

苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析

石晓丹¹, 阮晓红^{2*}, 邢雅囡¹, 焦涛¹, 吴芸¹, 赵振华¹, 倪利晓¹

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098; 2. 南京大学地球科学与工程学院水科学系, 南京 210093)

摘要: 2005 年 12 月和 2006 年 6 月对苏州平原河网区 57 个浅水湖泊的浮游植物群落进行了调查, 共检出浮游植物 8 门 62 属 73 种, 浮游植物主要由绿藻、硅藻和蓝藻组成。冬季浮游植物平均丰度为 $254.88 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 硅藻门丰度占总丰度的 62.3%; 夏季浮游植物平均丰度为 $2704.28 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 蓝藻门丰度达 93.5%。运用典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 对调查范围内的 57 个样点 62 属浮游植物与 11 个环境因子关系进行研究。结果表明, 水温、高锰酸盐指数、 NO_3^- -N 和 TN 是影响苏州平原河网区浅水湖泊浮游植物群落分布的主要环境因子, 在冬季, pH、 NH_4^+ -N 及 TP 也是主要的影响因子; 浮游植物中硅藻对环境变化具有较强的适应性, 绿藻能耐受较高的高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度, 而蓝藻对环境因子的响应有待进一步的研究。

关键词: 浮游植物; 环境因子; 典范对应分析; 浅水湖泊; 平原河网区; 绿藻; 硅藻; 蓝藻

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)11-2999-10

Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Winter and Summer in Shallow Lakes of Plain River Network Areas, Suzhou

SHI Xiao-dan¹, RUAN Xiao-hong², XING Ya-nan¹, JIAO Tao¹, WU Yun¹, ZHAO Zhen-hua¹, NI Li-xiao¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Water Sciences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Field investigations on the phytoplankton community were carried out in December 2005 and June 2006 in shallow lakes of plain river network areas, Suzhou City. Results show that there are 73 species, 62 genus, 8 phylum phytoplankton, which is mainly composed of the Chlorophyta, Bacillariophyta and Cyanophyta. In winter, the average phytoplankton abundance is $254.88 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, and the Bacillariophyta abundance accounts for 62.3% of the total. While in summer, the average phytoplankton abundance is $2704.28 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, and the Cyanophyta abundance accounts for 93.5%. The relationship between 62 genus of phytoplankton and 11 environmental factors from 57 sampling sites in research area was studied by Canonical Correspondence Analysis. It suggests that water temperature, permanganate indexes, nitrate nitrogen and total nitrogen are the main environmental factors correlated with the distribution of phytoplankton community. And in winter, pH, ammonia nitrogen and total phosphorus are also the main environmental factors. Furthermore, the Bacillariophyta has higher adaptability to the changeable environment. The Chlorophyta can tolerate higher concentration of permanganate indexes, phosphorus nutrients, nitrogen nutrients and total organic carbon, whereas the response of Cyanophyta to environmental factors needs further research.

Key words: phytoplankton; environmental factors; Canonical Correspondence Analysis; shallow lakes; plain river network areas; Chlorophyta; Bacillariophyta; Cyanophyta

浮游植物是水环境中的初级生产者, 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之间的关系一直是水域生态系统中的研究热点^[2-6], 其种类组成和演替规律主要受相关的物理、化学和生物等环境因子的影响^[3, 7]. 在不同类型的水体中, 起主导作用的环境因子在不同时期的作用也有差别. 如何认识特定水体中浮游植物群落组成、动态演替与环境因子的关系是一个相当复杂的问题, 目前还缺少一致的理论来解释. 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, 每一步计算结果都与环境因子进行回归, 可以有效地研究生物分布与环境的关系^[8, 9]. CCA 还可以同时结合多个环境因子, 在同一排序图上反映群落、生物种类与环境三者或两两间

收稿日期: 2007-11-26; 修订日期: 2008-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40573051)

作者简介: 石晓丹 (1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水环境保护和水生态系统修复, E-mail: shixiaodan@hhu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: ruanxh@nju.edu.cn

的关系,包含的信息量大,结果明确直观,是分析生物群落与环境因子间复杂关系的有效工具^[9].

近年来,国内外学者已经开始将 CCA 广泛应用于水域生态学领域^[10~14],研究水生生物群落结构时空变化、空间分布与水域环境因子间的关系,取得了较好的效果.但有关研究多集中于沿海地区^[15~17],利用 CCA 对湖泊浮游植物的研究极少.苏州平原河网区地处太湖流域东部,区域地势平坦,水系发达,河流纵横交错,大小湖泊星罗棋布.河湖水系担负着调蓄、供水、养殖、航运、景观等多种功能,是苏州城市发展的重要资源.随着湖泊资源的开发利用,湖泊水体出现了富营养化加剧、生物多样性减少等环境问题.本研究在对苏州平原河网区浅水湖泊浮游植物群落和环境因子进行调查和测定的基础上,运用 CCA 来探讨浮游植物群落分布与环境因子之间的关系,揭示影响浮游植物群落分布的主要环境变量,以期为该区域浅水湖泊浮游植物群落演替规律的研究、富营养化湖泊生态修复的决策和实施提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点的位置和频率

选取苏州平原河网区 57 个湖泊作为研究对象,湖泊分布示意图见图 1.其中阳澄湖面积最大,为 118.20 km²;澄湖次之,为 45.00 km²;昆承湖面积为 17.57 km²,其余湖泊面积一般为 0.50~10.00 km².湖泊平均水深普遍在 2.0~3.0 m 左右,均为浅水湖泊.根据 57 个湖泊的分布位置和形态特征,共布设 61 个采样点.其中,阳澄湖在阳澄东湖、中湖、西湖、中东湖交界和中西湖交界处分别布设 1 个采样点,其余湖泊在湖心处布设 1 个采样点.2005 年 12 月和 2006 年 6 月各进行 1 次采样,通过 GPS 定位,2 次采样位置保持一致.

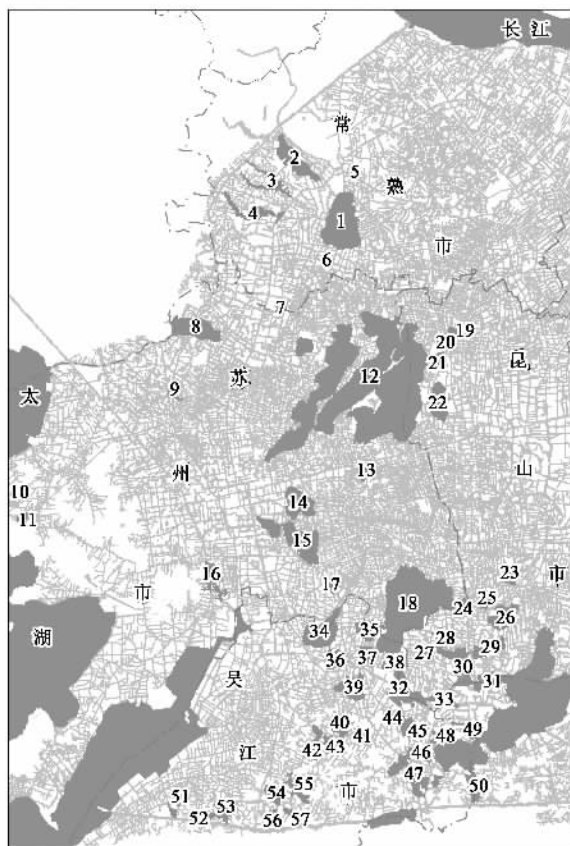
1.2 浮游植物的采集与鉴定

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^[18~20]进行分类鉴别,并计算出浮游植物细胞个数^[21, 22].

1.3 环境因子的测定

环境因子的取样测定与浮游植物样品的采集同步进行.水温(*t*)现场使用水温计测定,pH 采用玻璃电极法测定,溶解氧(DO)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(TP)采用钼锑抗分光光度法测定,氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂

光度法测定,亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)采用 *N*-(1-萘基)乙二胺光度法测定,硝酸盐氮(NO₃⁻-N)采用酚二磺酸光度法测定,总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,总有机碳(TOC)采用燃烧氧化-非分散红外吸收法测定,叶绿素 *a*(Chl_a)采用分光光度法测定^[21].



1. 昆承湖; 2. 尚湖; 3. 六里塘; 4. 南湖荡; 5. 湖圩; 6. 陈塘; 7. 陶塘面; 8. 漕湖; 9. 春申湖; 10. 游湖; 11. 下淹湖; 12. 阳澄湖; 13. 沙湖; 14. 金鸡湖; 15. 独墅湖; 16. 石湖; 17. 纓底潭; 18. 澄湖; 19. 雉城湖; 20. 巴城湖; 21. 鳊鲤湖; 22. 傀儡湖; 23. 商鞅潭; 24. 万千湖; 25. 杨氏田湖; 26. 白莲湖; 27. 天花荡; 28. 明镜荡; 29. 陈墓荡; 30. 长白荡; 31. 汪洋湖; 32. 白砚湖; 33. 急水荡; 34. 九里湖; 35. 黄泥兜; 36. 同里湖; 37. 沐庄湖; 38. 季家荡; 39. 南星湖; 40. 石头潭; 41. 方家荡; 42. 何家漾; 43. 南参漾; 44. 同字荡; 45. 孙家荡; 46. 南庄荡; 47. 三白荡; 48. 众家荡; 49. 吴天贞荡; 50. 诸曹漾; 51. 黄家湖; 52. 陆家荡; 53. 长荡; 54. 张鸭荡; 55. 长崎荡; 56. 前村荡; 57. 凤仙荡

图 1 研究区域湖泊分布示意图

Fig. 1 Distribution of lakes in study area

1.4 数据分析

环境因子间的 Pearson 相关性采用 SPSS11.0 进行分析.利用 CANOCO4.5 分析软件和 CANODRAW4.5 作图软件进行浮游植物群落与环境因子的典范对应分析.物种数据采用浮游植物丰度指标,浮游植物丰

度值采用 $\log_{10}(x + 1)$ 进行处理,环境数据除 pH 值以外都进行 $\log_{10}(x + 1)$ 处理.

2 结果与分析

2.1 群落组成及数量分布

通过鉴定,研究区域浅水湖泊冬季检出浮游植物 7 门 51 属 59 种,夏季检出浮游植物 7 门 56 属 67

种,共有浮游植物 8 门 62 属 73 种.浮游植物主要是由绿藻门、硅藻门和蓝藻门的藻类组成.其中,绿藻门 25 属 29 种,占全部种类的 39.7%;硅藻门 19 属 24 种,占全部种类的 32.9%;蓝藻门 9 属 10 种,占全部种类的 13.7%;裸藻门 3 属 4 种,隐藻门和甲藻门各 2 属 2 种,金藻门和黄藻门各 1 属 1 种.浮游植物名录见表 1.

表 1 苏州平原河网区湖泊浮游植物调查名录

Table 1 Investigation list of phytoplankton in lakes in plain river network areas of Suzhou

编号	属名	拉丁名	编号	属名	拉丁名
绿藻门		Chlorophyta	34	舟形藻属	Navicula
1	集星藻属	Actinastrum	35	菱形藻属	Nitzschia
2	纤维藻属	Ankistrodesmus	36	羽纹藻属	Pinnularia
3	小椿藻属	Characium	37	辐节藻属	Stauroneis
4	小球藻属	Chlorella	38	冠盘藻属	Stephanodiscus
5	绿球藻属	Chlorococcum	39	双菱藻属	Surirella
6	新月藻属	Closterium	40	针杆藻属	Synedra
7	空星藻属	Coelastrum	41	平板藻属	Tabellaria
8	十字藻属	Crucigenia	42	异极藻属	Gomphonema
9	卵囊藻属	Oocystis	43	卵形藻属	Cocconeis
10	实球藻属	Pandorina	44	根管藻属	Rhizosolenia
11	盘星藻属	Pediastrum	蓝藻门		Cyanophyta
12	并联藻属	Quadrigula	45	蓝纤维藻属	Dactylococcopsis
13	栅藻属	Scenedesmus	46	平裂藻属	Merismopedia
14	弓形藻属	Schroederia	47	微囊藻属	Microcystis
15	月牙藻属	Selenastrum	48	颤藻属	Oscillatoria
16	四角藻属	Tetraedron	49	席藻属	Phormidium
17	四星藻属	Tetrastrum	50	螺旋藻属	Spirulina
18	韦斯丝藻属	Westella	51	隐球藻属	Aphanocapsa
19	顶棘藻属	Chodatella	52	隐杆藻属	Aphanothece
20	多芒藻属	Golenkinia	53	色球藻属	Chroococcus
21	四孢藻属	Tetraspora	裸藻门		Euglenophyta
22	鼓藻属	Cosmarium	54	裸藻属	Euglena
23	蹄形藻属	Kirchneriella	55	扁裸藻属	Phacus
24	微芒藻属	Micractinium	56	囊裸藻属	Trachelomonas
25	浮球藻属	Planktosphaeria	隐藻门		Cryptophyta
硅藻门		Bacillariophyta	57	隐藻属	Cryptomonas
26	双眉藻属	Amphora	58	蓝隐藻属	Chroomonas
27	星杆藻属	Asterionella	甲藻门		Pyrrophyta
28	小环藻属	Cyclotella	59	裸甲藻属	Gymnodinium
29	波缘藻属	Cymatopleura	60	角甲藻属	Ceratium
30	桥弯藻属	Cymbella	金藻门		Chrysophyta
31	脆杆藻属	Fragilaria	61	锥囊藻属	Dinobryon
32	布纹藻属	Gyrosigma	黄藻门		Xanthophyta
33	直链藻属	Melosira	62	黄管藻属	Ophiocytium

冬、夏季湖泊浮游植物平均丰度组成及平面分布如图 2、图 3.从中可知,浮游植物丰度夏季明显高于冬季,冬季浮游植物丰度为 $46.60 \times 10^4 \sim 1\,225.20 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $254.88 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,其中硅藻门的丰度最高,占总丰度的 62.3%,蓝藻门和绿藻门次之,分别占总丰度的

23.4%和 12.9%;夏季浮游植物丰度为 $163.50 \times 10^4 \sim 10\,408.00 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $2\,704.28 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,夏季蓝藻门在丰度上占绝对优势,所占比例达到 93.5%,硅藻门和绿藻门仅占总丰度的 3.9%和 2.3%.在冬季,研究区域北部和中部湖泊浮游植物丰度较高,浮游植物丰度高密度区分布在陶

塘面、阳澄湖、金鸡湖和九里湖附近;夏季,研究区域浮游植物丰度呈较明显的南高北低的分布趋势,浮游植物丰度高密度区分布在独墅湖、明镜荡、长白荡和黄家湖附近.

2.2 环境因子及其相关性分析

与浮游植物同期监测的湖泊水体环境因子值见表 2. 由表 2 分析可知:研究区域湖泊水质呈偏碱性,湖泊水温冬、夏季差异较大,而湖泊水体 DO、高锰酸盐指数和 TOC 含量差别不大,均值分别为 8.63、6.78 和 6.62 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;冬、夏季 Chla 的平均含量分别为 20.59、31.36 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,夏季湖泊水体 Chla

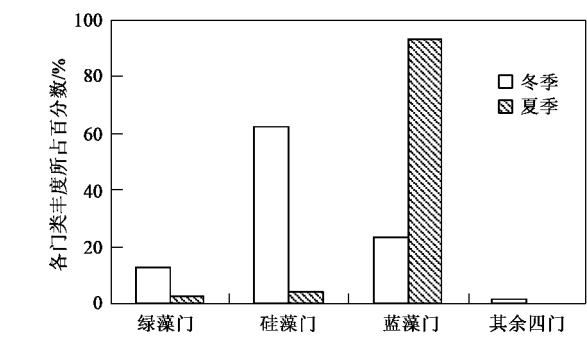


图 2 冬夏季湖泊平均浮游植物丰度组成

Fig.2 Composition of the average phytoplankton abundance in lakes in Winter and Summer

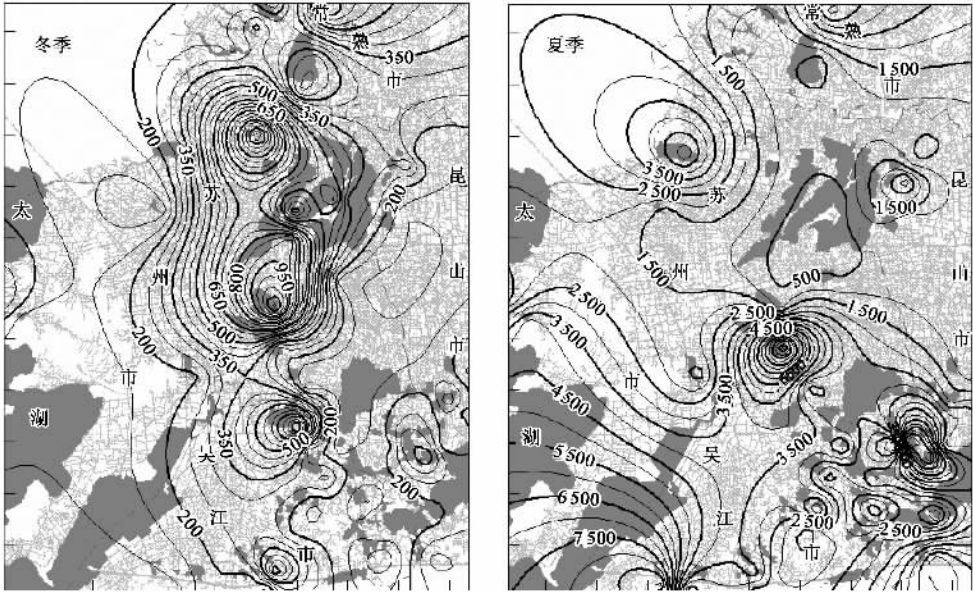


图 3 冬夏季湖泊浮游植物丰度($\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$)平面分布

Fig.3 Distribution patterns of phytoplankton abundance ($\times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$) in Winter and Summer

表 2 冬夏季湖泊水体环境因子值

Table 2 Values of the environmental factors in Winter and Summer

季节	t / $^{\circ}\text{C}$	pH	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Chla / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TOC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
冬季	7.00	7.79	8.86	0.25	5.53	3.22	0.05	0.74	6.74	20.59	6.44
夏季	23.29	8.11	8.39	0.17	4.80	1.93	0.22	0.92	6.81	31.36	6.79

含量比冬季湖泊水体 Chla 含量高;氮、磷营养盐浓度整体上表现出冬季高于夏季,冬、夏季湖泊 TN 平均浓度分别为 5.53 和 4.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP 分别为 0.25 和 0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 3.22 和 1.93 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度相对较低.

湖泊水体中 Chla 的现存量在一定程度上反映了湖泊中浮游植物的生长状况^[23]. 冬、夏季湖泊水体 11 个环境因子间的 Pearson 相关分析见表 3. 由表 3 分析可知,冬、夏季 Chla 与 pH、DO 和高锰酸盐指

数呈显著正相关,夏季 Chla 还与水温和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 呈显著正相关,而与其它环境因子无显著相关.

2.3 冬季浮游植物群落与环境因子关系的 CCA 分析

冬季浮游植物群落与环境因子的 CCA 排序结果见表 4、表 5 和图 4、图 5. 表 4 列出了浮游植物群落 CCA 分析的统计信息. 由表 4 可知,图 4 和图 5 中前 2 个排序轴的特征值分别为 0.117 和 0.090,种类与环境因子排序轴的相关系数为 0.873 和 0.805,说

表 3 冬夏季湖泊水体 11 个环境因子间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients among the environmental factors in Winter and Summer

季节	环境因子	<i>t</i>	pH	DO	高锰酸盐指数	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TOC	Chla
冬	<i>t</i>	1.000										
	pH	-0.006	1.000									
	DO	-0.410 * *	0.552 * *	1.000								
	高锰酸盐指数	0.124	-0.195	-0.339 * *	1.000							
	TP	0.195	-0.117	-0.351 * *	0.599 * *	1.000						
	NH ₄ ⁺ -N	0.083	-0.541 * *	-0.582 * *	0.555 * *	0.552 * *	1.000					
	NO ₂ ⁻ -N	0.157	-0.411 * *	-0.688 * *	0.541 * *	0.531 * *	0.672 * *	1.000				
	NO ₃ ⁻ -N	-0.026	-0.019	0.023	0.183	0.174	0.164	0.276 *	1.000			
	TN	0.019	-0.523 * *	-0.529 * *	0.625 * *	0.596 * *	0.936 * *	0.730 * *	0.370 * *	1.000		
	TOC	0.084	-0.440 * *	-0.497 * *	0.643 * *	0.344 * *	0.548 * *	0.482 * *	-0.161	0.515 * *	1.000	
	Chla	-0.004	0.324 *	0.347 * *	0.454 * *	0.246	-0.017	-0.129	0.210	0.050	-0.035	1.000
夏	<i>t</i>	1.000										
	pH	0.332 *	1.000									
	DO	0.376 * *	0.758 * *	1.000								
	高锰酸盐指数	0.064	0.257	0.331 *	1.000							
	TP	0.176	-0.106	-0.135	0.320 *	1.000						
	NH ₄ ⁺ -N	-0.115	-0.340 * *	-0.309 *	0.154	0.561 * *	1.000					
	NO ₂ ⁻ -N	0.172	0.140	0.464 * *	0.550 * *	0.272 *	0.297 *	1.000				
	NO ₃ ⁻ -N	0.230	-0.025	0.044	-0.057	0.175	0.331 *	0.444 * *	1.000			
	TN	0.080	-0.251	-0.178	0.238	0.571 * *	0.838 * *	0.531 * *	0.594 * *	1.000		
	TOC	-0.235	-0.173	-0.234	0.371 * *	0.118	-0.018	-0.107	-0.150	-0.027	1.000	
	Chla	0.384 * *	0.628 * *	0.549 * *	0.622 * *	0.119	-0.106	0.305 *	0.026	0.040	0.048	1.000

1) * 表示 $p < 0.05$, * * 表示 $p < 0.01$ (两尾检验)

表 4 排序轴特征值、种类与环境因子排序轴的相关系数

Table 4 Eigenvalues for CCA axis and species-environment correlation					
冬季 CCA 分析					
特征值	AX1	AX2	AX3	AX4	总惯量
	0.117	0.090	0.073	0.053	2.790
种类与环境因子相关系数	0.873	0.805	0.824	0.787	
夏季 CCA 分析					
特征值	AX1	AX2	AX3	AX4	总惯量
	0.100	0.074	0.059	0.050	2.073
种类与环境因子相关系数	0.889	0.816	0.844	0.693	

明排序能够较好地反映冬季浮游植物物种与环境因子间的关系。

表 5 给出了环境因子与 CCA 排序轴的相关系数.由表 5、图 4 和图 5 可以看出,冬季 11 个环境因子中,Chla 与第 1 排序轴相关系数为0.005 7,无明显相关,Chla 与第 2 排序轴几乎重合,主要是因为水体中 Chla 的水平在一定程度上反映了浮游植物的生

表 5 环境因子与 CCA 排序轴之间的相关关系

环境因子	冬季 CCA 分析				夏季 CCA 分析			
	AX1	AX2	AX3	AX4	AX1	AX2	AX3	AX4
<i>t</i>	-0.667 8	0.290 3	-0.042 4	0.021 1	0.395 8	-0.012 2	0.182 0	-0.015 5
pH	0.449 7	-0.106 0	0.021 4	0.158 8	-0.279 0	0.015 6	0.153 5	0.077 7
DO	0.305 2	-0.163 9	0.014 3	0.147 5	0.032 5	-0.265 8	-0.187 7	0.222 7
高锰酸盐指数	-0.213 9	-0.486 5	0.031 7	-0.203 0	0.351 4	0.071 0	0.309 1	0.054 3
TP	-0.319 4	-0.408 7	0.146 7	-0.247 8	0.245 2	0.258 1	-0.140 3	0.233 8
NH ₄ ⁺ -N	-0.364 4	-0.285 8	-0.381 4	-0.358 2	0.262 8	0.298 2	-0.408 9	-0.262 5
NO ₂ ⁻ -N	-0.283 5	-0.347 1	-0.005 7	-0.226 6	0.236 9	0.177 8	-0.287 3	-0.054 9
NO ₃ ⁻ -N	-0.268 6	-0.377 3	-0.052 7	-0.270 3	0.289 3	0.564 3	-0.438 3	-0.016 9
TN	-0.273 0	-0.371 0	-0.229 8	-0.481 4	0.367 8	0.374 1	-0.410 7	-0.261 6
TOC	-0.072 6	-0.106 8	-0.084 6	-0.246 7	0.277 4	0.141 7	0.288 5	0.094 7
Chla	0.005 7	-0.489 9	-0.056 3	0.094 5	0.144 4	-0.024 6	0.276 7	0.136 9

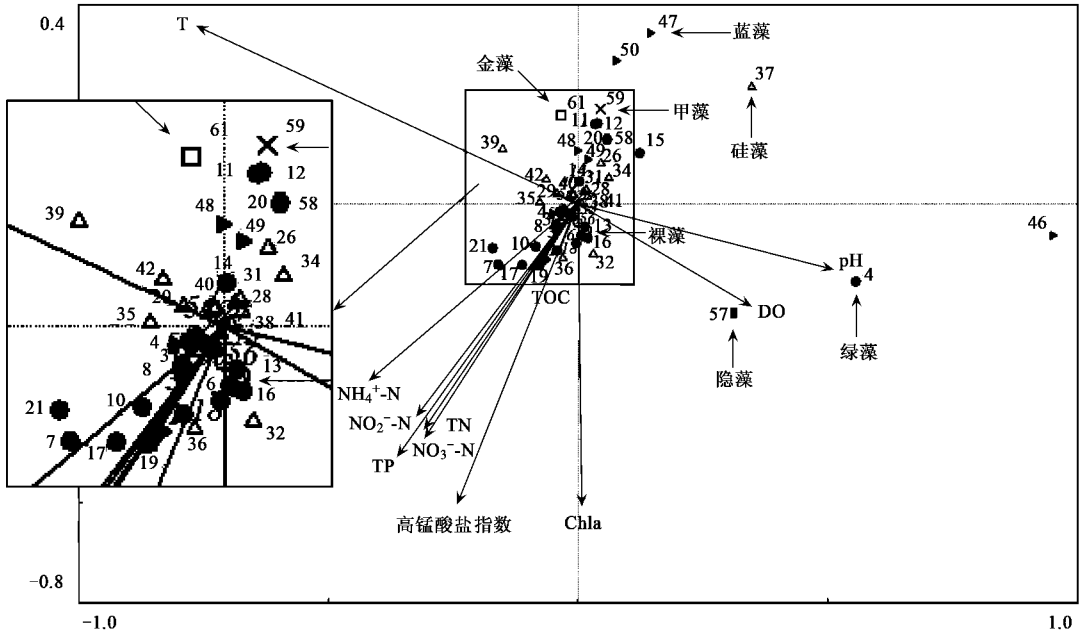


图 4 冬季浮游植物物种与环境因子的 CCA 排序

Fig.4 CCA ordination biplot between phytoplankton species and environmental factors in Winter

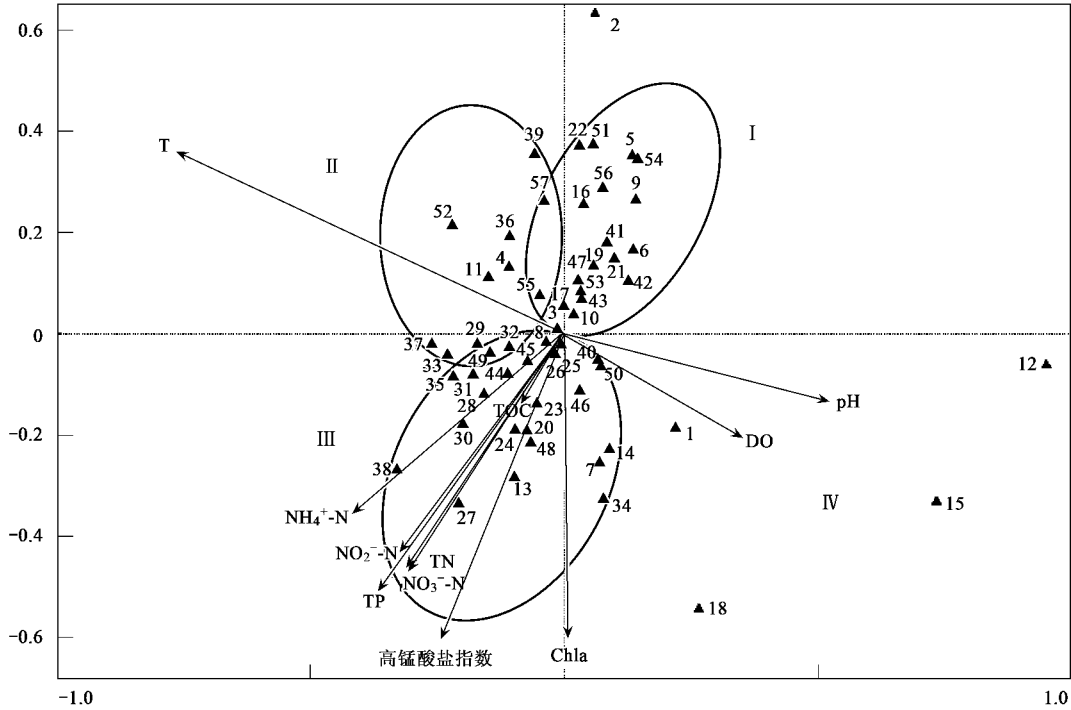


图 5 冬季浮游植物样点与环境因子的 CCA 排序

Fig.5 CCA ordination biplot between sampling sites and environmental factors in Winter

长状况.水温与第 1 排序轴呈最大负相关,相关系数为 -0.6678 ,其次为 pH 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,呈较显著的相关,相关系数为 0.4497 和 -0.3644 ;高锰酸盐指数、 TP 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 与第 2 排序轴呈较显著的负相关,

相关系数分别为 -0.4865 、 -0.4087 、 -0.3773 和 -0.3710 ;其它环境因子与第 1、第 2 排序轴呈不显著的相关关系.从第 1、第 2 排序轴的相关性分析可以看出,冬季湖泊水温对浮游植物的分布具有较大

的影响,pH、高锰酸盐指数、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN 对其也有一定的影响.

冬季浮游植物物种与环境因子的排序图见图 4 (物种序号见表 1).由图 4 可知,冬季绿藻和硅藻种类在 CCA 第 1、第 2 排序轴上得到了较好的分化.绿藻门的种类主要集中在第 3 象限,第 3 象限与高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度表现出正相关,说明冬季绿藻能适应较高的高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度.硅藻门的物种主要分布在第 1、第 2 象限,第 1 象限与高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度表现出负相关,第 2 象限与水温表现出正相关,与 pH 和 DO 表现出负相关,说明冬季湖泊水温、pH、DO、高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度对硅藻门藻类丰度都有一定的影响,且硅藻门物种大多位于两排序轴中心点位置,说明硅藻门物种对冬季环境的适应性较强.

冬季浮游植物样点与环境因子的排序图见图 5 (样点序号同图 1 湖泊序号),根据各样点和环境因

子轴的分布,可以大致将所有样点归纳为 3 组.由图 5 可知,高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 轴分布在第 3 象限,且相对集中,由此产生样点组 I 和样点组 III.样点组 I 位于第 1 象限,与高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 呈负相关;样点组 III 位于高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 轴附近,与高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 呈正相关;说明样点组 III 比样点组 I 湖泊受有机污染和氮、磷污染比较重.样点组 II 集中在水温轴附近,与水温呈正相关,而与 pH、DO 呈负相关,说明样点组 II 的水温较高,而 pH 值和 DO 浓度较低.

2.4 夏季浮游植物群落与环境因子关系的 CCA 分析

夏季浮游植物群落与环境因子的 CCA 排序结果见表 4、表 5、图 6 和图 7.由表 4 可知,图 6 和图 7 中前 2 个排序轴的特征值分别为 0.100 和 0.074,种类与环境因子排序轴的相关系数为 0.889 和 0.816,说明排序也能够较好地反映夏季浮游植物物种与环境因子间的关系.

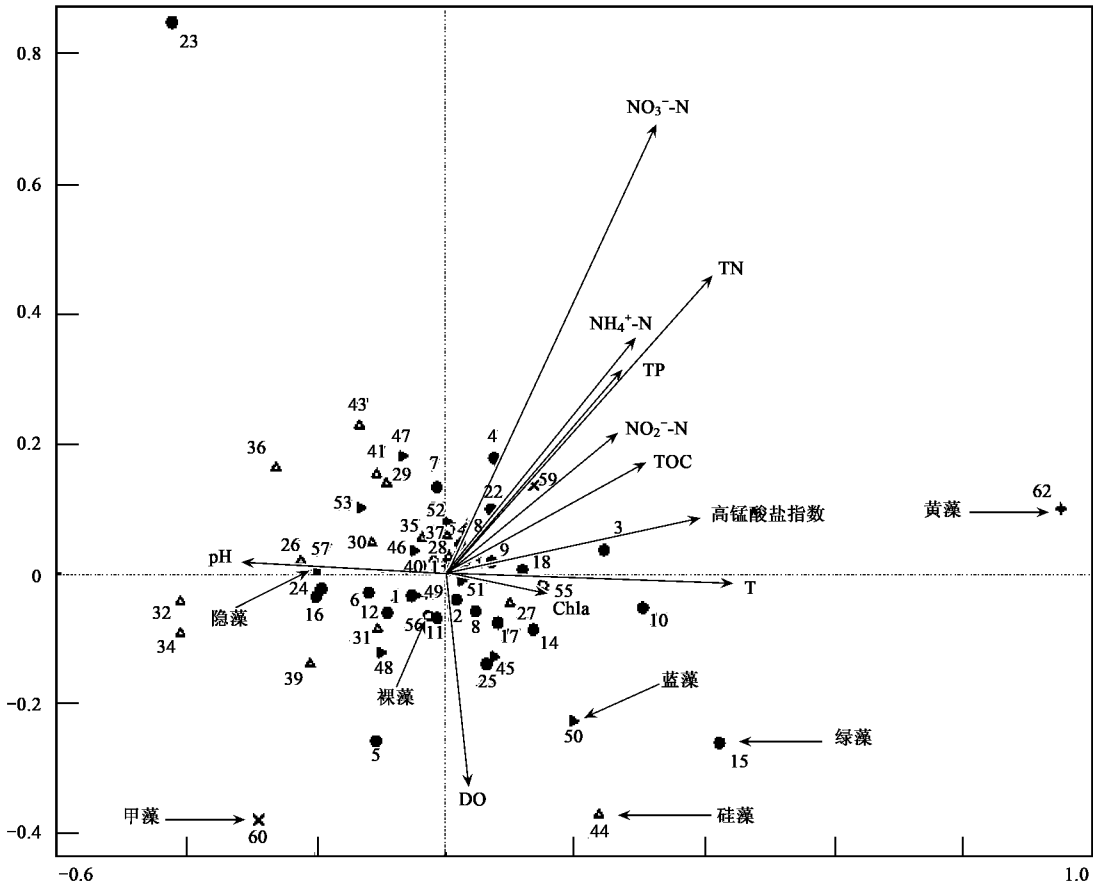


图 6 夏季浮游植物物种与环境因子的 CCA 排序

Fig.6 CCA ordination biplot between phytoplankton species and environmental factors in Summer

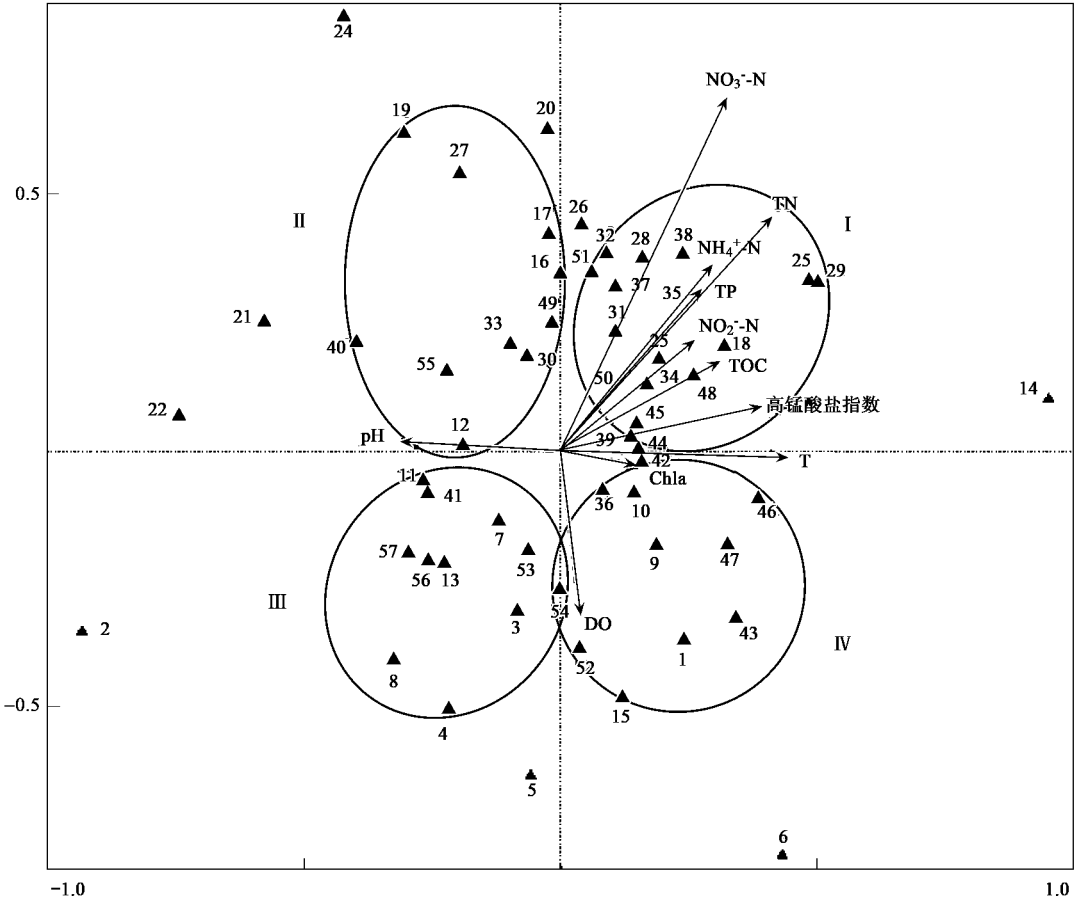


图 7 夏季浮游植物样点与环境因子的 CCA 排序

Fig.7 CCA ordination biplot between sampling sites and environmental factors in Summer

由表 5、图 6 和图 7 可知,夏季 Chla 与第 1 排序轴几乎重合,与第 2 排序轴相关系数为 -0.0246 ,无明显相关,原因与冬季相同.夏季环境因子除 DO 和 Chla 外,其余 9 个环境因子与第 1、第 2 排序轴的正负相关关系均与冬季相反.水温、高锰酸盐指数和 TN 与第 1 排序轴呈较显著的正相关,相关系数分别为 0.3958 、 0.3514 和 0.3678 ; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TN 与第 2 排序轴呈较显著的正相关,相关系数为 0.5643 和 0.3741 ;其它环境因子与第 1、第 2 排序轴呈不显著的相关关系.从第 1、第 2 排序轴的相关性分析可以看出,夏季湖泊水温、高锰酸盐指数、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TN 浓度对浮游植物的分布具有一定的影响.

夏季浮游植物物种与环境因子的排序图见图 6 (物种序号见表 1).由图 6 可知,夏季绿藻和硅藻种类在 CCA 第 1、第 2 排序轴上也得到了较好的分化.绿藻门的种类平均分布在第 1、第 3 和第 4 象限,硅藻门的物种主要分布在第 2 象限,且较多位于两排序轴中心点位置.第 1、第 3 象限与高锰酸盐指数、

氮磷营养盐和 TOC 浓度分别表现出正、负相关,第 4 象限与 pH 值表现出负相关,而与水温和 DO 浓度表现出正相关,第 2 象限与第 4 象限完全相反.这说明夏季湖泊高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度仍是影响绿藻的主要环境因子,小部分绿藻还受到水温、pH 和 DO 的影响;夏季硅藻门物种对环境也具有较强的适应性,能适应较高的 pH 值、较低的水温和 DO 浓度,同时对高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度的耐受程度也较低.

夏季浮游植物样点与环境因子的排序见图 7 (样点序号同图 1 湖泊序号).由图 7 可知,与冬季环境因子轴的分布相比,夏季环境因子轴除 DO 和 Chla 轴仍位于原象限内,其余 9 个环境因子轴均位于相反方向的象限内,这对应于夏季环境因子与第 1、第 2 排序轴的相关关系.根据各样点和环境因子轴的分布,可以大致将所有样点归纳为 4 组.样点组 I 位于高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 轴附近,与高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 呈正相关;样

点组Ⅲ位于第3象限,与高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 呈负相关;说明样点组Ⅰ比样点组Ⅲ湖泊受有机污染和氮、磷污染比较重.样点组Ⅱ集中在 pH 轴附近,与 pH 呈正相关,而与水温和 DO 呈负相关,说明样点组Ⅱ的 pH 值较高,而水温和 DO 浓度较低.样点组Ⅳ与样点组Ⅱ完全相反,其水温和 DO 浓度较高,而 pH 值较低.

2.5 影响浮游植物群落的主要环境因子分析

苏州平原河网区浅水湖泊浮游植物群落的种类组成相对稳定,主要由绿藻门、硅藻门和蓝藻门的藻类组成.从种属分析,绿藻>硅藻>蓝藻;从丰度看,冬季硅藻>蓝藻>绿藻,夏季蓝藻>硅藻>绿藻.研究区域冬、夏季浮游植物丰度分布具有一定的差异,说明苏州平原河网区浅水湖泊中影响浮游植物群落的环境因子在空间和时间上均有一定的变化.

浮游植物的群落结构及其动态演替规律是多个环境因子在时间和空间序列上作用的结果^[3],不同的湖泊具有不同的主要影响因子.一般而言,水温和营养盐是影响浮游植物生长的关键因子,但其它物理、化学和生物因子也能够通过一定方式和过程影响水温和营养盐在水体中的分布^[24, 25].Naselli-Flores 等^[26]研究 Arancio 湖表明,水温、电导率、湖泊容积对浮游植物的影响最大,而 Rosamarina 湖中 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、混合水深及可溶性硅对浮游植物群落影响最重要;Lau 等^[27]阐明氮磷营养盐、硅和浮游动物是影响 Barton 湖浮游植物群落的主要环境因子;Habib 等^[28]研究表明,Lomond 湖浮游植物群落主要受水温、DO、透明度和高锰酸盐指数的影响;Magdalena 等^[15]阐明浮游植物硅藻能够适应多变的环境条件.苏州平原河网区处于亚热带季风气候区,四季分明,湖泊冬、夏季水温差异较大,浮游植物群落的种类组成相对稳定,而细胞丰度变化比较明显.浮游植物物种的 CCA 排序表明,水温和高锰酸盐指数对浮游植物的分布具有一定的影响,其次,冬季浮游植物分布受到 pH、氮磷营养盐的影响,夏季受到氮营养盐的影响,这与 Chla 和其它环境因子的 Pearson 相关分析结果较一致;浮游植物中绿藻的丰度主要由湖泊高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度的变化所决定,而硅藻比其它藻类更适应变化的环境.

结合浮游植物样点与环境因子的 CCA 分析可知,冬、夏季样点 23、25、28、31、34、35、38、45、48、50 均与高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 呈正相关,这些湖泊受到比较严重的有机污染和氮、磷污染;样点 41、53、54、56 均与高锰酸盐指数、氮磷营

养盐和 TOC 呈负相关,这些湖泊高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度较低,湖泊水质较好.绿藻在这些湖泊中均有分布,且绿藻丰度在污染严重的湖泊中比较大,说明绿藻对高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度的耐受程度较高.在所有湖泊中均采集到硅藻,说明硅藻对环境变化具有较强的适应性.这与前述的分析结果较一致.

苏州平原河网区浅水湖泊中蓝藻的丰度从冬季到夏季增长迅猛,但其种类较少,在 CCA 第 1、第 2 排序轴上没有得到很好的分化,因此,影响蓝藻分布的主要环境因子的研究有待于进一步的试验来完善.

3 结论

(1)苏州平原河网区浅水湖泊冬、夏季共检出浮游植物 8 门 62 属 73 种,浮游植物主要由绿藻、硅藻和蓝藻组成,从种属分析,绿藻>硅藻>蓝藻.浮游植物丰度夏季明显高于冬季,冬季浮游植物平均丰度为 $254.88 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,夏季为 $2\,704.28 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;冬季硅藻门丰度占总丰度的 62.3%,蓝藻门和绿藻门次之,夏季蓝藻门丰度占绝对优势,达 93.5%.

(2)影响苏州平原河网区浅水湖泊浮游植物群落分布的主要环境因子是水温、高锰酸盐指数、NO₃⁻-N 和 TN,在冬季,pH、NH₄⁺-N 及 TP 也是主要的影响因子.湖泊水体的高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度是影响绿藻分布的主要环境因子,绿藻能耐受较高的高锰酸盐指数、氮磷营养盐和 TOC 浓度,污染严重的湖泊中绿藻的丰度比较大.浮游植物中硅藻对变化的环境具有较强的适应性,硅藻在研究区域湖泊中均有分布.关于蓝藻对环境因子的响应有待于进一步的研究.

参考文献:

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

[2] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, et al. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. Archives of Hydrobiology, 1986, 106: 433-471.

[3] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. Hydrobiologia, 1998, 369/370: 11-26.

[4] Bettinetti R, Morabito G, Provini A. Phytoplankton assemblage structure and dynamics as indicator of the recent trophic and biological evolution of the western basin of Lake Como (N. Italy) [J]. Hydrobiologia, 2000, 435: 177-190.

[5] Håkanson L, Boulion V V. A general dynamic model to predict

- biomass and production of phytoplankton in lakes [J]. *Ecological Modelling*, 2003, **165**(2): 285-301.
- [6] 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**: 21-34.
- [7] 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.
- [8] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. *Ecology*, 1986, **67**(5): 1167-1179.
- [9] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 171-178.
- [10] Henriques I S, Alves A, Tação M, *et al.* Seasonal and spatial variability of free-living bacterial community composition along an estuarine gradient (Ria de Aveiro, Portugal) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **68**: 139-148.
- [11] Hansel-Welch N, Butler M G, Carlson T J, *et al.* Changes in macrophyte community structure in Lake Christina (Minnesota), a large shallow lake, following biomanipulation [J]. *Aquatic Botany*, 2003, **75**(4): 323-337.
- [12] Dejen E, Vijverberg J, Nagelkerke L A J, *et al.* Temporal and spatial distribution of microcrustacean zooplankton in relation to turbidity and other environmental factors in a large tropical lake (L. Tana, Ethiopia) [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **513**: 39-49.
- [13] 禹娜, 陈立侨, 赵泉鸿. 太湖介形虫分布与水环境因子间关系的典范对应分析[J]. *微体古生物学报*, 2007, **24**(1): 53-60.
- [14] Nanami A, Saito H, Akita T, *et al.* Spatial distribution and assemblage structure of macrobenthic invertebrates in a brackish lake in relation to environmental variables [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **63**: 167-176.
- [15] Licursi M, Sierra M V, Gómez N. Diatom assemblages from a turbid coastal plain estuary: Río de la Plata (South America) [J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, **62**: 35-45.
- [16] 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.
- [17] Spatharis S, Tsirtsis G, Danielidis D B, *et al.* Effects of pulsed nutrient inputs on phytoplankton assemblage structure and blooms in an enclosed coastal area [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **73**: 807-815.
- [18] 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. 333-357.
- [19] 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.
- [20] 胡鸿钧, 魏印心, 李尧英, 等. 中国淡水藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980. 35-123.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton [M]. London: Cambridge University Press, 1984. 63-74.
- [24] Cetinić I, Viličić D, Burić Z, *et al.* Phytoplankton seasonality in a highly stratified karstic estuary (Keka, Adriatic sea) [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **555**(1): 31-40.
- [25] Alam M G M, Jahan N, Thalib L, *et al.* Effects of environmental factors on the seasonally change of phytoplankton populations in a closed freshwater pond [J]. *Environment International*, 2001, **27**(5): 363-371.
- [26] Naselli-Flores L, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoir with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 163-178.
- [27] Lau S S S, Lane S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: a long-term study [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, **288**(3): 167-181.
- [28] 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**: 63-79.