

贵州百花湖麦西河河口浮游植物群落结构及与环境因子关系*

李秋华¹, 陈丽丽¹, 夏品华¹, 刘送平¹, 陈峰峰¹, 余德民², 李存雄^{1**}

(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: 湖南理工学院数学学院, 岳阳 414000)

摘要: 2009年7月至2010年6月,以每月一次的频率对百花湖(水库)麦西河河口浮游植物群落结构和环境因子进行调查. 监测到浮游植物66种(属),浮游植物主要由绿藻、硅藻和蓝藻组成,夏秋季湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)为优势浮游植物,而冬春季梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)为主要优势藻. 浮游植物丰度在 $1.17 \times 10^4 - 3.35 \times 10^7$ cells/L之间,2010年4月最低,2009年7月最高,浮游植物种群在4-9月主要由蓝藻组成,冬季由硅藻和甲藻组成. 运用典型对应分析研究结果表明:温度是影响麦西河河口浮游植物群落结构动态变化的最主要环境因子,其次为营养盐;蓝藻的大部分种类和裸藻受水温和浊度等影响较大,而硅藻和绿藻的大部分种类受氮磷营养盐浓度影响较大.

关键词: 浮游植物,环境因子,典范对应分析,河口,水库

Structure of phytoplankton community and its relationship with environmental factors at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir, Guizhou Province

LI Qiuhua¹, CHEN Lili¹, XIA Pinhua¹, LIU Songping¹, CHEN Fengfeng¹, YU Demin² & LI Cunxiong¹

(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: *Department of Mathematics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, P. R. China*)

Abstract: Phytoplankton and environmental factors at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir were investigated monthly from July 2009 to June 2010. Results showed that there were 66 species (genus), which were mainly composed of the chlorophyta, bacillariophyta and cyanobacteria. The phytoplankton community was dominated by *Pseudanabaena limnetica* in summer and fall and by *Cyclotella meneghiniana* in winter and spring. The abundance of phytoplankton ranged from 1.17×10^4 to 3.35×10^7 cells/L. The minimum phytoplankton abundance occurred in April of 2010, and the maximum occurred in July of 2009. The phytoplankton abundance composition was dominated mainly by cyanobacteria from April to September, but by bacillariophyta and pyrrophyta from October to March. Canonical correspondence analysis showed that temperature was the most important driving factor in regulating the composition and feature of phytoplankton community at the estuary. Nitrogen and phosphorus were the second important driving factors for the structure of phytoplankton community. Euglenophyta and a majority of cyanobacteria were affected by water temperature and turbidity, but chlorophyta and bacillariophyta were affected by the concentrations of nitrogen and phosphorus among these environmental factors.

Keywords: Phytoplankton; environmental factors; canonical correspondence analysis; estuary; reservoir

浮游植物是水域生态系统的重要组成部分,也是生态系统中的主要初级生产者^[1]. 浮游植物群落结构的变化直接影响着水质变化. 河口地区一般人口密集,生活污水或工业废水的排放使河口水域生态环境发生了一定程度的改变,浮游植物的数量和群落组成受到影响. 河口生态系统受多种因素的影响,包括水体的

* 贵州省科技厅社会发展攻关项目(SZ[2009]3002)、贵阳市科技局社会发展攻关项目([2009]3-04)和贵阳市重大科技专项([2010]5-03)联合资助. 2010-11-05 收稿;2010-12-13 收修改稿. 李秋华,男,1977年生,博士,副教授;E-mail: qiuhua2002@126.com.

** 通讯作者;E-mail: lex@gznu.edu.cn.

物理、化学和生物特征以及水文特征等^[2],一般也是水华频繁发生的区域,其水质的好坏直接或间接影响着水域的水质状况,因而河口也成为当今湖沼学、环境科学、水域生态学研究热点^[3-4]. 典型对应分析(CCA)因具有能同时结合多个环境因子,包含的信息量大,结果明确、直观、效果好等优点而受到重视. CCA为分析浮游植物群落与环境因子间的复杂关系提供了工具^[5-11]. 李秋华等对广东省大镜山水库的环境因子分析表明,温度和降雨成为影响浮游植物群落结构动态的主要驱动因子^[11]. 路娜等对巢湖浮游植物研究指出温度、浊度和硝氮是影响巢湖水体浮游植物群落结构动态变化的主要环境因子^[12],邓建明等对洪湖浮游植物研究指出水温、溶解氧和悬浮物是影响浮游植物群落结构动态的主要环境因子^[13]. 本文对贵州百花湖河口浮游植物群落结构和环境因子之间的关系进行研究,目的在于找出影响河口水质变化的主要环境因子,为今后河口水质改善和水资源的综合管理提供理论依据.

1 材料与方 法

1.1 采样点及频率

百花湖(水库)位于贵阳西北郊,是红枫湖(水库)的下游湖库,于1966年建成,坝高48.7m. 百花湖是猫跳河梯级电站第二级蓄水库. 主要由红枫湖(水库)下泄水以及长冲河、东门桥河、麦城河和麦西河四源汇成. 麦西河是百花湖主要污染源之一,因而麦西河河口也是水质恶化相对严重的河口之一. 本研究在麦西河河口设2个采样点,采样点S1位于麦西河的支流上,采样点S2在河口与水库开阔处(图1). S1与S2采样点相差2km左右. 为了较好的指导河口水质改善生态工程,于2009年7月至2010年6月工程施工前,以每月一次的频率采样调查.

1.2 实验方法

用赛氏盘测定透明度(SD);用pH S-3C酸度计测定水体的pH值;水杨酸法测定铵氮($\text{NH}_4\text{-N}$);钼酸铵分光光度法测定总磷(TP);碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定总氮(TN);正磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)用 $0.45\mu\text{m}$ 的纤维滤膜抽滤后在24小时内采用分光光度法测定;叶绿素a(Chl. a)采用经过 $0.45\mu\text{m}$ 的纤维滤膜抽滤200-500ml,反复冻融后,丙酮萃取方法进行测定^[14]. 浊度(Tur)按照国家水质标准方法GB 3838-2002中的分光光度法测定^[15];浮游植物定量样品在表层0.5m处采1-2L水样,用浓度为3%-5%的福尔马林固定,在实验室浓缩沉淀. 浮游植物定量样品在显微镜下进行鉴定和计数,计数方法采用目镜行格法,一般随机计数两个垂直行格,对于生物量较大而不合适采用行格法的采用视野计数法,一般30-50个视野,使得细胞数在300个以上. 藻类生物体积根据各藻类相近几何形状的面积公式计算,假定浮游植物藻类的密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$,计算水体浮游植物生物量^[16].

1.3 数据分析

利用SPSS 15.0分析环境因子之间的相关关系,利用MVSP软件包进行CCA分析. 采用浮游植物丰度指标来反映浮游植物种类与环境的关系,为了使浮游植物丰度的数据获得正态分布,将浮游植物丰度值采用 $\lg(x+1)$ 进行处理. 浮游植物选择出现频率在60%以上的种类. 环境因子选择营养盐指标和常见的理化指标,如TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、SD、pH值、浊度、温度等9个指标.

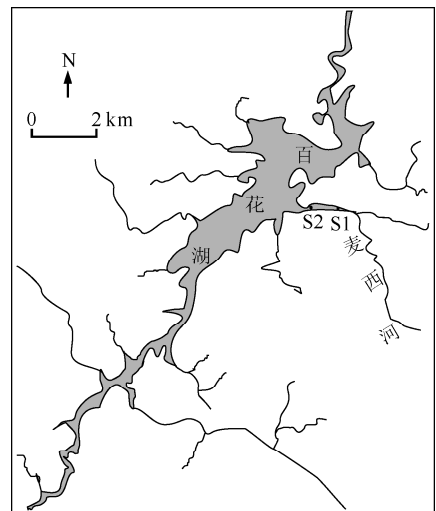


图1 百花湖(水库)麦西河口采样点
Fig. 1 Sampling sites at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

2 结果与分析

2.1 环境因子

百花湖(水库)麦西河河口 S1 和 S2 采样点的 TN 和 TP 均以冬季 1-2 月浓度最高,而夏季浓度最低. S1 采样点 2 月份 TN 浓度最高,达到 2.07mg/L; S1 采样点 1 月份 TP 浓度最高,为 0.12mg/L; Chl. a 夏季出现最大值, S1 点 Chl. a 最高到达 120.20 μ g/L,而在冬季出现最小值, S2 点 Chl. a 仅为 2.77 μ g/L. SD 以 5 月份最低,仅 0.50m,而 1 月份最高为 1.70m. 高的 TN 和 TP 浓度及 Chl. a 浓度指示出百花湖(水库)麦西河河口的富营养化程度较高,水环境质量较差,大部分时期处于富营养化状态. SD 与 TN 的相关关系不强($n=24, P>0.1$),与其他的环境因子均有较强的相关关系, Chl. a 与 $PO_4\text{-P}$ ($n=24, P<0.05, r=-0.47$) 和浊度 ($n=24, P<0.05, r=0.41$) 有较好的相关关系, TN 与 $NO_3\text{-N}$ ($n=24, P<0.05, r=0.50$) 和浊度 ($n=24, P<0.05, r=-0.48$) 有较好的相关关系, pH 值与浊度 ($n=24, P<0.01, r=0.65$) 和 $NH_4\text{-N}$ ($n=24, P<0.01, r=-0.57$) 有较好的相关关系(表 1).

表 1 百花(湖)水库麦西河河口环境因子($n=24$)

Tab. 1 The relationship between environmental factors at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

	SD	Chl. a	TN	TP	$PO_4\text{-P}$	$NO_3\text{-N}$	pH	浊度
SD	1							
Chl. a	-0.52 **	1						
TN	0.25	0.17	1					
TP	0.65 **	-0.25	0.13	1				
$PO_4\text{-P}$	0.93 **	-0.47 *	0.15	0.71 **	1			
$NO_3\text{-N}$	0.79 **	-0.35	0.50 *	0.48 *	0.68 **	1		
pH	-0.62 **	0.14	-0.25	-0.34	-0.60 **	-0.45 *	1	
浊度	-0.85 **	0.41 *	-0.48 *	-0.48 *	-0.75 **	-0.69 **	0.65 **	1
$NH_4\text{-N}$	0.49 *	-0.12	-0.08	0.27	0.51 *	0.22	-0.57 **	-0.54 **

* 代表显著水平 0.05(双尾检验); ** 代表显著水平 0.01(双尾检验).

2.2 浮游植物

2.2.1 浮游植物种类组成 从 2009 年 7 月至 2010 年 6 月对百花湖(水库)麦西河河口的 12 次采样调查共

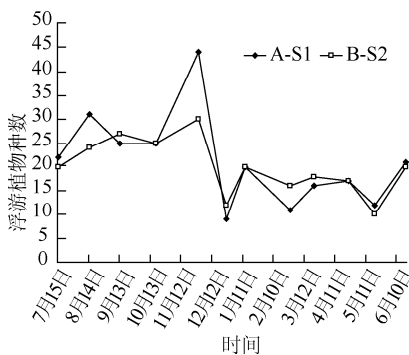


图 2 百花湖麦西河河口浮游植物种类数动态变化

Fig. 2 Number of phytoplankton species at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

监测出浮游植物 66 种(属),包括蓝藻 11 种(属),绿藻 30 种(属),硅藻 16 种(属),甲藻 3 种(属),裸藻 5 种(属),隐藻 1 种(属). 其中,11 月份监测出河口浮游植物种类数最多, S1 采样点监测到 44 种(属),而 12 月份监测到的浮游植物种类最少, 7-11 月份浮游植物种类数多于 12-6 月,每次监测浮游植物种类数在 20 种(属)左右. S1 点和 S2 点浮游植物种类数相差不多, S1 点浮游植物种类数略比 S2 点的高(图 2).

2.2.2 浮游植物优势藻类及次优势藻 百花湖(水库)麦西河河口主要的优势浮游植物是蓝藻门的湖泊假鱼腥藻 (*Pseudanabaena limnetica*). 在统计的一个水文年的浮游植物数据中,有 8 个月是以湖泊假鱼腥藻为优势种(即 2009 年 7-11 月, 2010 年 4-6 月),在冬春季是以硅藻门的梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*) 为主要优势种. 水库以蓝藻门中的针晶蓝纤维藻 (*Dactyloccopsis raphidioides*)、湖丝藻 (*Limnithrix redekei*)、林氏藻 (*Lyngbya* sp.)、肘状针杆藻 (*Synedra ulna*)、小球藻 (*Chlorella vul-*

garis)、多甲藻(*Peridinium* sp.)、囊裸藻(*Trachelomonas* sp.)为常见种。

2.2.3 浮游植物丰度的动态变化 在S1采样点浮游植物丰度在 $8.07 \times 10^4 - 3.35 \times 10^7$ cells/L 之间,而S2采样点在 $1.17 \times 10^4 - 2.44 \times 10^7$ cells/L 之间.S1和S2采样点有相同的变化趋势,但是S1采样点浮游植物丰度要高于S2采样点.S1采样点以2009年7月最高为 3.35×10^7 cells/L,而S2采样点以2009年9月最高为 2.44×10^7 cells/L(图3).在5-10月浮游植物丰度较高,由此可见,在夏季7-9月份最容易形成水华,水体富营养化程度也较高。

2.2.4 浮游植物各门类丰度组成 S1采样点和S2采样点浮游植物各门类丰度组成相似.2009年7-9月和2010年4-6月,浮游植物主要由湖泊假鱼腥藻组成,蓝藻成为浮游植物群落中相对丰度最高的门类.而在冬季和早春(11-4月),以硅藻门的梅尼小环藻和甲藻门的多甲藻为主要种类(图4).

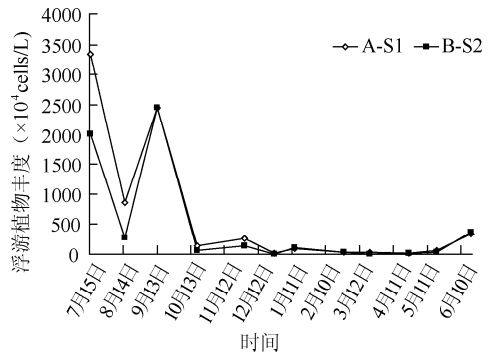


图3 百花湖(水库)麦西河河口浮游植物丰度季节动态变化

Fig. 3 Seasonal variation of phytoplankton abundance at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

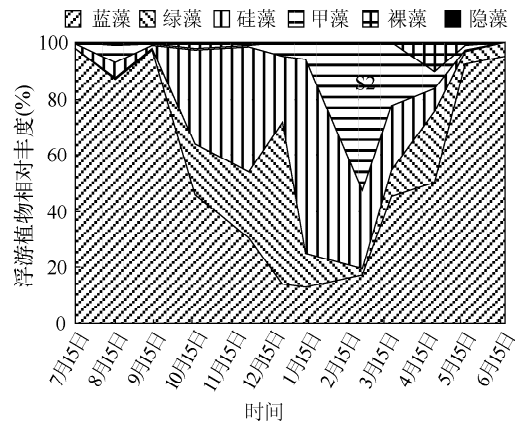
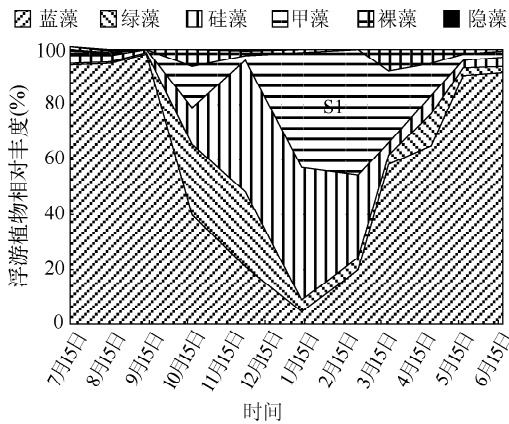


图4 百花湖(水库)麦西河河口浮游植物各门类相对丰度季节动态变化

Fig. 4 Seasonal variation of relative phytoplankton abundances of different phylums at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

2.2.5 浮游植物生物量的动态变化 在S1采样点,浮游植物生物量在 $0.424 - 14.590$ mg/L 之间,而S2采样点在 $0.144 - 7.535$ mg/L 之间.S1和S2采样点有相同的变化趋势,但是S1采样点浮游植物生物量要高于S2采样点.S1采样点浮游植物生物量以2009年7月最高,为 14.590 mg/L;而S2采样点以2010年2月最高,为 7.535 mg/L.从浮游植物各门类的生物量的组成可以看出,在夏季(7-10月)主要由蓝藻组成,而在冬季(12-3月)主要由硅藻和甲藻组成(图5).

2.2.6 浮游植物与环境因子之间的CCA分析 根据浮游植物丰度和出现的频率,分别选取约30种浮游植物,其丰度占整个水库浮游植物丰度的98%以上(表2).轴1特征值、贡献的百分数都比轴2的要高.在浮游植物种类与环境因子之间的相关系数中,可以看到各点轴1和轴2的相关性都很高,在S1和S2采样点,轴1和轴2浮游植物种类与环境因子的相关性在0.95以上.表明在S1采样点,浊度、TN、温度是影响浮游植物种类组成和分布的主要环境因子;而在S2采样点,温度、 PO_4-P 、SD、TP和pH值是影响浮游植物种类组成和分布的主要环境因子.S1和S2采样点虽然距离不远,但影响浮游植物组成的主要环境因子有区别.在S1和S2采样点影响浮游植物最关键的环境因子都是温度,因而温度成为影响贵州高原水体浮游植物群

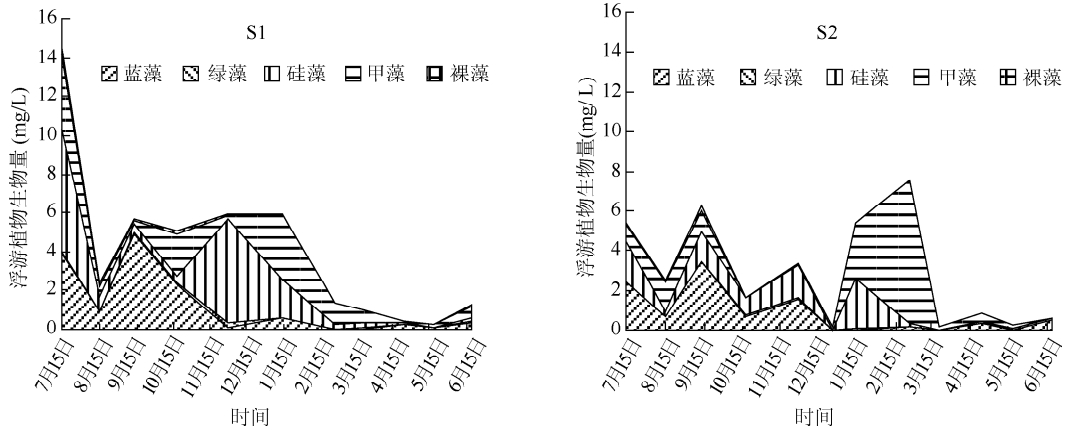


图5 百花湖(水库)麦西河口浮游植物各门类生物量季节动态变化

Fig. 5 Seasonal variation of phytoplankton biomass of different phylums at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

落结构动态变化的最主要环境因子。

在 S1 采样点, 蓝藻的大部分种类和裸藻受到温度和浊度的影响最大, 而硅藻和绿藻的大部分种类受到氮磷营养盐浓度的影响; S2 采样点和 S1 采样点相似, 水体中大部分的蓝藻种类受到水体浊度和温度等影响, 而其它藻类如绿藻、硅藻和裸藻受到 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的影响 (图 6)。

表 2 百花湖(水库)麦西河口浮游植物群落 CCA 分析的统计信息

Tab. 2 Statistics for the first two axes of CCA performed on the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

统计信息	采样点 S1		采样点 S2	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
特征值	0.142	0.129	0.279	0.141
百分数	20.764	18.731	27.352	13.850
特征值累计百分数	20.764	39.495	27.352	41.203
方差累计贡献百分数	23.724	45.127	32.547	49.028
浮游植物种类与环境因子相关性	1	0.997	0.983	0.984

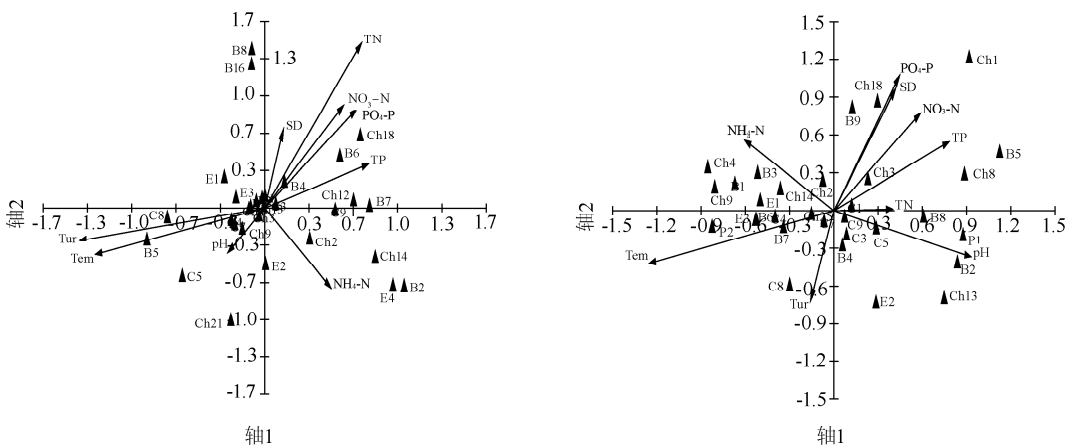


图 6 百花湖(水库)麦西河口浮游植物种类与环境因子之间的双轴等级排列 (C1-C11 代表蓝藻门种类; Ch1-Ch30 代表绿藻门种类; B1-B16 代表硅藻门种类; P1-P3 代表甲藻门种类; E1-E5 代表裸藻门种类; Cr1 代表隐藻门种类)

Fig. 6 Ordination biplots of species and environmental variables at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir

3 讨论

3.1 百花湖(水库)麦西河河口水质状况

百花湖麦西河河口在水文年内 TN 平均值为 1.42mg/L,其中 S1 采样点 TN、TP、Chl. a 的平均值分别为 1.46mg/L、0.081mg/L 和 52.15 μ g/L, S2 采样点 TN、TP、Chl. a 的平均值分别为 1.39mg/L、0.085mg/L 和 36.74 μ g/L,根据 GB 3838-2002 地表水环境质量标准,以 TN、TP 及 Chl. a 的含量来评价的麦西河河口的水质为Ⅳ类。N/P 比在 14-48,大部分时期 N/P 比超过 16,可见百花湖麦西河河口是属于磷限制的水体。富营养状态指数采用修正的卡尔森指数方法进行计算^[17],百花湖麦西河河口富营养化指数在 38.8-55.4 之间,最大值出现在 7 月份 S1 采样点,最小值出现在 12 月份 S2 采样点;平均富营养化指数为 50.4,这也表明了百花湖麦西河河口富营养化程度较高,大部分时期处于富营养化状态,尤其以夏季和秋季富营养化更为严重。从浮游植物丰度值来看,夏季和秋季河口浮游植物丰度较高,富营养化程度也较高,该时期发生水华的可能性也较大,这段时期应该加强水质管理。

3.2 百花湖(水库)麦西河河口浮游植物群落结构与环境因子之间的关系

水库作为一个受人工调节程度很高的水体,其浮游植物动态在很大程度上与水动力学有关^[18-20],但不同水体具有不同主要影响因子。河口不同于湖泊、水库和河流,污染物相对比较集中,水动力学条件变化大,浮游植物群落结构在各点差异较大。虽然 S1 与 S2 距离 2km 左右,浮游植物优势种类相同,丰度变化趋势一致,但是浮游植物丰度值不同,主要由水力条件和水质状况不同引起的,S1 采样点更远离水库开阔区,水体深度也较 S2 浅,水体的富营养化指标及富营养化指数均高于 S2 采样点。百花湖(水库)麦西河河口浮游植物群落的种类组成相对稳定,优势种类单一,以蓝藻中的湖泊假鱼腥藻为主要优势藻类,这一特征也与热带亚热带水库/湖泊浮游植物生态特征的表现相同^[11,22],明显有别于温带水体^[21]。在 S1 采样点浊度、TN、温度是影响浮游植物种类组成和分布的主要环境因子;在 S2 采样点,温度、PO₄-P、SD、TP 和 pH 值是影响浮游植物群落结构动态变化的主要环境因子。温度是影响 S1 和 S2 采样点浮游植物群落结构的主要环境因子,营养盐成为影响浮游植物群落结构动态变化的次要环境因子^[18]。在河口浮游植物与环境因子关系的研究中,黄小平等发现河口最大浑浊带的湍流混合过程增大了浮游植物细胞光合作用的机会,重力环流致使浮游植物及其光合作用所需的物质能较长时间停留^[23],认为浑浊度对浮游植物的影响较大,对比本文的研究,浑浊度也是影响浮游植物群落结构动态变化的主要环境因子之一,尤其是在 S1 采样点。在许多的水体中,温度是影响浮游植物生长和群落结构的最主要环境因子^[24-25],如广东的大镜山水库^[11]、巢湖^[12]和洪湖^[13]等,本文也得到了相似的结论。

4 参考文献

- [1] Reynolds CS. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [2] Habib OA, Tippet R, Murphy KJ. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland. *Hydrobiologia*, 1997, **350**: 63-79.
- [3] 郭沛勇,沈焕庭. 河口浮游植物生态学研究进展. *应用生态学报*, 2003, **14**(1): 139-142.
- [4] 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): 2278-2284.
- [5] Pilkaitytė R, Razinkovas A. Factors controlling phytoplankton blooms in a temperate estuary: nutrient limitation and physical forcing. *Hydrobiologia*, 2006, **555**: 41-48.
- [6] Singh PK, Malik A, Mohan D *et al.* Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River(India)-a case study. *Water Research*, 2004, **38**: 3980-3992.
- [7] Camdevyren H, Demyr N, Kanik A *et al.* Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-a in reservoirs. *Ecological Modelling*, 2005, **181**: 581-589.
- [8] Naselli-Flores L, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoir with different trophic state(Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, 1998, **369-370**: 163-178.
- [9] Naselli-Flores L. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationship between species composition and

- environmental factors. *Hydrobiologia*, 2000, **424**: 1-11.
- [10] Komárková J, Komárek O, Hejzlar J. Evaluation of the term monitoring of phytoplankton assemblages in a canyon-shape reservoir using multivariate statistical methods. *Hydrobiologia*, 2003, **504**: 143-157.
- [11] 李秋华, 韩博平. 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析. *生态学报*, 2007, **27**(6): 2355-2364.
- [12] 路娜, 尹洪斌, 邓建才等. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子之间的关系. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 950-956.
- [13] 邓建明, 蔡永久, 陈宇炜等. 洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子之间的关系. *湖泊科学*, 2010, **2**(1): 70-78.
- [14] 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.
- [15] 金湘灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [16] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游植物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [17] Lin QQ, Han BP, Lin QX *et al.* Reservoir water supply and eutrophication in Guangdong province (South China). In: International lakes environment committee ed. Proceedings of 9th international conference on the conservation and management of lakes. Shiga, 2001: 269-272.
- [18] Arfi R. The effects of climate and hydrology on the trophic status of Sélingué Reservoir, Mali, West Africa. *Lake and Reservoir: Research and management*, 2003, **8**: 247-257.
- [19] Horn H. The relative importance of climate and nutrients in controlling phytoplankton growth in Saldenbach Reservoir. *Hydrobiologia*, 2003, **504**: 159-166.
- [20] Gomes LC, Miranda LE. Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Paraná River Basin, Brazil. *Hydrobiologia*, 2001, **457**: 205-214.
- [21] Kotou K, Krientz L, Muthuri FM. Temporal changes in phytoplankton structure and composition at the Turkwel Gorge reservoir, Kenya. *Hydrobiologia*, 1998, **368**: 41-59.
- [22] 李秋华, 韩博平. 南亚热带调水水库春季浮游植物群落的结构与动态. *热带亚热带植物学报*, 2007, **15**(4): 294-300.
- [23] 黄小平, 黄良民. 河口最大浑浊带浮游植物生态动力过程研究进展. *生态学报*, 2002, **22**(9): 1527-1533.
- [24] Mayer J, Dokulil MT, Salbrechter M *et al.* Seasonal successions and trophic relations between phytoplankton, zooplankton, ciliate and bacteria in a hypertrophic shallow lake in Vienna, Austria. *Hydrobiologia*, 1997, **342/343**: 165-174.
- [25] 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.