

万峰湖浮游植物群落的时空分布^{*}

李秋华^{1,2} 商立海^{1**} 李广辉¹ 冯新斌¹ 闫海鱼¹

(¹中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点研究实验室, 贵阳 550002; 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)

摘要 于2009年9月(夏季)和2010年1月(冬季)对万峰湖(水库)的浮游植物群落结构时空分布特征进行研究。在万峰湖共监测到浮游植物49种,其中夏季水库表层(0~10 m)浮游植物优势种为蓝藻门中的拟柱胞藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*),底层为硅藻门中肘状针杆藻(*Synedra ulna*)和梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*);在冬季以硅藻门中的小环藻(*Cyclotella* sp.)和梅尼小环藻为主。夏季,浮游植物表层丰度为 $13.0 \times 10^4 \sim 54.6 \times 10^4$ cells L^{-1} ,野鸭滩(S₂)最高,而以坝艾(S₄)浮游植物丰度最低;浮游植物主要集中在表层(0~10 m),以蓝藻组成为主,蓝藻丰度百分数在大坝(S₁)最高,达到90.3%,香浓多样性指数夏季高于冬季,夏季表层均匀度指数最低。冬季,浮游植物丰度为 $17.43 \times 10^4 \sim 25.28 \times 10^4$ cells L^{-1} ,浮游植物主要集中在表层(0~10 m)和中层(10~50 m),水体的各层硅藻所占比例均在90%以上。从浮游植物群落结构和丰度看,万峰湖处于中营养状态,冬季水质好于夏季。夏冬两季浮游植物丰度与水体的温度及水深都表现出了较强的相关关系。

关键词 浮游植物; 群落结构; 时空分布; 深水; 水库

中图分类号 Q178.51 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)5-1031-08

Temporal and spatial characteristics of phytoplankton community in Wanfeng Reservoir
LI QIU HUA², SHANG LI HAI^{1**}, LI GUANG HUI¹, FENG XIN BIN¹, YAN HAI YU¹ (¹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ²Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China). Chinese Journal of Ecology 2011, 30(5): 1031-1038.

Abstract To understand the temporal and spatial characteristics of phytoplankton community structure in Wanfeng, a deep altpiano reservoir, phytoplankton was measured in September 2009 and January 2010. Forty-nine species of algae were identified. In summer, the community was dominated by *Cylindrospermopsis raciborskii* at the surface (0-10 m) and at the bottom (>60 m). *Synedra ulna* and *Cyclotella meneghiniana* became dominant, but in winter the community was dominated by *Synedra ulna* and *Cyclotella meneghiniana*. The phytoplankton abundance ranged from 13.0×10^4 to 54.6×10^4 cells L^{-1} in summer and 17.43×10^4 to 25.28×10^4 cells L^{-1} in winter. The maximum phytoplankton abundance was at Yeyatang (S₂), but the minimum phytoplankton abundance was at Baai (S₄). In summer, phytoplankton collected at the surface (0-10 m) was primarily composed of cyanophyta. The highest percent composition of cyanophyta was 90.3% at Daba (S₁). Shannon diversity index was higher in summer than in winter, but the evenness was lowest at the surface in summer. In winter, phytoplankton mainly distributed at the surface (0-10 m) and at the mid-level (10-50 m), and was primarily composed of bacillariophyta. The percent composition of bacillariophyta was above 90% in all water layers. Judged by phytoplankton community structure and abundance, Wanfeng Reservoir is me-

*国家自然科学基金资助(40873085和40973083)和贵州省社会发展攻关项目(黔科合-SZ字[2009]3002)资助。

**通讯作者 E-mail: shanglihai@vip.sj.cn

收稿日期: 2010-10-14; 接受日期: 2011-02-28

sotrophic in summer. Water quality was better in winter than in summer. A relationship between Phytoplankton abundance, temperature and water depth was obvious in winter and summer.

Key words: Phytoplankton, community structure, temporal and spatial characteristic, deep water reservoir

浮游植物的组成和数量通常具有明显的季节变化 (Negro et al., 2000; Calijuri & Dos Santos, 2001; Kamenir et al., 2004), 这是由季节性的外在驱动因素 (如水温和水体的滞留时间等) 所决定的。水体营养盐负荷、生物生长及营养级之间相互作用, 影响浮游植物群落的组成和数量 (Reynolds 1998; Piet & Vijverberg 1999; Gomes & Miranda 2001; 林秋奇等, 2003; 张晟等, 2006)。水动力学和营养盐负荷成为影响水体浮游植物群落的主要因素 (Naselli-Flores 2000)。水体的水动力学主要与水体的形态和水力交换有关, 而营养盐的负荷则与外源输入和沉积物来源的内源污染有关 (An & Jones 2000; Figueredo & Gianì 2001)。在不同的水域, 因地理纬度的不同, 周期性变化也不同。在高纬度地区, 水温的季节性差异明显, 它是决定水体浮游植物群落季节变化的主要因素。在低纬度地区, 水体水温常年较高, 季节变化不如高纬度明显, 降水的季节性变化是影响营养盐输入和水体水动力学过程的关键因素, 特别在受夏季风影响的地区 (Lewis 2000)。水库是一个特殊的水体, 与天然湖泊有明显的差异 (韩博平等, 2003)。水库水动力学与用水模式直接相关, 不同功能的水库其用水模式相差较大, 导致水库水动力学过程存在明显的差异, 浮游植物生存环境也有明显差别, 表现在种类组成和动态特征上的不同 (Straskraba & Tundiși 1999; Han et al., 2000; 张远等, 2006)。

浮游植物时空变化是了解水环境和保护水环境的基础, 目前对高原深水水体的浮游植物时空变化研究较少 (胡建林等, 2006; 郭劲松等, 2008)。本研究通过对西南高原深水水库浮游植物群落结构时空分布特征的调查及对富营养化程度的分析, 旨在了解高原深水水库富营养化对甲基汞产率的影响中浮游植物组成特征, 另一方面也为高原深水水库开展高原深水富营养化水体的综合管理提供指导。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

万峰湖位于珠江的源头南盘江上, 1998年因天

生桥电站建设拦截南盘江而形成, 地处滇、黔、桂三省 (区) 结合部, 地势西北高、东南低, 海拔高度为 650 ~ 1000 m 相对高差大, 山势陡峭。积水后, 正常水位海拔 780 m 水库较深, 水面积 176 km², 最大库容 102.6 亿 m³。分别于 2009 年 9 月和 2010 年 1 月采集万峰湖水样, 根据气温分别代表当地的夏季和冬季。布置了 4 个采样点, 为大坝、野鸭滩、革布、坝艾等 4 个采样点, 分别记为 S₁、S₂、S₃ 和 S₄ (图 1)。

1.2 样品分析方法

采用 YSI6600 V2 便携式水质多参数测定仪原位测定水温 (T)、电导率 (Cond)、PH、溶解氧 (DO)、水深 (WD) 等指标。万峰湖平均水深在 100 m 左右, 根据 YSI6600 V2 测得的现场水质参数, 每个采样点分 10 层左右, 其中上表层以 2 m 或 4 m 为间隔, 而中层和下层以 10 m 或 20 m 为间隔采样。用 5 L 卡盖式采水器采集不同水深的水样, 用于浮游植物定量、总氮 (TN)、铵氮 (NH₄⁺-N)、硝氮 (NO₃⁻-N)、总磷 (TP)、悬浮物 (TSS) 的测定。总氮、铵氮、硝氮、总磷、悬浮物参照国家地表水质标准方法 (GB 3838—2002) 进行测定。浮游植物定量样品, 用 3% ~ 5% 福尔马林固定, 在实验室浓缩沉淀; 浮游植物定性样品用



图 1 万峰湖采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of Wanfeng Reservoir

25号浮游生物网(64 μm), 在不同方向进行拖网, 同样用 3% ~ 5% 福尔马林固定。浮游植物定性、定量样品均在 Olympos CX 41 显微镜下进行鉴定和计数(章宗涉和黄祥飞, 1991)。

1.3 数据处理

运用 Microsoft Excel 2007、SPSS 15.0 及 Sigma Plot 10.0 处理数据及作图。浮游植物的 Shannon 多样性指数的计算采用下列公式计算:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

式中, s 为藻类种数; P_i 为第 i 种藻类占整个藻类个体数的比例, 即 N_i/N

均匀度指数公式:

$$J = \frac{H'}{\ln S}$$

式中, S 为藻类种数, H' 为 Shannon 多样性指数。一般来说, H' 越大表示水质越好。 $0 < H' \leq 1$ 表示重度污染; $1 < H' \leq 3$ 表示中度污染, 其中在 $1 \sim 2$ 为 α 中污染, 在 $2 \sim 3$ 为 β 中污染; $H' > 3$ 为轻度污染或无污染。 J 值在 $0 \sim 0.3$ 表示重度污染; $0.3 \sim 0.5$ 表示中度污染; $0.5 \sim 0.8$ 为轻度污染或无污染(金湘灿和屠清瑛, 1990)。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成

2次采样共监测到了浮游植物 49种, 其中夏季采集到浮游植物 35种, 包括蓝藻 7种, 绿藻 9种, 硅藻 13种, 甲藻 3种, 裸藻 2种, 隐藻 1种; 冬季采集到浮游植物 43种, 包括蓝藻 5种, 绿藻 19种, 硅藻 14种, 甲藻 2种, 裸藻 1种, 隐藻 1种(表 1)。从图 1 可以看出, 万峰湖浮游植物种类主要是由蓝藻、绿藻和硅藻, 甲藻、裸藻和隐藻相对较少, 偶尔能够监测到。从浮游植物种类组成的季节来看, 夏季和冬季浮游植物种类组成有区别, 在水库大坝(S₁)处, 夏季绿藻的种类数比硅藻和蓝藻的种类数要多, 但是在水库野鸭滩(S₂)、革布(S₃)和坝艾(S₄)采样点, 硅藻的种类数要比蓝藻和绿藻种类数多。在冬季, 水库大坝(S₁)和革布(S₃)采样点, 硅藻的种类数要比蓝藻和绿藻种类数多, 而水库野鸭滩(S₂)和坝艾(S₄)采样点, 绿藻的种类数比硅藻和蓝藻的种类数要多。

2.2 浮游植物优势藻

在万峰湖, 浮游植物优势藻在不同季节有很大

的变化。夏季, 水库表层(0 ~ 10 m)浮游植物优势藻主要以蓝藻门中的拟柱孢藻为主, 在水库底层以硅藻门中肘状针杆藻、梅尼小环藻和曲壳藻; 冬季, 蓝藻不是水库的主要藻类, 而以硅藻门中的小环藻和梅尼小环藻为水库主要藻类。

2.3 浮游植物丰度

从图 2 可以看出, 万峰湖浮游植物季节变化和垂直变化非常明显。在夏季, 浮游植物表层丰度在野鸭滩(S₂)最高, 达到 $5.46 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 而以坝艾(S₄)浮游植物丰度最低, 为 $1.30 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游植物丰度垂直分布非常明显, 夏季主要集中在表层(0 ~ 10 m), 随着水体深度的增加, 越来越低, 表现出明显的递减趋势。在水体下层, 浮游植物丰度很少, 只有少数藻类存在, 但是在界面水层浮游植物的丰度略有上升。夏季浮游植物丰度主要是由蓝藻组成, 其次是硅藻。在冬季, 浮游植物的丰度有所降低, 以革布(S₃)最高, 达到 $3.70 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 以大坝(S₁)最低, 为 $1.90 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从浮游植物垂直分布来看, 冬季和夏季表现了同样的随着水体深度的增加呈递减趋势, 但是, 冬季主要集中在表层(0 ~ 10 m)和 中层(10 ~ 50 m), 而在水体的下层占有一定的比例, 主要是由硅藻组成, 而蓝藻的丰度很少, 水库下层浮游植物冬季比夏季高(图 2)。

从浮游植物丰度组成百分数来看, 夏季主要由蓝藻、硅藻、绿藻、甲藻和裸藻组成。在上表层, 浮游植物主要是由蓝藻组成, 蓝藻丰度百分数以大坝(S₁)最高, 达到 90.3%, 坝艾(S₄)蓝藻丰度的百分数也有 71.8%。水体的中层以硅藻为主, 硅藻丰度百分数大坝(S₁)最高达到 93.3%。水体的底层以硅藻和裸藻为主, 尤其是在水体的悬浮层硅藻丰度百分数最高达到 96%, 而裸藻在大坝(S₁)底层(80 m)的丰度百分数占 25%。在冬季, 浮游植物丰度组成百分数垂直分布与夏季有区别, 各层硅藻百分数含量都较高在 90%以上, 仅在大坝(S₁)有一定比例的绿藻、蓝藻和甲藻。

2.4 多样性指数和均匀度指数

从图 3 可以看出, 万峰湖浮游植物香浓多样性指数在 0.6 ~ 2.3 而且大部分时期的多样性指数在 1.0 以下, 少数时期在 1.0 ~ 2.0 仅有很少的样品的多样性指数在 2.0 以上。从多样性指数的季节变化来看, 夏季浮游植物多样性指数要高于冬季浮游植物指数。从垂直分布来看, 夏季浮游植物多样性指

表 1 万峰湖夏冬季浮游植物组成
Table 1 Species of Phytoplankton in summer and winter in Wanfeng Reservoir

种类	夏季				冬季			
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
蓝藻 Cyanophyta								
湖泊假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>	+	+	+	+		+		
拟柱胞藻 <i>Cylindrocapsa raciborskii</i>	+++	+++	+++	+++			+	
色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.				+	+			+
湖丝藻 <i>Limnithrix redekei</i>	+	+		+			+	
林氏藻 <i>Lyngbya</i> sp.	+	+	+	+				
鱼腥藻 <i>Anabaena spiroides</i>	+	+	+	+		+		
颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i> sp.			+	+				
绿藻 Chlorophyta								
双对栅藻 <i>Scenedesmus bijugatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
厚变浮游角星鼓藻 <i>Staurastrum natator</i>	+	+	+	+				+
纤细角星鼓藻 <i>Staurastrum gracile</i>	+	+	+	+				+
鼓藻 <i>Penium</i> sp.	+	+	+	+				+
微小四角藻 <i>Tetraedon minimum</i>	+	+	+	+		+	+	+
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	+	+	+	+	+	+		+
丝藻 <i>Ulothrix</i> sp.		+					+	+
实球藻 <i>Pandorina morum</i> sp.	+	+		+		+	+	+
空球藻 <i>Eudorina elegans</i>						+	+	+
多棘鼓藻 <i>Xanthidium</i> sp.								+
浮球藻 <i>Planctosphaeria gelatinosa</i>					+			+
集星藻 <i>Actinastrium hantzschii</i>					+		+	
单刺四星藻 <i>Tetrasium hastiferum</i>					+		+	
双射盘星藻 <i>Pediastrum biadjectum</i>					+			
小空星藻 <i>Cocleastrum microporum</i>					+			
四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>								+
四孢藻 <i>Tetraspora</i> sp.								+
杂球藻 <i>Peridinium bipes</i>								+
扁盘栅藻 <i>Scenedesmus platydiscus</i>								+
微茫藻 <i>Micractinium pusillum</i>				+				
胶囊藻 <i>Gloeocystis</i> sp.	+			+				
硅藻 Bacillariophyta								
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	+	+	+	+	++	++	++	++
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>		+	+	+	++	++	++	++
肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	++	++	++	++	+	+	+	
针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	+	+	+	+		+		
曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.	+	+	+	+				+
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	+	+		+	+	+	+	+
模糊直链藻 <i>Melosira ambigua</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
湖沼圆筛藻 <i>Coscinodiscus lacustris</i>		+		+		+		
异极藻 <i>Gamphonema</i> sp.		+		+			+	
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	+	+	+	+	+		+	+
桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.		+		+	+	+		
菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.		+	+	+	+		+	
颗粒直链藻最窄变种 <i>var. angustissima</i>					+	+	+	+
布纹藻 <i>Gyrodinium</i> sp.							+	
脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.			+	+				
甲藻 Pyrrophyta								
多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.	+	+	+	+		+	+	+
飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinell</i>			+	+		+	+	+
沃尔多甲藻 <i>Peridinium volzii</i>				+				
裸藻 Euglenophyta								
囊裸藻 <i>Tracheomonas</i> sp.	+	+	+	+				+
裸藻 <i>Euglena</i> sp.				+				
隐藻 Cryptophyta								
尖尾蓝隐藻 <i>Cryptomonas acuta</i>	+	+	+		+			

+表示出现; ++表示较多; +++表示占优势。

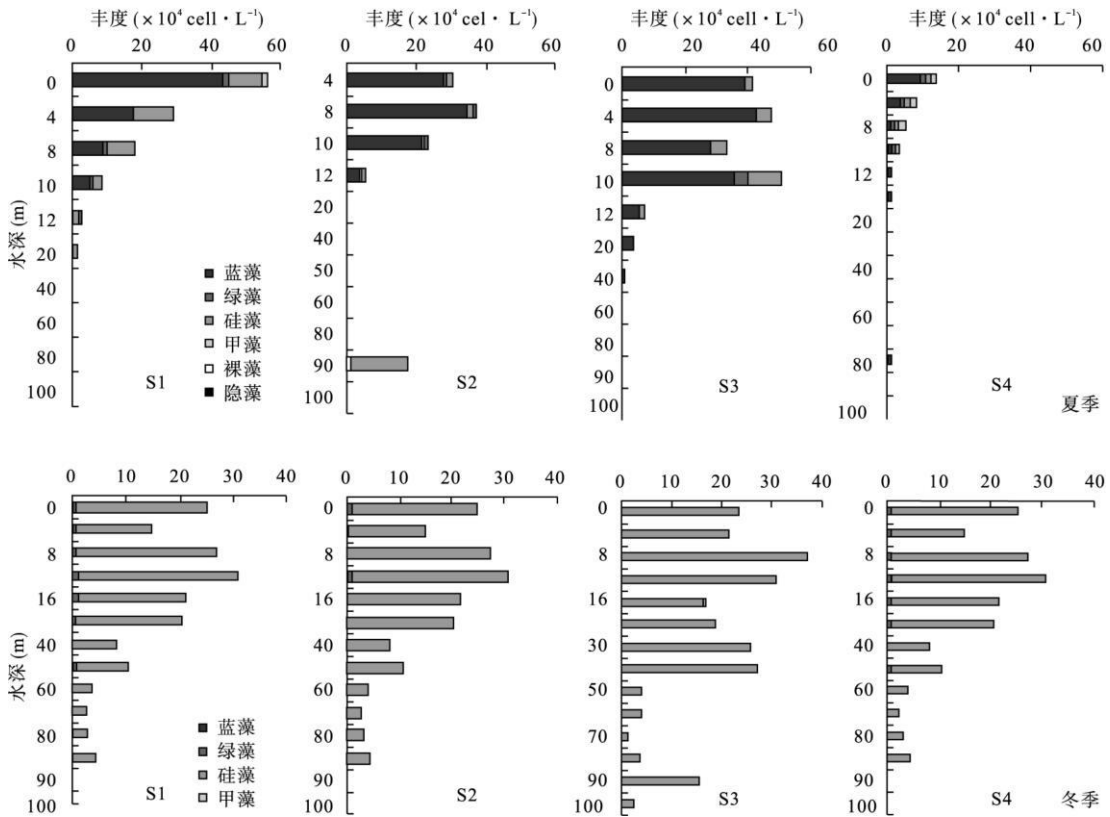


图 2 万峰湖夏、冬季各采样点剖面水体浮游植物丰度变化

Fig. 2 Dynamics of Phytoplankton abundance at all sites in Wangfeng Reservoir in summer and winter

数垂直变化较高, 而以表层浮游植物多样性最低, 而在水库的中下层浮游植物的多样性较高。根据香浓多样性指数, 目前万峰湖属于重度污染或中度污染状况。万峰湖浮游植物均匀度在 0.3~0.9 而且大部分时期处于 0.3~0.5 少数部分均匀度指数超过了 0.8 从垂直变化来看, 夏季表层均匀度指数最低, 中下层的均匀度指数最高, 冬季均匀度指数垂直变化没有夏季明显。

2.5 浮游植物丰度与环境因子之间的关系

从表 2 可以看出, 夏季浮游植物丰度与理化指标之间有较强的相关性, 其中与悬浮物 ($r=0.690$ $P<0.01$ $n=35$), 铵氮 ($r=0.582$ $P<0.01$ $n=35$), 温度 ($r=0.574$ $P<0.05$ $n=35$) 表现出了较强的正相关, 与硝氮 ($r=-0.505$ $P<0.01$ $n=35$) 和 水深 ($r=-0.628$ $P<0.01$ $n=35$) 表现出了较强的负相关, 而与电导率、溶解氧、总氮、总磷相关性不显著。

表 2 夏季浮游植物丰度与理化指标之间的相关性

Table 2 Relations between Phytoplankton abundance with Physico-chemical parameters in summer

	悬浮物	温度	电导率	溶解氧	pH	硝氮	铵氮	总氮	总磷	水深
悬浮物	1									
温度	0.596**	1								
电导率	0.059	0.047	1							
溶解氧	0.285	0.760**	-0.203	1						
pH	0.476**	0.697**	-0.276	0.896**	1					
硝氮	-0.562**	-0.120	0.550**	0.019	-0.304	1				
铵氮	0.321	0.278	-0.080	0.016	0.105	-0.324	1			
总氮	-0.209	0.267	0.438**	0.301	0.016	0.790**	-0.223	1		
总磷	-0.305	-0.834**	-0.279	-0.747**	-0.599**	-0.316	-0.145	-0.619**	1	
水深	-0.678**	-0.941**	-0.192	-0.634**	-0.663**	0.190	-0.300	-0.167	0.768**	1
浮游植物丰度	0.690**	0.574*	0.025	0.066	0.224	-0.505*	0.582**	-0.209	-0.307	-0.628**

* $P<0.05$ ** $P<0.01$

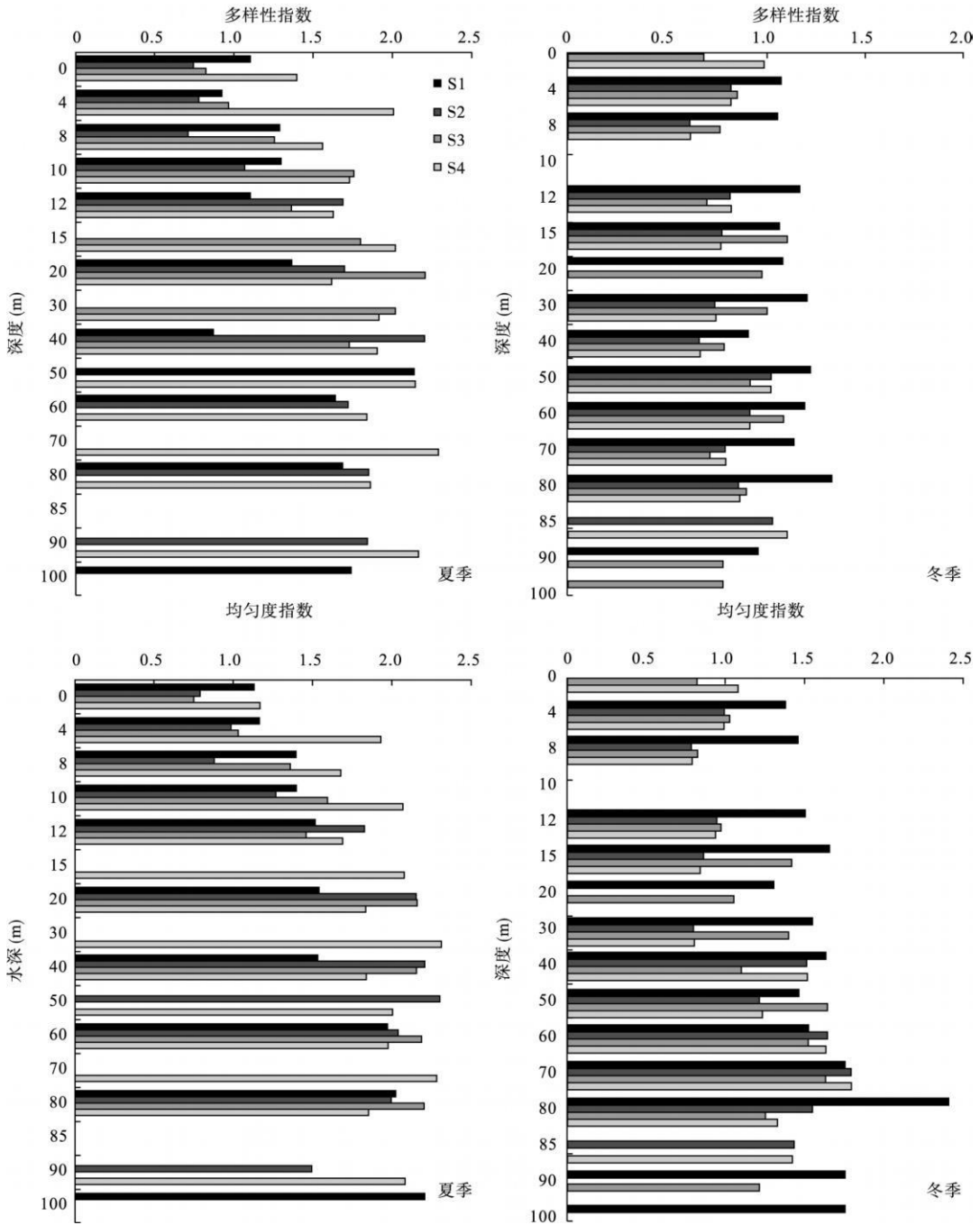


图 3 万峰湖多样性指数和均匀度指数季节动态变化
 Fig 3 Seasonal change of diversity index and evenness index in Wangfeng Reservoir

从表 3 可以看出, 冬季浮游植物丰度与理化指标之间有较强的相关性, 其中与温度 ($r=0.579$ $P<0.01$, $n=50$), 溶解氧 ($r=0.699$ $P<0.01$, $n=50$), pH 值 ($r=0.652$ $P<0.01$, $n=50$), 总氮 ($r=0.507$ $P<0.01$, $n=50$) 表现出了较强的正相关, 与铵氮 ($r=-0.368$ $P<0.01$, $n=50$), 总磷 ($r=-0.529$ $P<0.01$, $n=50$) 和 水深 ($r=-0.628$ $P<0.01$, $n=35$) 表现出了较强的负相关, 而与悬浮物、

电导率和浊度相关性不强。

2.6 浮游植物群落结构对富营养化的指示

从浮游植物的丰度来看, 目前万峰湖夏季处于中营养状态, 而冬季水库处于贫 中型营养状态, 时空分布较明显, 夏季以野鸭滩 (S₂) 富营养化程度最高, 而冬季以革布 (S₃) 富营养化程度最高。水体的中下层都表现出了较好的水质状态, 富营养化程度相对都较低。从浮游植物丰度百分比组成来看, 水

表 3 冬季浮游植物丰度与环境因子之间的相关性

Table 3 Relations between Phytoplankton abundance with Physicochemical parameters in winter

	悬浮物	温度	电导率	溶解氧	pH值	硝氮	铵氮	总氮	总磷	水深
悬浮物	1									
温度	0.236	1								
电导率	0.287*	-0.076	1							
溶解氧	0.305*	0.918**	0.051	1						
pH	0.249	0.902**	-0.061	0.936**	1					
硝氮	0.193	0.904**	0.176	0.877**	0.835**	1				
铵氮	-0.392**	-0.656**	-0.357*	-0.563**	-0.628**	-0.725**	1			
总氮	0.290*	0.818**	0.228	0.788**	0.662**	0.858**	-0.583**	1		
总磷	-0.225	-0.884**	-0.194	-0.808**	-0.840**	-0.921**	0.865**	-0.766**	1	
水深	-0.350*	-0.873**	-0.230	-0.901**	-0.828**	-0.850**	0.699**	-0.798**	0.839**	1
浮游植物丰度	0.231	0.579**	0.167	0.699**	0.652**	0.576**	-0.368**	0.507**	-0.529**	-0.596**

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

库浮游植物主要是以蓝藻和硅藻为主要优势藻类群, 夏季水体表层主要是蓝藻, 而且蓝藻的丰度较高, 存在着水华发生的风险; 冬季水体的中下层主要以硅藻为主, 表明了水库水质相对较好, 富营养化程度相对较低。

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征

水体浮游植物种类的组成是由浮游植物对水体环境适应的结果。万峰湖是一座中度富营养化的高原深水型水库。浮游植物的种类数量变化较小。浮游植物群落的种类组成的季节动态和垂直分布变化较明显。在夏季表层水温较高, 而喜高温生长的蓝藻成为优势藻, 蓝藻中的拟柱孢藻为优势藻, 一方面抑制了其他藻类的生长, 一方面影响了水体中藻类的多样性变化。在冬季及水体底层, 硅藻成为水体的主要优势藻类, 出现这种现象与藻类优势种细胞或群体的形态、大小和沉降速率有关 (Naselli-Flores 2000, Serra et al., 2002)。冬季水体各层种类数相差不大, 也是硅藻能够适合在分层水体生活的结果 (Becker et al., 2009)。对比以前对万峰湖浮游植物组成的研究, 浮游植物种类有所变化, 由绿藻门和蓝藻门为主要藻类转变为以硅藻和蓝藻门为主要藻类, 藻类的种类也由微囊藻为主要藻类转变为由拟柱孢藻和硅藻中的小环藻和针杆藻为主要藻, 绿藻不再是水库的主要藻类 (孙嘉龙等, 2008)。

3.2 浮游植物与理化指标之间关系

万峰湖在地理上处于亚热带, 水温季节变化形成了有利于藻类生存的不同环境条件 (Beyruth 2000, Dokulil & Teubner 2000)。万峰湖水体温度垂直分布明显, 浮游植物优势种随着水温的垂直变化

而不同。在万峰湖, 夏季和冬季浮游植物的群落结构组成变化较大, 主要是由于夏季和冬季水体的温度相差较大 (超过 10°C) 水体的垂直分布不同而影响了浮游植物的组成和变化。万峰湖浮游植物丰度与水体的温度及水深表现出了较强的相关关系温度是影响浮游植物的季节性动态最重要的环境因子 (Leito et al., 2003; 李秋华等, 2009)。温度对水体的影响, 表现在间接地影响着表层水体浮游植物的悬浮, 影响浮游植物垂直分布和演替。适当的水体温度能促进浮游植物的新陈代谢和生长 (Beyruth 2000), 水体温度与水体叶绿素呈明显的正相关关系, 也间接地说明了水温影响着浮游植物的分布 (Gomes & Miranda 2001)。在富营养化水库, 营养盐不是影响水库浮游植物变化的主要原因, 而水文因子成为最关键的因子, 水温和降雨等因素的变化是导致浮游植物变化最关键的因素 (Ahn et al., 2002; Becker et al., 2010)。在万峰湖, 夏季营养盐的含量和水体富营养化程度均高于冬季, 这可能导致出现了在夏季总氮、总磷与浮游植物丰度相关性较小, 而在冬季营养盐的含量与浮游植物丰度相关性较强。在营养水平存异的热带富营养水库中, 营养盐的增加或减少只会影响浮游植物丰度的增加并不能改变优势种群的组成, 光照条件对浮游植物种类组成的影响 (Naselli-Flores & Barone 1998; Arfi 2003)。在深水水库中, 由于不同的深度水层所接受的光照强度以及水体热力学状态的差异, 会出现热分层, 这些将影响着水库浮游植物的垂直分布 (Han 2000, Sañasao et al., 2003)。

参考文献

郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 2008 156 m蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价. 环境科

- 学, 29(10): 2710—2715
- 韩博平, 李 铁, 林旭钊. 2003 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究. 北京: 科学出版社.
- 胡建林, 刘国祥, 蔡庆华, 等. 2006 三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查. 水生生物学报, 30(1): 116—119
- 金湘灿, 屠清瑛. 1990 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社.
- 李秋华, 何伟添, 陈 椽. 2009 澳门湿地浮游植物群落特征. 植物生态学报, 33(4): 689—697
- 林秋奇, 胡 韧, 韩博平. 2003 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, 23(11): 2278—2284
- 孙嘉龙, 董泽琴, 瞿丽雅, 等. 2008 贵州万峰湖浮游植物的调查及其指数评价. 安徽农业科学, 36(23): 10096—10097.
- 章宗涉, 黄祥飞. 1991 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社.
- 张 晟, 刘景红, 黎莉莉, 等. 2006 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征. 环境科学, 27(6): 1056—1061.
- 张 远, 郑丙辉, 刘鸿亮. 2006 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素. 长江流域资源与环境, 15(2): 254—258
- Ahn CY, Chung AS, Korean H et al 2002 Rainfall Phyocyanin and N:P ratios related to cyanobacterial blooms in a large reservoir. *Hydrobiologia* 474: 117—124
- An KG, Jones JR 2000 Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* 432: 37—48
- Arfi R 2003 The effects of climate and hydrology on the trophic status of Singuè Reservoir Mali West Africa. *Lake & Reservoir Research and Management* 8: 247—257.
- BeYru Z 2000 Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Guarapiranga Reservoir São Paulo State Brazil. *Hydrobiologia* 424: 51—65
- Becker V, Huszar VL, Crossetti LQ 2009 Responses of phytoplankton functional groups to themixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia* 628: 137—151.
- Becker V, Caputo L, Ordoñez J et al 2010 Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir. *Water Research* 44: 3345—3354
- Calijuri MC, Dos Santos ACA 2001 Temporal variations in phytoplankton primary production in a tropical reservoir (Barra Bonita SP-Brazil). *Hydrobiologia* 445: 11—26
- Dokulil MT, Teubner K 2000 Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia* 438: 1—12
- Figueredo CC, Gianni A 2001 Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia* 445: 165—174
- Gomes LC, Miranda LE 2001 Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Parana River Basin. *Brazil Hydrobiologia* 457: 205—214
- Han BP, Armengol J, Garcia JC et al 2000 The thermal structure of Sau Reservoir (Spain NE): A simulation approach. *Ecological Modelling* 125: 109—122
- Kamenir Y, Dubinsky Z, Zohary T 2004 Phytoplankton size structure stability in a mesoeutrophic subtropical lake. *Hydrobiologia* 520: 89—104
- Lewis WM 2000 Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes & Reservoirs Research and Management* 5: 35—48
- Leite OM, Moraes SM, Rodriguez S et al 2003 The effect of perturbations on phytoplankton assemblages in a deep reservoir (Vouglans France). *Hydrobiologia* 506/509: 265—272
- Negro AJ, Hoyos CD, Vega JC 2000 Phytoplankton structure and dynamics in Lake Sanabria and Valparaiso reservoir (NW Spain). *Hydrobiologia* 424: 25—37.
- NaselliFlores L, Barone R 1998 Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosanara and Lake Arancio Sicily Italy). *Hydrobiologia* 369/370: 163—178
- NaselliFlores L 2000 Phytoplankton assemblages in wewetone Sicilian reservoirs. Relationship between species composition and environmental factors. *Hydrobiologia* 424: 1—11
- Piet GJ, Vijverberg J 1999 Environmental perturbation and the structure and functioning of tropical aquatic ecosystem. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery* 6: 265—279
- Reynolds CS 1998 What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia* 369/370: 11—26
- Straskraba M, Tundisi JG 1999 Guidelines of Lake Management (vol 1e.g.). *Reservoir Water Quality Management in International Lake Environment Committee Japan*
- Serra T, Colmer J, Baserba C et al 2002 Quantified distribution of diatoms during the stratified period of Boadella reservoir. *Hydrobiologia* 489: 235—244
- Sainason N, Moseello R, Garibaldi L et al 2003 Vertical mixing as a determinant of trophic status in a deep lake: A case study from two lakes south of the Alps (Lake Garda and Lake Isèo). *Limnology* 62: 33—41

作者简介 李秋华, 男, 1977年生, 博士, 副教授, 主要从事水域生态学及水环境生态修复研究, 发表论文 30 篇。E-mail: qiuhua2002@126.com

责任编辑 魏中青