

长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析

孟睿¹, 何连生^{1*}, 过龙根², 席北斗¹, 李中强³, 舒俭民¹, 刁晓君¹, 李必才⁴

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 3. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062; 4. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031)

摘要: 2011年9月对长江中下游的4个草型清水湖泊(龙感湖、梁子湖、斧头湖及保安湖)的浮游植物群落进行了调查, 共检出浮游植物7门231种, 浮游植物主要由蓝藻、硅藻和绿藻组成。4个湖泊均处于中营养状态, 出现的主要浮游植物有窝形席藻、肘状针杆藻、小席藻、小型黄丝藻等。运用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)对调查范围内的每个湖泊所有采样点的主要浮游植物与8个环境因子关系进行研究。结果表明, pH值和总磷是影响长江中下游4个典型草型湖泊浮游植物群落分布的主要环境因子。

关键词: 浮游植物; 环境因子; 典范对应分析; 草型湖泊

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2588-09

Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophytic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

MENG Rui¹, HE Lian-sheng¹, GUO Long-gen², XI Bei-dou¹, LI Zhong-qiang³, SHU Jian-min¹, DIAO Xiao-jun¹, LI Bi-cai⁴

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences Beijing 100012, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences Wuhan 430072, China; 3. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China; 4. College of Earth Science and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The phytoplankton communities in 4 macrophytic lakes (Longgan Lake, Liangzi Lake, Futou Lake and Baoan Lake) in Middle-Lower Yangtze Plain were investigated in September 2011, and 7 phylum and 231 species of phytoplankton were detected in the waters. The results indicated that phytoplankton was mainly composed of Cyanophyta, Bacillariophyta and Chlorophyta. The four lakes were mesotrophic. And the main phytoplankton was *Phormidium foveolarum*, *Synedra ulna*, *Phormidium tenu* and *Tribonema minus*. The relationships between the distribution of phytoplankton and environmental factors in each sampling site were studied by canonical correspondence analysis. The results demonstrated that pH and Total phosphorus are the key factors for the distribution of phytoplankton communities in 4 typical macrophytic lakes in Middle-Lower Yangtze Plain.

Key words: phytoplankton; environmental factors; canonical analysis; macrophytic lake

浮游植物是水环境中的初级生产者和食物链的基础, 它们分布广泛, 在生态系统的能量流动和物质循环中发挥着重要的作用^[1]。浮游植物群落的种类组成、演替规律及其与水环境化学和生物等环境因子的影响^[2-4], 对环境条件的变化具有指示作用, 同时环境条件的改变也直接或间接地影响到浮游植物的群落结构^[5]。

典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)是一种非线性多元直接梯度分析方法, 它把对应分析与多元回归结合起来^[6]。不同于以前的直接梯度分析, CCA可以结合多个环境因子, 包含的信息量大, 结果直观明显, 从而更好地反映群落与环境的关系^[7]。近年来, CCA被广泛应用

于浮游植物群落与环境因子间复杂关系的研究^[8,9]。

根据有关研究学者对长江中下游一些草型湖泊的调查研究结果表明^[10,11], 9月是大型水生植物生长最茂盛、种类最多的时期, 因此, 选择2011年9月长江中下游4个典型草型湖泊(龙感湖、梁子湖、斧头湖及保安湖)为代表进行现场调查和水样及浮游植物的采集。运用典范对应分析来探讨这4个草

收稿日期: 2012-10-22; 修订日期: 2012-12-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-002)

作者简介: 孟睿(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水处理工程, E-mail: 815243@163.com

* 通讯联系人, E-mail: heliansheng08@126.com

型湖泊浮游植物分布与环境因子之间的关系,以期在目前状态下长江中下游草型湖泊的治理及保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 保安湖

保安湖(114°23'E, 30°15'N)是长江中下游南岸一个浅水草型湖泊,地处大冶市西北部,毗邻鄂州市和武汉市,流域面积 53.88 km²,湖面面积 48.0 km²,最大水深 4.4 m,平均水深 3.4 m。保安湖由于受地质构造和地貌条件的影响,湖泊呈南北向狭长,湖长 10 km,最大宽度 8.2 km,平均宽度 4.1 km,湖岸线长 121 km。调查发现保安湖水生维管束植物计有 102 种(变种),隶属于 52 科 87 属,其中蕨类植物 8 科 7 属 8 种,被子植物科 45 科 80 属 94 种^[12]。

1.1.2 斧头湖

斧头湖在湖北嘉鱼县县城东北 28 km,嘉鱼、江夏、咸安三县区交界处,是湖北省第 4 大湖泊(E: 114°09'~114°20', N: 29°55'~30°07'),流域面积 1 238 km²,湖面面积 216 km²,湖水水位最高达 24.3 m,平均水深 2.9 m,蓄水量 3.3 × 10⁸ m³,多含腐殖质软泥,湖盆平坦。斧头湖通过金水河与长江相通,水位逐月及年际变化均十分明显,是长江中下游一个典型的具有灌溉和养殖等多功能浅水性吞吐型湖泊,由于水交换量较大,斧头湖水体水质近年来一直维持在地表水功能Ⅲ类以上水平。

斧头湖有水生维管束植物 102 种(含变种),隶属于 38 科 63 属,其中蕨类植物 4 科 4 属 4 种,双子叶植物 22 科 30 属 49 种(变种),单子叶植物 12 科 29 属 48 种(变种)。调查发现斧头湖挺水植物主要分布于沿岸湿地,湖内挺水植被主要分布于真沿岸带,由于人类活动的干扰,挺水植被带成不连续的环状,浮叶植物分布广泛,尤其菱属植物,在湖中几乎随处可见,漂浮植物的分布有较大随机性,主要发现于屏蔽性较好的小湖湾以及挺水植物和浮叶植物的空隙中,沉水植物分布范围最广,从岸边到湖心均有分布,但有的围栏内中则难于发现沉水植物^[13,14]。

1.1.3 龙感湖

龙感湖(29°52'~30°05'N, 115°55'~116°17'E)是湖北省和安徽省交界处的一个淡水湖泊,为湖北省黄冈市黄梅县和安徽省安庆市宿松县共有。流域总面积 5 365 km²,湖面面积 250 km²,常年平均水深 3.78 m。调查发现龙感湖计有水生(湿生)植物 182

种,隶属于 60 科 123 属;其中蕨类植物 7 科 7 属 8 种,被子植物 53 科 116 属 174 种。

1.1.4 梁子湖

梁子湖(114°31.19'~114°42.25'E, 30°04.55'~30°20.26'N)位于湖北省东南部,长江中游南岸,东与黄石市交界,南与咸宁市为邻,西与武汉市接壤,是湖北省第二大湖泊,流域面积 3 260 km²,湖面面积 482.5 km²,常年平均水深 3 m,贮水量 6.5 × 10⁸ m³,是全国十大名湖之一。调查发现梁子湖计有水生(湿生)植物计 102 种(变种),隶属于 37 科 70 属;其中藻类植物 1 科 1 属 1 种、苔藓植物 1 科 1 属 1 种、蕨类植物 5 科 5 属 7 种,被子植物 30 科 63 属 93 种,真性水生植物种类丰富^[11,15]。

综上所述,4 个草型湖泊均位于长江中下游地区,湖面面积较大,水生植物生长旺盛、种类繁多,地质构造却有差异,因此选择这 4 个湖泊作为研究对象,探讨长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析。

1.2 采样时间和采样点

采样时间为 2011 年 9 月。采样点设置:根据各个湖泊特征,在保安湖设置 8 个采样点(图 1),斧头湖设置 7 个采样点(图 2),龙感湖设置 12 个采样点(图 3),梁子湖设置 12 个采样点(图 4),每个采样点的描述见表 1。



图 1 保安湖采样点示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Baoan Lake

1.3 浮游植物的采集与鉴定

在水体表层 0.5 m 处采取 1 L 水样,加鲁哥氏液固定,静置 24 h 以上浓缩至 30 mL。计数时取 0.1 mL 放入浮游植物计数框内进行镜检,根据文献^[16,17]进行分类鉴别,并计算出浮游植物细胞个数^[18,19]。

1.4 环境因子的测定



图 2 斧头湖采样点示意

Fig. 2 Map of sampling sites in Futou Lake



图 3 龙感湖采样点示意

Fig. 3 Map of sampling sites in Longgan Lake

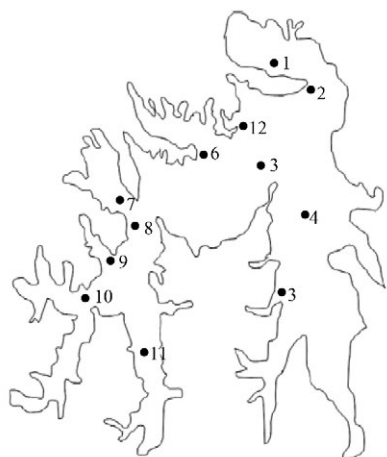


图 4 梁子湖采样点示意

Fig. 4 Map of sampling sites in Liangzi Lake

环境因子的取样测定与浮游植物样品的采集同步进行。pH 值采用玻璃电极法测定,溶解氧采用碘量法测定,高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾法测定,

总磷和溶解性磷酸盐采用钼锑抗分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂光度法测定,硝酸盐氮采用紫外分光光度法测定,总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[20]。

1.5 数据分析

频度^[21] = 某种藻类出现的样方数 / 整个样方数 × 100

Margalef 指数^[21] 计算方法: $d = (s - 1) / \ln N$

式中, s 为种类数; N 为样品中总个体数。

采用 Canoco for Windows 4.5 软件对物种数据和环境数据进行 CCA 分析。物种数据经过筛选,本文用于排序的物种要求满足该物种在各样点出现的频度 > 30% 的要求^[21]。物种经过 $\lg(x + 1)$ 转换,环境数据除 pH 值以外都进行 $\lg(x + 1)$ 转换^[22],利用 Canoco for Windows 软件包中的 Wcanolmp 将其分别生成名为 spe. dta 和 env. dta 的文件。应用 Canoco for Windows 4.5 进行计算,将生成的数据文件 spe-env. cdw 在 Canodraw for Windows 中作图,排序结果用物种-环境因子关系的双序图表示,图中环境因子用带有箭头的线段表示,向量长短表示其在主轴中的作用;线段所处象限代表环境因子与排序轴间的正负关系^[23]。

2 结果与讨论

2.1 环境因子

4 个湖泊各采样点的环境因子平均值如表 2 所示。龙感湖 pH 平均值最低,梁子湖 pH 平均值最高。溶解氧浓度最高为 $8.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最低为 $6.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别出现在梁子湖和斧头湖。高锰酸盐指数、总磷、溶磷、总氮、氨氮和硝氮平均浓度分别在 $6.180 \sim 9.875 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.047 \sim 0.312 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.011 \sim 0.014 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.478 \sim 0.898 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.048 \sim 0.212 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.291 \sim 0.905 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化。根据 TLI 分级标准,这 4 个湖泊均处于中营养状态^[24]。

2.2 浮游植物种类组成与数量分布

表 3 及表 4 分别列出了每个湖泊浮游植物种类组成、优势物种及浮游植物的数量。

由表 3 可知 4 个湖泊浮游植物主要以硅藻、绿藻和蓝藻为主,优势种均为蓝藻门的窝形席藻。浮游植物种类数最多的为龙感湖,其次为斧头湖和保安湖,其中梁子湖种类数最少。

由表 4 可知,在调查期间 4 个湖泊浮游植物总数范围在 $171.20 \sim 433.06 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。每个

表 1 调查湖泊每个采样点描述
Table 1 Description of sampling sites

湖泊名称	监测点位	各点位特征	
保安湖	3	未见水生植物, 周围有居民, 水面宽阔	
	4	位于湖中心, 未见水生植物	
	7	未见水生植物, 周围有岛屿, 有养殖区	
	其余各点	情况类似, 位于湖泊岸带, 以喜旱莲子草为优势种, 亚优势种为挺水植物, 只要有狭叶香蒲和菰, 伴有绵毛蓼、水蓼和芦苇	
斧头湖	1	大量的水草, 生长茂盛, 以凤眼莲为优势种, 亚优势种为菰, 还伴有喜旱莲子草、苦草、水莎草和浮萍等	
	2	位于主航道, 有养殖区, 只见到菱一种水生植物	
	3、4	水面宽阔, 位于主航道上, 航道两侧有养殖区, 只见到菱一种水生植物	
	5、6、7	水面宽阔, 无养殖区, 只见到水蓼一种水生植物	
龙感湖	1、3	周围有围网, 敞水区, 水生植物茂盛, 以菱为优势种, 半生浮叶植物 4 角菱和芡实, 漂浮植物浮萍和沉水植物金鱼藻	
	2	以菱和轮叶黑藻为优势种, 伴生沉水植物金鱼藻, 水生植物茂盛	
	4	敞水区, 以菱、菰和水蓼为主	
	5	周围有围网, 敞水区, 优势种为凤眼莲和菰, 亚优势种为浮萍、水鳖、金鱼藻, 喜旱莲子草、水蓼和粗梗水蕨为伴生种, 水生植物茂盛	
	6、7	未见水生植物, 围网附近	
	8	周围有围网, 挺水植物水蓼为绝对优势种	
	9	周围有围网, 以菱和芡实为优势种, 伴生挺水植物水蓼和漂浮植物紫萍和槐叶萍	
	10	以菱为优势种, 伴生沉水植物金鱼藻	
	11	敞水区, 优势种为菱, 亚优势种为冠菱	
	12	航道中, 两侧挺水植物几乎为水蓼	
	梁子湖	1、2	菱为优势种, 伴生莲和水蓼
		3	周围有岛屿, 水生植物生长茂盛, 挺水植物包括水蓼、菰和芦苇, 浮叶植物包括荇菜和菱; 沉水植物包括狐尾藻、苦草、微齿眼子草和金鱼藻, 菱和菰为优势种, 亚优势种为微齿眼子草
4		周围有岛屿, 挺水植物植物包括水蓼、浮叶植物包括荇菜和菱, 沉水植物包括苦草和竹叶眼子菜, 苦草和水蓼为优势种	
5		水面宽阔, 周围有岛屿及水鸟, 水蓼为优势种, 亚优势种为微齿眼子菜和菱	
6		优势种为菱和菰, 亚优势种为黄丝草, 伴生种包括狐尾藻、苦草、荇菜、水蓼、芦苇和金鱼藻	
7~9、11		仅有水蓼一种水生植物	
10		有养殖区, 菱为优势种, 莲和水蓼为伴生种	
12		周围有岛屿, 水面宽阔, 有养殖区, 水生植物包括狐尾藻、苦草和微齿眼子菜	

表 2 采样湖泊水体环境因子平均值

Table 2 Mean values of the environmental factors

湖泊名称	pH	溶解氧 /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	溶磷 /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	总氮 /mg·L ⁻¹	氨氮 /mg·L ⁻¹	硝氮 /mg·L ⁻¹	TLI 指数
保安湖	8.28	8.38	7.705	0.014	0.077	0.797	0.212	0.291	33.76
梁子湖	8.99	8.86	9.875	0.011	0.047	0.898	0.092	0.400	36.50
斧头湖	8.18	6.70	8.073	0.011	0.068	0.685	0.048	0.384	32.76
龙感湖	7.79	6.98	6.180	0.013	0.073	0.478	0.112	0.905	33.50

表 3 4 个湖泊浮游植物种类组成及优势种

Table 3 Species composition and dominant species of phytoplankton

湖泊名称	每门浮游植物物种数及占藻类总数的百分比/%							优势种 (出现频度/%)	亚优势种 (出现频度/%)
	硅藻门	绿藻门	蓝藻门	裸藻门	甲藻门	金藻门	黄藻门		
斧头湖	57 种	22 种	13 种	14 种	1 种	—	—	窝形席藻(83.33)	肘状杆藻(83.33); 小席藻(83.33); 小型黄丝藻(100)
	51.35	19.82	11.71	12.61	0.90				
保安湖	21 种	27 种	22 种	16 种	1 种	—	2 种	窝形席藻(85.71)	钝顶螺旋藻(85.71) 肘状杆藻(85.71) 近缘黄丝藻(85.71)
	23.60	30.34	24.72	17.98	1.12		2.25		
龙感湖	58 种	42 种	25 种	15 种	2 种	1 种	4 种	窝形席藻(58.33)	小颤藻(66.67) 小型黄丝藻(66.67)
	39.46	28.57	17.01	10.20	1.36	0.68	2.72		
梁子湖	19 种	29 种	18 种	7 种	3 种	—	1 种	窝形席藻(90.91)	拟新月藻(72.73) 中华尖头藻(54.55) 小席藻(72.73)
	24.68	37.66	23.38	9.09	3.90		1.30		

表 4 每个湖泊每门浮游植物平均个数
Table 4 Mean numbers of the phytoplankton

湖泊名称	浮游植物平均个数 $\times 10^4 / \text{个} \cdot \text{L}^{-1}$							总数
	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	甲藻门	黄藻门	裸藻门	金藻门	
保安湖	384.86	1.94	2.31	0.08	8.35	1.19	0.00	367.43
梁子湖	425.00	4.19	1.78	0.13	1.24	0.72	0.00	433.06
斧头湖	218.33	2.33	7.63	0.04	19.1	0.60	0.00	250.33
龙感湖	162.33	2.14	4.41	0.01	1.70	0.60	0.01	171.20

湖泊蓝藻门的个数最多,其次为硅藻门和绿藻门。其中梁子湖浮游植物平均个数最多,其次为保安湖和斧头湖,龙感湖浮游植物平均个数最少。

2.3 Margalef 指数分析

斧头湖、保安湖、龙感湖及梁子湖每个采样点的丰富度指数见表 5。

表 5 每个湖泊每个采样点丰富度指数

Table 5 Species richness of algae in each sampling site

点位	斧头湖	保安湖	龙感湖	梁子湖
1	3.76	2.15	2.33	1.19
2	1.64	2.28	4.23	1.42
3	3.01	1.95	2.95	1.99
4	2.60	1.32	2.57	1.99
5	1.89	1.34	2.25	2.13
6	2.75	1.95	2.80	0.89
7	2.13	1.91	1.98	1.64
8	—	1.35	1.81	1.27
9	—	—	2.50	1.44
10	—	—	2.80	1.46
11	—	—	3.09	1.85
12	—	—	1.59	1.11
平均值	2.54	1.78	2.58	1.53

根据表 5 可知,斧头湖、保安湖、龙感湖和梁子湖丰富度指数的变化范围分别为: 1.64 ~ 3.76、1.32 ~ 2.28、1.59 ~ 4.23、0.89 ~ 1.99。

斧头湖的点位 1 和 3 丰富度指数大于 3 而小于 4,水质处于 β -中污状态,其余 5 个样点丰富度指数均低于 3,水质处于 α -中污状态。根据现场调查可知,1 号点位有大量的水草,生长非常茂盛,主要有:水葫芦、菱、苦草等,未见养殖区域,浮游植物总数相对较少。2 号点位位于主航道上,有养鱼区,只见到菱。保安湖和梁子湖所有点位丰富度指数均低于 3,水质处于 α -中污状态,两个湖泊上养殖区较多,周围有居民居住。龙感湖 2 号点位丰富度指数大于 4 而小于 5,水质处于寡污状态,11 号点位水质处于 β -中污状态,其余 10 个样点水质处于 α -中污状态^[25, 26],其中 2 号点位周围水草很多,大部分为菱,有少量的围网。

根据表 1 ~ 表 5 可知,梁子湖浮游植物种类数

最少而平均个数最多,TLI 指数最大,丰富度指数最小;而龙感湖浮游植物种类数最多,但平均个数最少,TLI 指数相对较低,大型水生植物种类数最多,生长茂盛,丰富度指数最大。近年来,很多研究结果也都证实了大型水生植物的生长抑制了浮游植物的生长^[27]。斧头湖、保安湖、龙感湖及梁子湖这 4 个湖泊富营养化越严重的区域,浮游植物种类数越少,平均个数越多,丰富度指数越小,大型水生植物生长贫瘠,金鱼藻和紫萍等耐污种出现;相反,富营养化程度越低的区域,浮游植物种类数越多,平均个数越少,丰富度指数越大,大型水生植物生长最茂盛,轮叶黑藻和苦草等清洁种出现。

根据现场调查数据可知,4 个湖泊所有点位 TLI 指数均处于 30 ~ 50 之间,处于中营养状态,出现的主要浮游植物有窝形席藻、肘状针杆藻、小席藻、小型黄丝藻、钝顶螺旋藻、近缘黄丝藻、小颤藻、拟新月藻、四尾栅藻、纤细月牙藻和纤细角星鼓藻等。

2.4 浮游植物群落与环境因子关系的 CCA 分析

典范对应分析(CCA)可分析浮游植物群落组成与环境因子之间对应关系^[9]。在主轴 1 和主轴 2 构成的排序图中,环境因子用带有箭头的线段表示,向量长短代表了其在主轴中的作用,箭头所处象限表示环境因子与排序轴之间相关性的正负^[8]。分析时,可以做出某一类(或样点)与环境因子连线的垂直线,垂直线与环境因子连线相交点离箭头越近,表示该种(或该样点)与该类生境因子的正相关性越大,处于另一端的则表示与该类环境因子具有的负相关性越大^[25]。对浮游植物的优势种在主轴上排序,则可反映这些浮游植物与环境因子之间的对应关系。根据浮游植物出现频度和个数,斧头湖、保安湖、龙感湖和梁子湖分别选取了 16、14、16 和 16 种浮游植物用于 CCA 分析,浮游植物的代码见表 6 ~ 9。

图 5 ~ 8 分别反映了斧头湖、保安湖、龙感湖和梁子湖浮游植物与环境因子间的关系,从排序图上明显反映出浮游植物对环境条件的不同适应特点。

表 6 斧头湖 CCA 分析中浮游植物种类代码

Table 6 Code of phytoplankton species for CCA of Futou Lake

种类	代码
窝形席藻(<i>Phormidium foveolarum</i>)	S1
小席藻(<i>Phormidium tenuis</i>)	S2
肘状针杆藻(<i>Synedra ulna</i>)	S3
小型黄丝藻(<i>Tribonema minus</i>)	S4
尖针杆藻(<i>Synedra acusvar</i>)	S5
柯氏并联藻(<i>Quadrigula chodatii</i>)	S6
单角盘星藻具孔变种(<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>)	S7
近缘黄丝藻(<i>Tribonema affine</i>)	S8
尾裸藻(<i>Euglena caudata</i>)	S9
齿牙栅藻(<i>Scenedesmus denticulatus</i>)	S10
拟菱形弓形藻(<i>Schroaderia nitzschoides</i>)	S11
纤细角星鼓藻(<i>Staurastrum gracile</i> Ralfs)	S12
双射盘星藻(<i>Pediastrum biradiatum</i>)	S13
钝顶螺旋藻(<i>Spirulina platensis</i>)	S14
双头针杆藻(<i>Synedra amphicephal</i>)	S15
四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	S16

表 7 保安湖 CCA 分析中浮游植物种类代码

Table 7 Code of phytoplankton species for CCA of Baoan Lake

种类	代码
钝顶螺旋藻(<i>Spirulina platensis</i>)	S1
窝形席藻(<i>Phormidium foveolarum</i>)	S2
肘状针杆藻(<i>Synedra ulna</i>)	S3
近缘黄丝藻(<i>Tribonema affine</i>)	S4
血红裸藻(<i>Euglena sanguinea</i> Ehr.)	S5
集星藻(<i>Actinastrum hantzschii</i>)	S6
弯形小尖头藻(<i>Raphidiopsis curvata</i>)	S7
鱼形裸藻(<i>Euglena pisciformis</i> Klebs)	S8
喙头舟形藻(<i>Navicula rhynchocephala</i>)	S9
单角盘星藻(<i>Pediastrum simplex</i>)	S10
四角十字藻(<i>Crucigenia quadrata</i> Morr)	S11
不定微囊藻(<i>Microcystis incerta</i> Lemm)	S12
尾裸藻(<i>Euglena caudata</i>)	S13
微小平裂藻(<i>Merismopedia tenuissima</i>)	S14

表 8 梁子湖 CCA 分析中浮游植物种类代码

Table 8 Code of phytoplankton species for CCA of Liangzi Lake

种类	代码
窝形席藻(<i>Phormidium foveolarum</i>)	S1
拟新月藻(<i>Closteriopsis longissima</i>)	S2
中华尖头藻(<i>Merismopedia sinica</i>)	S3
小席藻(<i>Phormidium tenuis</i>)	S4
相似丝藻(<i>U. aequalis</i>)	S5
单角盘星藻具孔变种(<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>)	S6
卷曲鱼腥藻(<i>Anabaena circinalis</i>)	S7
肘状针杆藻(<i>Synedra ulna</i>)	S8
小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	S9
钝顶螺旋藻(<i>Spirulina platensis</i>)	S10
尖针杆藻(<i>Synedra acusvar</i>)	S11
不定微囊藻(<i>Microcystis incerta</i> Lemm)	S12
具缘微囊藻(<i>M. marginata</i>)	S13
鱼形裸藻(<i>Euglena pisciformis</i> Klebs)	S14
近缘黄丝藻(<i>Tribonema affine</i>)	S15
尾裸藻(<i>Euglena caudata</i>)	S16

表 9 龙感湖 CCA 分析中浮游植物种类代码

Table 9 Code of phytoplankton species for CCA of Longgan Lake

种类	代码
窝形席藻(<i>Phormidium foveolarum</i>)	S1
小颤藻(<i>Oscillatoria tenuis</i>)	S2
小型黄丝藻(<i>Tribonema minus</i>)	S3
龙骨栅藻(<i>Scenedesmus carinatus</i>)	S4
拟菱形弓形藻(<i>Schroaderia nitzschoides</i>)	S5
中型脆杆藻(<i>Fragilaria intermedia</i>)	S6
尖针杆藻(<i>Synedra acusvar</i>)	S7
尖布纹藻(<i>Gyrosigma acuminatum</i> Ehr.)	S8
弯形尖头藻(<i>Raphidiopsis curvata</i>)	S9
缢缩异极藻(<i>Gomphonema constrictum</i>)	S10
肘状针杆藻(<i>Synedra ulna</i>)	S11
窗格平板藻(<i>Tabellaria fenestrata</i>)	S12
类颤鱼腥藻(<i>Anabaena osicellariodes</i>)	S13
鱼形裸藻(<i>Euglena pisciformis</i> Klebs)	S14
齿牙栅藻(<i>Scenedesmus denticulatus</i>)	S15
小球藻(<i>Chlorella vulgaris</i>)	S16

对于环境因子来讲 4 个排序图的第一、第二排序轴间的相关系数都为 0,说明排序结果是可信的^[28-29].

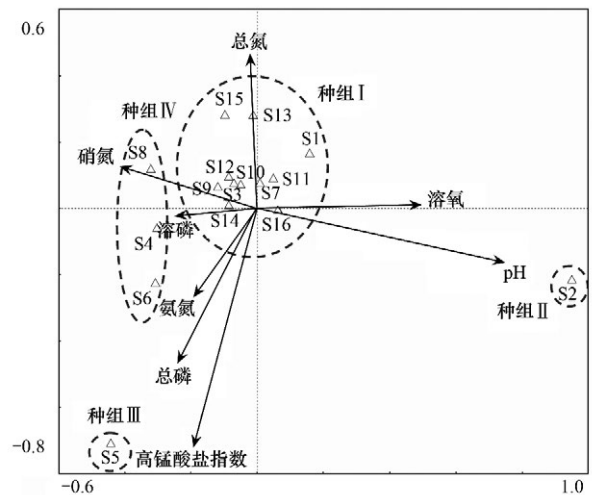


图 5 斧头湖浮游植物物种与环境关系的 CCA 排序
Fig. 5 CCA ordination biplot between phytoplankton species and environmental factors of Futou Lake

由图 5 可知,第一排序轴与溶解氧浓度和 pH 值呈正相关,与其他环境因子呈负相关;第二排序轴与总磷和硝氮浓度呈正相关,与其他环境因子呈负相关. 根据 8 个主要环境因子的分布特征,CCA 排序分析可将 16 种浮游植物种类分为 4 个组. 种组 I 包括窝形席藻、肘状针杆藻、单角盘星藻具孔变种、尾裸藻、齿牙栅藻、拟菱形弓形藻、纤细角星鼓藻、双射盘星藻、钝顶螺旋藻、双头针杆藻和四尾栅藻 11 种浮游植物,与总磷浓度有很大的正相

关; 种组 II 只包括小席藻 1 种浮游植物, 其分布格局与 pH 值呈正相关; 种组 III 只包括尖针杆藻 1 种浮游植物, 与高锰酸盐指数和总氮浓度呈负相关; 种组 IV 包括小型黄丝藻、柯氏并联藻和近缘黄丝藻 3 种浮游植物, 与硝氮和总氮有很大的正相关, 与氨氮有很大的负相关. 结果表明, 总磷浓度和 pH 值是影响斧头湖浮游植物物种分布的重要因素.

根据图 6 可知, 第一排序轴与高锰酸盐指数、总磷、溶磷和硝氮浓度呈正相关, 与其他环境因子呈负相关; 第二排序轴与 pH 值、总磷、溶解氧、总氮浓度呈正相关, 与其他环境因子呈负相关. 根据 8 个主要环境因子的分布特征, CCA 排序分析可将 14 种浮游植物种类分为 6 个组. 种组 I 只包括钝顶螺旋藻 1 种浮游植物, 与 pH 值、总氮和溶解氧浓度有很大的负相关, 与总磷浓度有很大的正相关; 种组 II 包括弯型小尖头藻、喙头舟形藻和四角十字藻 3 种浮游植物, 其分布格局与总磷浓度有很大的正相关; 种组 III 包括尾裸藻和微小平裂藻 2 种浮游植物, 与高锰酸盐指数浓度有很大的正相关; 种组 IV 只包括不定微囊藻 1 种浮游植物, 与硝氮浓度有很大的正相关; 种组 V 只包括集星藻 1 种浮游植物, 与氨氮浓度有很大的负相关; 种组 VI 包括钝顶螺旋藻、窝形席藻、近缘黄丝藻、鱼形裸藻和单角盘星藻 5 种浮游植物, 与 pH 值、总氮和溶解氧浓度呈正相关. 结果表明, 总磷、总氮浓度和 pH 值是影响保安湖浮游植物物种分布的重要因素.

根据图 7 可知, 第一排序轴与 pH 值、溶解氧、

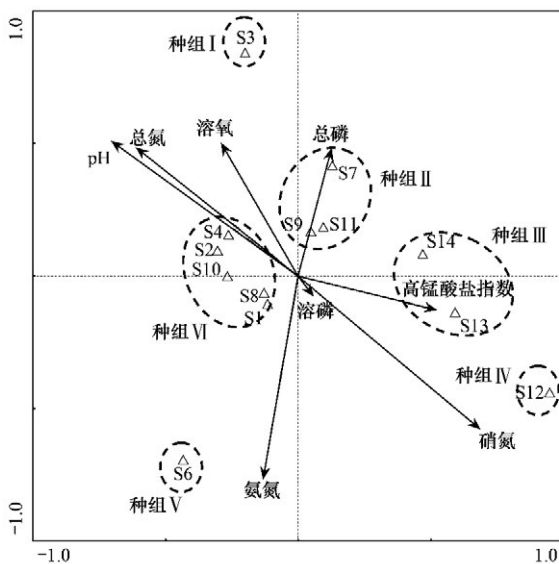


图 6 保安湖浮游植物物种与环境关系的 CCA 排序
Fig. 6 CCA ordination biplot between phytoplankton species and environmental factors of Baohan Lake

总磷、硝氮和氨氮浓度呈正相关, 与其他环境因子呈负相关; 第二排序轴与硝氮和总磷浓度呈正相关, 与其他环境因子呈负相关. 根据 8 个主要环境因子的分布特征, CCA 排序分析可将 16 种浮游植物种类分为 4 个组. 种组 I 包括小颤藻、龙骨栅藻、拟菱形弓形藻、尖针杆藻、尖布纹藻、弯形尖头藻、缢缩异极藻、肘状针杆藻、类颤鱼腥藻、鱼形裸藻、齿牙栅藻和小球藻 12 种浮游植物, 与 pH 值和总磷浓度有很大的正相关, 在排序图上, 都位于 pH 值轴和总磷轴附近; 种组 II 包括小型黄丝藻和窗格平板藻 2 种浮游植物, 其分布格局与溶解氧和氨氮浓度有很大的正相关; 种组 III 只包括中型脆杆藻 1 种浮游植物, 与硝氮浓度有很大的正相关. 种组 IV 只包括窝形席藻 1 种浮游植物. 结果表明, 总磷浓度和 pH 值是影响龙感湖浮游植物物种分布的重要因素.

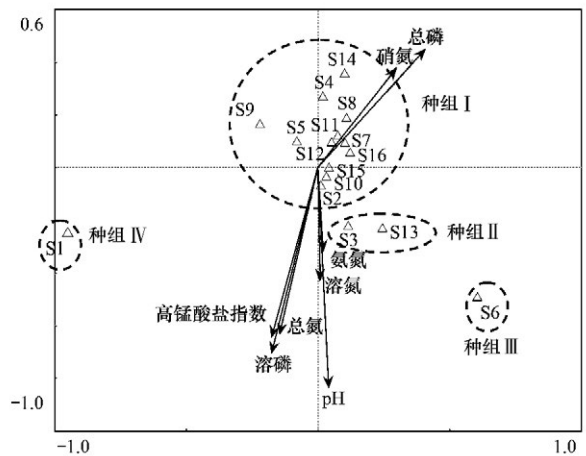


图 7 龙感湖浮游植物物种与环境关系的 CCA 排序图
Fig. 7 CCA ordination biplot between phytoplankton species and environmental factors of Longgan Lake

根据图 8 可知, 第一排序轴与总磷、溶解磷和高锰酸盐指数浓度呈正相关, 与其他环境因子呈负相关; 第二排序轴与溶磷、总磷、硝氮和氨氮浓度呈正相关, 与其他环境因子呈负相关. 根据 8 个主要环境因子的分布特征, CCA 排序分析可将 16 种浮游植物种类分为 3 个组. 种组 I 包括窝形席藻、两栖颤藻、单角盘星藻具孔变种、肘状针杆藻、小球藻、钝顶螺旋藻、尖针杆藻、不定微囊藻、具缘微囊藻和近缘黄丝藻 10 种浮游植物, 与总磷和溶磷浓度有很大的正相关, 在排序图上, 都位于总磷轴、溶磷轴和硝氮轴附近; 种组 II 包括小席藻、相似丝藻、卷曲鱼腥藻、鱼形裸藻和尾裸藻 5 种浮游植物, 与高锰酸盐指数和总氮浓度有很大的正相关; 种组 III 只包括中华尖头藻 1 种浮游植物, 与总氮浓度有

很大的负相关,与 pH 值和溶解氧浓度呈正相关。结果表明,总磷和硝氮浓度是影响梁子湖浮游植物物种分布的重要因素。

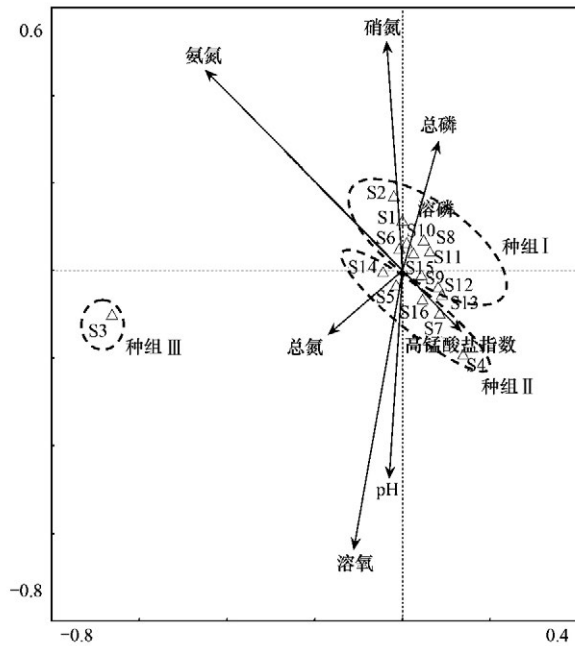


图8 梁子湖浮游植物物种与环境关系的 CCA 排序图
Fig. 8 CCA ordination biplot between phytoplankton species and environmental factors of Liangzi Lake

综上所述,影响 4 个湖泊浮游植物群落分布的主要环境因子是 pH 值和总磷浓度。富营养化水体中碳酸盐体系的化学平衡决定 pH 值变化,而碳酸盐化学平衡又受到藻类种群繁殖、转化,藻类光合、呼吸等生物过程的影响。且研究已经表明,pH 值与藻类初级生产力显著正相关^[30]。杨丽标等^[21]研究表明,藻类种群分布与水体 pH 值的相关性可能是由于不同水环境条件下藻类种群的生长繁殖变化导致水体 pH 值变化所致。4 个湖泊水体均呈明显的偏碱性,因此 pH 值是影响浮游植物种类生长的限制条件。

3 结论

(1) 4 个湖泊共检出浮游植物 7 门 231 种,浮游植物主要由蓝藻、硅藻和绿藻组成;从种属数量分析,硅藻 > 绿藻 > 蓝藻;从平均个数分析,蓝藻 > 绿藻 > 硅藻,蓝藻占绝对优势。4 个湖泊的优势物种均为窝形席藻。

(2) 4 个湖泊中富营养化越严重的湖泊,丰富度指数越大,浮游植物种数越少而平均个数越多,大型水生植物生长贫瘠。

(3) 影响 4 个湖泊浮游植物群落分布的主要环

境因子是 pH 值和总磷浓度。

(4) 春季 4 个湖泊均处于中营养状态,出现的主要浮游植物有窝形席藻、肘状针杆藻、小席藻、小型黄丝藻、钝顶螺旋藻、近缘黄丝藻、小颤藻、拟新月藻、四尾栅藻、纤细月牙藻和纤细角星鼓藻等。

参考文献:

[1] Home A J, Goldman C R. Limnology [M]. (2nd ed.). New York: McGraw-Hill Companies, 1994. 226-264.

[2] Håkanson L, Boulion V V. A general dynamic model to predict biomass and production of phytoplankton in lakes [J]. Ecological Modelling, 2003, 165(2-3): 285-301.

[3] Gameiro C, Cartaxana P, Brotas V. Environmental drivers of phytoplankton distribution and composition in Tagus Estuary, Portugal [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 75(1-2): 21-34.

[4] Arhonditsis G B, Winder M, Brett M T, et al. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA) [J]. Water Research, 2004, 38(18): 4013-4027.

[5] Lepistö L, Holopainen AL, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes [J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 2004, 34(3): 236-248.

[6] 栾青杉,孙军,宋书群,等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 445-450.

[7] 张金屯. 植被与环境关系的分析 II. CCA 和 DCCA 限定排序 [J]. 山西大学学报(自然科学版), 1992, 15(3): 292-298.

[8] Habib O A, Tippet R, Murphy K J. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland [J]. Hydrobiologia, 1997, 350(1-3): 63-79.

[9] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2355-2364.

[10] 彭映辉,简永兴,王建波,等. 湖北省五大湖泊水生植物多样性的比较研究 [J]. 水生生物学报, 2004, 28(5): 464-470.

[11] 陈中义,雷泽湘,周进,等. 梁子湖六种沉水植物种群数量和生物量周年动态 [J]. 水生生物学报, 2000, 24(6): 582-588.

[12] 马凯,蔡庆华,谢志才,等. 保安湖沉水植物分布的 GIS 模拟 [J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2271-2277.

[13] 李中强,任慧,郝孟曦,等. 斧头湖水生植物多样性及群落演替研究 [J]. 水生生物学报, 2012, 36(6): 1018-1026.

[14] 方精云,王囊平,沈泽昊,等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.

[15] 葛继稳,蔡庆华,刘建康,等. 梁子湖湿地植物多样性现状与评价 [J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 451-456.

[16] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学

- 出版社,1991.333-815.
- [17] 韩茂森,束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 科学出版社,1995. 2-129.
- [18] 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社,1990. 239-245.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社,2002. 156-290.
- [21] 杨丽标,韩小勇,孙璞,等. 巢湖藻类组成与环境因子典范对应分析[J]. 农业环境科学学报,2011,30(5): 952-958.
- [22] Muylaert K, Ssbbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2000,50(5): 673-687.
- [23] 魏玉莲,姬兰柱,王森,等. 长白山北坡静水水体中水甲虫分布与环境关系的典范对应分析[J]. 应用生态学报,2002,13(1): 91-94.
- [24] 张文涛. 浅议湖库富营养化的评价方法和分级标准[J]. 珠江现代建设,2010,(1): 9-12.
- [25] 张元明,陈亚宁,张小雷. 塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释[J]. 地理学报,2004,59(6): 903-910.
- [26] 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报,2005,5(2): 89-91.
- [27] 朱斌,陈飞星,陈增奇. 利用水生植物净化富营养化水体的研究进展[J]. 上海环境科学,2002,21(9): 564-567.
- [28] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. Ecology,1986,67(5): 1167-1179.
- [29] 郝占庆,郭水良,叶吉. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析[J]. 植物生态学报,2003,27(6): 733-741.
- [30] 沈会涛,刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 湖泊科学,2008,20(6): 773-779.