮游植物功能群MP和大坝浮游植物功能群D,P等在底层丰度较高可能其生长与NH₄-N含量有关。通过对浮游植物丰度与NH₄-N含量进行Pearson相关性分析可得出浮游植物丰度与NH₄-N显著相关($R^2=0.625, P<0.01$)(图8)。功能群结构的时空分布与氮磷含量并不存在明显相关性,仅与NH₄⁺-N含量表现出相关性,这一现象可能与三个时期水体营养状态相近有关。

研究期间,丰水期水温最高,在17.1—26.6℃之间,平均23.8℃,将军湾0.5 m水温达最高;平水期水温在

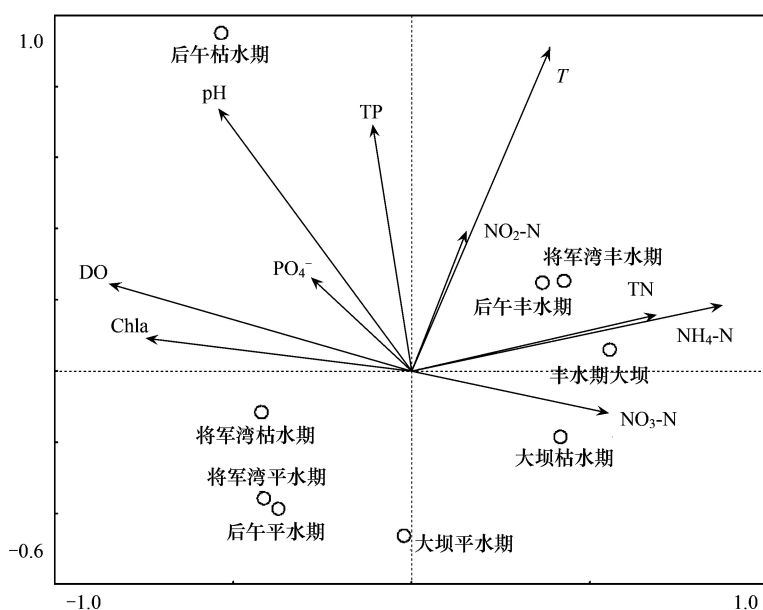


图 5 红枫湖水库环境因子, 样方的 PCA 三维排序图

Fig.5 PCA triplot of environmental variables, samples in Hongfeng Reservoir

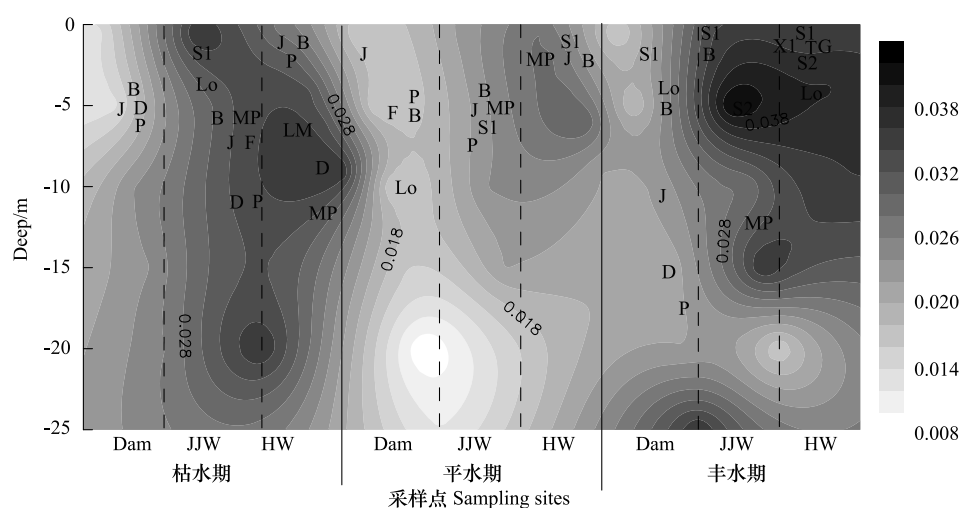


图 6 红枫湖总磷含量与主要功能群的时空分布等值图

Fig.6 Total phosphorus content in spatial and temporal distribution and the main functional groups

11.7—13.8 ℃ 之间, 平均水温 13.3 ℃; 枯水期水温在 16.11—17.4 ℃ 之间, 平均水温 16.6 ℃; 各时期均为 0.5 m 层水温最高, 底层水温最低。优势浮游植物功能群主要分布在水温较高层, 功能群 S1, S2 浮游植物受温度影响最大, 在较高温时期形成优势功能群, 丰水期温度高使得功能群 S1 浮游植物生长迅速, 数量大幅度增加; 功能群 J, F, L₀, G 浮游植物适宜在温度 14 ℃ 以上的水体中生长; 功能群 B 适应较低温度, 功能群 D, P, MP 浮游植物在高低水温下都会存在, 但从数量上看功能群 P 最适合生长在 16 ℃。浮游植物功能群演替特点与水温存在明显的正相关关系 ($R^2 = 0.862, P < 0.01$) (图 9)。

溶解氧的变化范围在 0.48—7.85 mg/L 最大值出现在大坝平水期 5 m, 最小值出现在大坝丰水期 20 m, 各时期水体中溶解氧垂直变化趋势相似, 均表现为随深度增加溶解氧降低; 水体中溶解氧与浮游植物数量在水中分布有关, 溶解氧与浮游植物丰度呈负相关性 ($R^2 = -0.327, P < 0.05$) (图 10)。

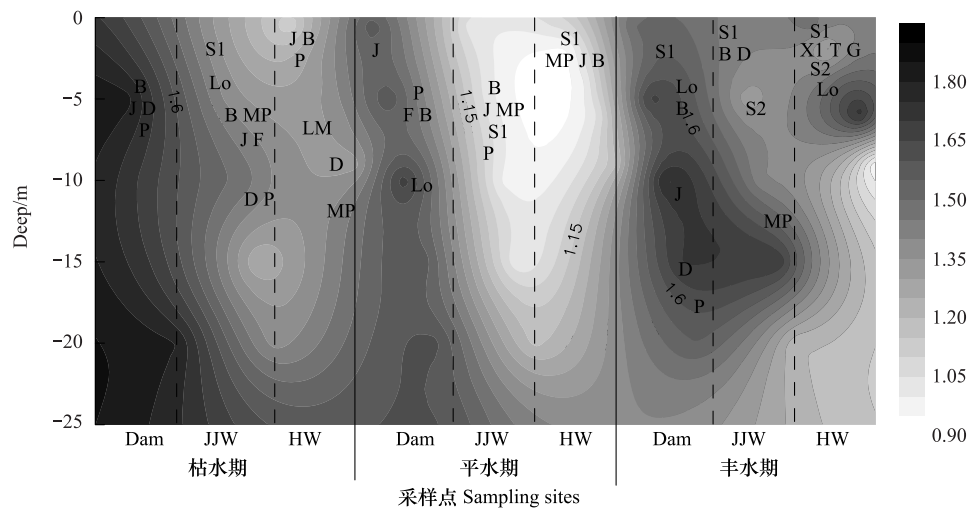


图7 红枫湖总氮含量与主要功能群的时空分布等值图

Fig.7 Total nitrogen content and the spatial and temporal distribution of the main functional groups

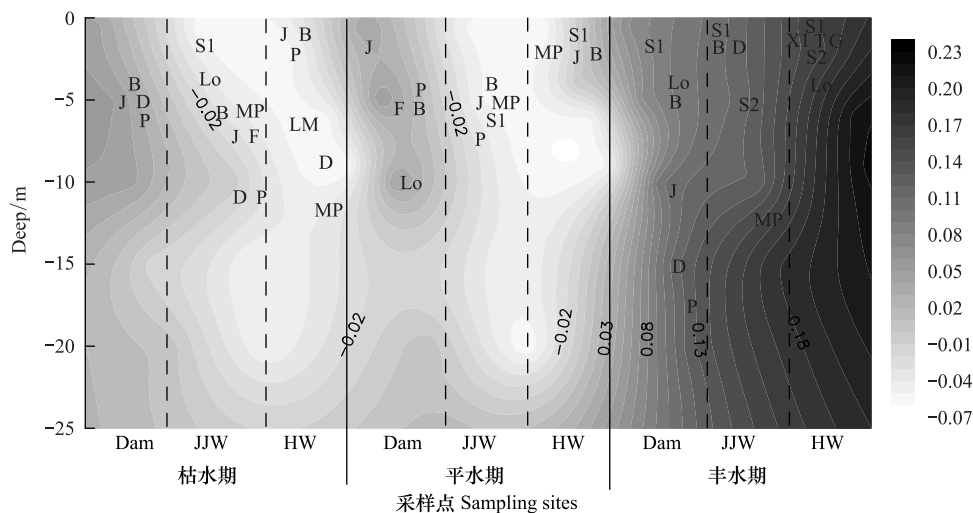


图8 红枫湖氨氮含量与主要功能群的时空分布等值图

Fig.8 Ammonia nitrogen content and the spatial and temporal distribution of the main functional groups

3 讨论

3.1 红枫湖浮游植物功能分组的特征

浮游植物动态变化序列主要由热稳定性,营养盐及浮游植物的形态,生理适应特征(悬浮机制,营养盐吸收利用效率,捕获光电能力,固碳速率等)相互作用的结果,这些成为特定生境中浮游植物出现或消失的选择机制^[17,18]。水库中的优势功能类群基本反映了该水库的营养水平,红枫湖水库有25个功能群,枯水期划分的功能群类别最少有16个,平水期19个功能群,丰水期功能群最多有22个。枯水期主要代表性功能群是J/B/L_M;平水期主要代表性功能群S1/J/B/F;丰水期主要代表性功能群是S1/D/J,且功能群S1占绝对优势。功能群S1类主要生活在富营养化水体,国内外许多水体研究中S1类为优势功能群的现象普遍出现,如匈牙利利河^[19]和匈牙利的浅水湖泊^[20],国内有湖北省的熊河水库^[21],广东省的横岗和水濂山水库以及南屏水库的丰水期都以S1功能类群占优势^[13],江西省的赣江流域^[22],海南永庄水库和万宁水库丰水期均以S1为主要的优势功能类群,赤田水库2006年的枯水期S1也成为主要优势功能类群^[23]。

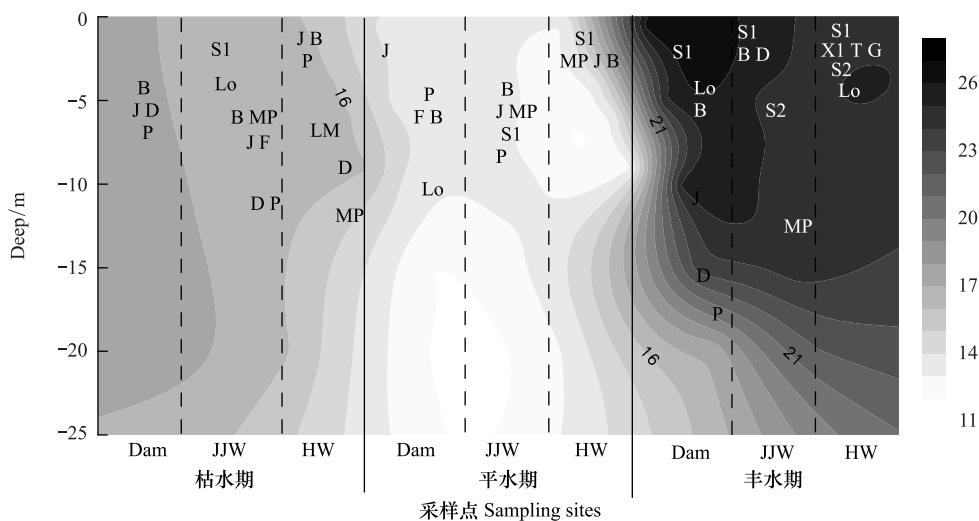


图9 红枫湖水温与主要功能群的时空分布等值图

Fig.9 The water temperature and the spatial and temporal distribution of the main functional groups

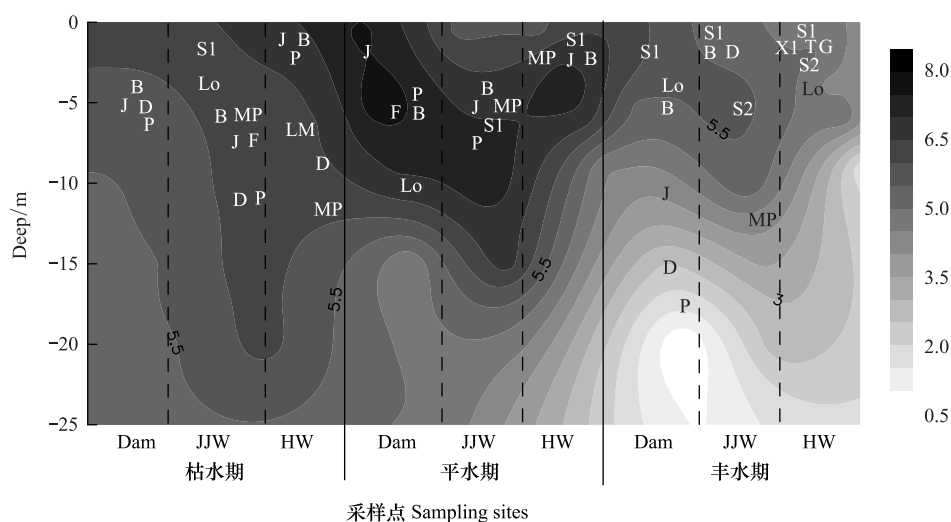


图10 红枫湖溶解氧含量与主要功能群的时空分布等值图

Fig.10 Dissolved oxygen content and the spatial and temporal distribution of the main functional groups

浮游植物分布与水力滞留时间,水体热分层,种类生长速率,有害浮游植物水华的发生,溶解营养盐质量浓度的动态变化等有着密切的关系^[24]。从各点功能群的垂直分布情况来看将军湾与后午两个采样点的6 m作为分界点浮游植物功能群在该层都发生转变,而大坝水位较深在10 m处浮游植物功能群发生转变。同时通过三个采样点可看出枯水期水库主要以功能群J为主,功能群B次之,平水期整个水库功能群变化较大,丰水期整个水库都以功能群S1为主。各时期垂直分布与浮游植物适应性特征有关,各时期各层环境条件不同从而导致浮游植物分布不同,将军湾和后午采样点水位较大坝浅,主要环境因子在水体也呈现垂直差异。

3.2 影响红枫湖浮游植物功能群分布的主要环境因子

Reynolds 指出最适合浮游植物生长的N/P为16,当N/P比大于16时,浮游植物生长受磷限制,小于16时浮游植物生长受氮限制^[1]。丰水期将军湾,后午,大坝三个采样点功能类群为S1占绝对优势,其N/P分别为39,44,70;平水期三个采样点N/P分别为38,49,111;枯水期主要功能群为J、B,N/P分别为40,41,86。三个时期三个采样点的N/P均远大于浮游植物生长的最适标准16,该水库浮游植物生长受磷限制。Reynolds^[1]也提出,营养物含量对浮游植物生长主要表现为绝对限制性,大部分淡水浮游植物氮,磷的绝对限

制阈值范围约为可溶性无机氮(DIN) < 11—14 $\mu\text{g/L}$, 溶解活性磷(SRP) < 3—4 $\mu\text{g/L}$ 。研究得出该水库的可溶性无机氮含量在 0.943—1.82 mg/L 之间, 溶解活性磷含量在 0.001—10.14 $\mu\text{g/L}$, 水库水体的营养状态都已超过限制阈值, 以及运用 SPSS18.0 对浮游植物与氮磷含量进行相关性分析得出其相关性不显著, 因此表现出氮、磷等对于浮游植物功能群结构影响不明显, 营养盐不再是限制因子, 主要是受物理条件的制约。而水库在丰、平、枯三水期浮游植物功能类群组成差异除了与光照和营养盐水平有一定关系外, 用 SPSS18.0 对浮游植物丰度与环境因子相关性分析可得出水温与浮游植物丰度呈显著正相关($R^2 = 0.862, P < 0.01$), 可以看出水温变化是浮游植物功能群结构演替的最主要因素, 这与卢金锁等^[9]对深水水库的研究结果一致。枯水期水库蓄水, 水力滞留时间长, 水体较稳定, 但由于 S1 类中主要藻种假鱼腥藻的最适生长温度为 25—35 $^{\circ}\text{C}$, 枯水期较低的温度使蓝藻生长繁殖速率受到限制, 从而 S1 类优势度和丰度较丰水期和平水期有所下降, 而适应富营养水体的 J 类和对分层较敏感的 B 类占据优势。平水期水温有所降低, 水体透明度增加, 功能群 S1 类开始增加, 但由于贵州高原独特的气候特征平水期水温较低, 导致采样点的主要功能类群有所差异, 将军湾和后午以功能群 S1, J, B 为主, 大坝主要功能群为 J, F, B。丰水期水体透明度降低, 光限制增加, 水温高, 水库排水水力滞留时间短, 水体混合良好使得以假鱼腥藻为优势藻种的功能群 S1 类占据优势, 该时期 S1 类与水体透明度呈显著的负相关性($R^2 = -0.888, P < 0.01$)。从垂直来看, 各浮游植物功能群分布是根据水体分层特征及水体水质的时空差异而定, 也受浮游植物自身的生理特性的影响。表层水体易受温度影响, 以功能群 S1 浮游植物为主, 在较高温时期形成优势功能群; 功能群 J, B, F, L_0 , G 浮游植物适宜在温度 14 $^{\circ}\text{C}$ 以上的水体中生长; 功能群 D, P, MP 浮游植物在高低水温下都会存在, 但从数量上看功能群 P 最适合生长在 16 $^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 红枫湖浮游植物功能群演替生长策略特征

稳定的湖泊系统中, 浮游植物群落在光热传递季节变化与营养物输入的交叠影响下将沿着一定的群落演替路径发生结构变化^[1], 以欧洲和北美的富营养深水分层湖泊为例, 其演替模式为^[25]: 冬季 R 策略藻种(星杆藻 C 组) → 冬末初春 C 策略衣藻, 小球藻等或群体生长型 CS 策略的团藻 → 春季 S 策略藻种(鱼腥藻) → RS 策略的鼓藻/R 策略脆杆藻, 直链藻等。同湖泊系统完善的 C-R-S 季节演替模式相比, 本研究中三个水情期红枫湖浮游植物生长策略的季节演替过程可能并不完善, 缺失了 RS 型浮游植物在群落中占优势的时段, 而长期都是以 R/CR 策略藻种占优势, 这两种生长策略反应出该水体浮游植物优势功能群在物质供给、能量输入均较理想的条件下能充分生长, 随着能量限制程度的增加而较其他类群更具耐受性。在浮游植物生境改变驱动群落演替的基本假设下, 这种现象说明红枫湖浮游植物功能群演替不仅与该水体处于中-富营养状态有关, 而且与红枫湖水动力等因素有关。

3.4 红枫湖浮游植物功能群与水体环境之间的关系

浮游植物功能类群与水体生境特征相对应, 水动力学特征, 营养盐状况, 光照条件, 浮游动物牧食压力和水文动态等环境因素都对浮游植物的功能类群产生影响, 水体中浮游植物的功能类群越多, 说明水体环境系统中生境多样性越高^[3]。

特定的功能类群对应特定的生境状态及其耐受性特点^[25]。S1 功能类群适应生境为浑浊的混合水体; 主要代表种类是假鱼腥藻, 湖丝藻等^[2,3]。红枫湖水库丰水期 S1 为主要优势功能类群。红枫湖是集灌溉、发电、旅游为一体的水库, 所以该水库受人类活动影响较大, 丰水期降雨量丰富, 地表径流带来大量外源物质的输入, 导致水体浑浊, 透明度降低, 水下光强减弱, 有利于 S1 功能群的生长繁殖, 这与高国敬所研究的海南万宁水库和赤田水库结果相似^[23]。J 功能群适应生境为浅的, 混合的高富营养水体, 主要代表种类有盘星藻, 栅藻, 卵囊藻等; B 功能群适应生境为中营养的中小型水库, 对分层敏感, 主要代表藻种有小环藻; P 功能群适应生境为 2—3m 深度连续或半连续的混合层, 主要代表藻种为直链藻, 脆杆藻等^[2,3]。J 和 S1 主要生活在中-富营养化水体, 均能适应混合水体环境; 营养盐, 无机和有机颗粒物的入库水流导致适应该状态的 S1 类和 J 类为红枫湖长期优势功能群, 但由于 S1 均为蓝藻, 蓝藻的生长受水温影响较大, 冬季枯水期水温较低, 使得 S1

类生长受限而 J 类占优势。B 类和 P 类以硅藻为主,适应低温和水体扰动的环境,对外界光照强度的变化反映迅速,光合作用能力很强;也是枯水期的主要优势功能群^[1]。由优势浮游植物功能群可以看出红枫湖水库水质长期处于中-富营养水平,水体混合程度高,透明度低;优势浮游植物功能群的生长与水体环境条件有关,而水体水质也可以通过优势浮游植物功能群反应出来。运用综合营养状态指数法(TLI)对红枫湖水库水质评价该水库处于中-富营养状态,这与浮游植物功能群对水体水质指示结果相一致。

4 结论

(1) 依据功能类群划分原则,对红枫湖三个水情期浮游植物进行研究,共划分为 25 个功能群类别:B, C, D, E, F, G, J, L_M, L_O, M, MP, P, S₁, S₂, S_N, T, W₁, W₂, X₁, X₂, Y, K, X₃, H₁。其中功能群 S₁, B, D, J, F, MP, X₁, L_O, L_M, Y, T, G, X₂, P, S₂, C, E 在红枫湖三个水情期中较为常见,功能群 S₁, B, D, J 浮游植物占较大比重。丰水期有 22 种浮游植物功能群共存,平水期划分出 19 个浮游植物功能群,而枯水期浮游植物功能群为 16 个,为最少功能群共存时期。

(2) 浮游植物功能群时空分布特征受环境变化影响,水温变化是浮游植物功能群结构动态变化的最主要因素。

(3) 红枫湖浮游植物生长策略演替规律为:枯水期 CR/R/S 策略藻种→平水期 R/CR/CS 策略藻种→丰水期 R/CR/CRS/C 策略藻种。

(4) 浮游植物功能群的变化可以反应水体水质,适应中-富营养化水体及混合水体环境的功能群 S₁ 类和 J 类成为红枫湖长期优势功能群;利用浮游植物功能群与水体环境之间的相互关系可以得出:红枫湖水体处于中富营养状态,水体混合程度高,透明度低。

参考文献 (References):

- [1] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [2] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Sergio M. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(5): 417-428.
- [3] Padisák J, Crossetti L O, 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.
- [4] Becker V, Huszar V L M, Crossetti L O. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia*, 2009, 628(1): 137-151.
- [5] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, Marcé R, Armengol J, Crossetti L O, Huszar V L M. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir. *Water Research*, 2010, 44(11): 3345-3354.
- [6] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A, George D G. The spatial distribution of different phytoplankton functional groups in a Mediterranean reservoir. *Aquatic Ecology*, 2008, 42(1): 115-128.
- [7] Xiao L J, Wang T, Hu R, Han B P, Wang S, Qian X, Padisák J. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. *Water Research*, 2011, 45(16): 5099-5109.
- [8] Wang L, Cai Q H, Xu Y Y, Kong L H, Tan L, Zhang M. Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay. *Aquatic Ecology*, 2011, 45(2): 197-212.
- [9] 卢金锁, 胡亚潘. 深水型水库浮游植物功能组时空演替及生境变化的影响. *环境科学*, 2013, 34(7): 2611-2617.
- [10] Soylu E N, Gonulo A. Functional classification and composition of phytoplankton in Liman Lake. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2010, 10: 53-60.
- [11] Li Q H, Chen L L, Chen F F, Gao T J, Li X F, Liu S P, Li C X. Maixi river estuary to the Baihua Reservoir in the Maotiao River catchment: phytoplankton community and environmental factors. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(2): 290-299.
- [12] 王敬富, 陈敬安, 李秋华, 夏品华, 曾艳, 杨永琼, 杨海全. 贵州红枫湖越冬藻类的空间分布与实验室复苏实验. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 108-114.
- [13] 张怡, 胡韧, 肖利娟, 韩博平. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 107-117.
- [14] 黄享辉, 胡韧, 雷腊梅, 彭亮. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征. *生态环境学报*. 2013, 22(2): 311-318.

- [15] 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.
- [16] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 韩博平. 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.
- [17] Naselli-Flores L, Barone R. Phytoplankton dynamics and structure: a comparative analysis in natural and man-made water bodies of different trophic state. *Hydrobiologia*, 2000, 438(1/3): 65-74.
- [18] Maegalef R. Life forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta*, 1978, 1(4): 493-509.
- [19] Borics G, Várbrög G, Grigoszk I, Krasznai E, Szabo S, Tihamer K K. A new evaluation technique of potamoplankton for the assesment of the ecological status of rivers. *Archiv für Hydrobiologie Supplement (Large Rivers 17)*, 2007, 161: 465-486.
- [20] Padisák J, Barbosa F A R, Koschel R, Krienitz L. Deep layer cyanoprokaryota maxima in temperate and tropical lakes. *Archiv für Hydrobiologie, Special issues, Advances in Limnology*, 2003, 58: 175-199.
- [21] 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.
- [22] 刘足根, 张柱, 张萌, 方红亚, 弓晓峰. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 375-384.
- [23] 高国敬, 肖利娟, 林秋奇, 胡韧, 雷腊梅. 海南省典型水库浮游植物功能类群的结构特征与水质评价. 生态科学, 2013, 32(2): 144-150.
- [24] Hoyer A B, Moreno-Ostos E, Vidal J, Blanco J M, Palomino-Torres R L, Basanta A, Escot C, Rueda F J. The influence of external perturbations on the functional composition of phytoplankton in a Mediterranean reservoir. *Hydrobiologia*, 2009, 636(1): 49-64.
- [25] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*, 1998, 369-370: 11-26.