

巢湖藻类组成与环境因子典范对应分析

杨丽标^{1,4}, 韩小勇², 孙 璞², 晏维金¹, 李玉成^{3*}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.安徽省水文总局, 合肥 230022; 3.安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230039; 4.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:2008年5月—2009年5月对巢湖藻类组成及水质的季节变化进行了逐月调查研究。鉴定的藻类共6门31属48种,其中绿藻比例最高,占47.9%。藻类优势种群为蓝藻门的铜绿微囊藻(*Microcystic aeruginosa*),出现频度为90.9%。3个采样点藻类群落组成没有明显差异,藻类物种丰富度指数(Margalef值)和藻细胞密度的变化范围分别为0.10~1.84和 $(12.65\sim825.00)\times10^6\text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$,且冬季值较低。同时,叶绿素($1.30\sim41.10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)和总磷($0.06\sim0.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)含量分别在秋季和夏季显著高于其他季节。典范对应分析(CCA)显示,藻类种群分布受水环境因子的影响较为明显。整体上,TP是影响巢湖藻类种群分布的重要因素。

关键词:巢湖;藻类组成;水环境因子;典范对应分析;季节变化

中图分类号:X832 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)05-0952-07

Canonical Correspondence Analysis of Algae Community and Its Environmental Factors in the Lake Chaohu, China

YANG Li-biao^{1,4}, HAN Xiao-yong², SUN Pu², YAN Wei-jin¹, LI Yu-cheng^{3*}

(1.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.Anhui Province Hydrological Bureau, Hefei 230022, China; 3.School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China; 4.Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This research was performed during May 2008 and May 2009 at the Lake Chaohu, aiming to investigate the seasonal variations of algal species and water quality. A total of 48 kinds of algal species belonging to 6 phyla and 31 genera were identified, among which, the species in Chlorophyta accounted for about 47.9% of the total species. The dominant specie was the *Microcystic aeruginosa*, the frequency of which was 90.9%. No significant difference was found on algal species across three sampling sites. Overall, Margalef values varied from 0.10 to 1.84, while algal density varying from $12.65\text{ to }825.00\times10^6\text{ cell L}^{-1}$, both showing lower values during winter season. The Chl-a concentrations varied from $1.30\text{ to }41.10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and TP concentrations varied from $0.06\text{ to }0.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, both having a significant higher values in autumn and summer. CCA analysis showed that the spatial distribution of algae was greatly affected by the aquatic environmental factors and TP could be the major one.

Keywords: Lake Chaohu; algae composition; aquatic environmental factors; canonical correspondence analysis(CCA); seasonal variations

由于藻类对水环境因子变化的响应比较敏感,藻类植物已被广泛用来评价江河、湖泊等水质变化,甚至作为水污染预警的辅助监测手段之一^[1]。我国在这方面也做了很多工作,如早在1983年章宗涉等利用藻类监测,评价了图们江的水污染状况^[2]。近些年,董旭辉等利用藻类生物多样性及其对环境的指示作用

对长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示属种及硅藻与总磷的转化关系进行了系统研究^[3-4]。藻类群落组成对水环境因素具有指示作用,同时,水环境的改变也直接影响藻类生长。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,其分析结果直观,包含的信息量大,常用作藻类群落组成与水环境因子的相关关系研究^[5]。

巢湖位于安徽省中部,是我国的五大淡水湖之一。近年来,巢湖遭受了严重的污染,水质急剧下降,蓝藻水华频繁爆发^[6]。水质污染下巢湖藻类群落组成及生物多样性变化已经引起了人们的广泛关注。本试

收稿日期:2010-06-10

基金项目:国家自然科学基金项目(40972092, 40073030);自然科学技术水专项项目(2008ZX07103-005-01)

作者简介:杨丽标(1981—),男,河北保定人,在读博士,主要从事水环境与生态方面的研究。E-mail:libiaoyang@yahoo.com

* 通讯作者:李玉成 E-mail:Liyich1988@yahoo.com.cn

验在巢湖设置3个采样点,对样点区域水体藻类组成及水质的季节变化进行了研究;并分析了藻类组成与氮、磷、溶解氧等主要水质指标之间的相关关系,以期对巢湖水质评价及污染治理提供科学的数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样点设置与采样方法

试验共设置3个采样点,分别为巢湖西半湖的塘西湖区、十五里河湖区,及东半湖的一水厂取水口(图1);监测时间为2008年5月至2009年5月。

藻类样品的采集使用国际标准的25号筛绢制成的小型浮游生物网,于水体自下向上垂直托取定量样品,用5%的甲醛溶液固定保存。另取表层水样2 L,摇匀,一部分原水样直接分装于250 mL磨口瓶,用于测定 COD_{Mn} 、全氮(TN)、全磷(TP)含量。另一部分原水样用Whatman滤膜过滤,分装于250 mL塑料瓶,避光保存,用于测定水体叶绿素a(Chla)含量。每次取样设置3次重复。

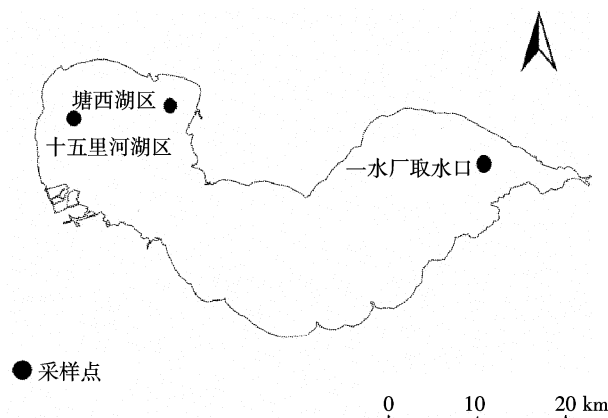


图1 采样点示意图

Figure 1 Map of sampling sites

1.2 项目测试分析方法

水样TP、TN、 COD_{Mn} 测定方法见《水和废水监测分析方法》(第四版)^[7];溶解氧(DO)的测定采用便携式溶氧仪现场直接测定;Chla含量测定采用荧光酸化法^[8];藻细胞密度采用显微镜法^[9];水体透明度(SD)用塞氏盘直接在现场测定。

1.3 数据分析

频度=某种藻类出现的样方数/整个样方数 $\times 100$

Margalef指数计算方法: $d=(s-1)/\ln N$

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。按如下要求对藻类物种进行筛选:该物种在各样点出现的频度 $>30\%$,该物种在至少一个样点的相对密度 $\geq 1\%$ 。最终分析数据包含13个藻类分类单元和5个环境因子(pH、TN、TP、DO、 COD_{Mn})。物种矩阵经过 $\lg(x+1)$ 转换。环境因子数据除pH外全部进行 $\lg(x+1)$ 转换^[9]。CCA分析结果用物种-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。

2 结果与讨论

2.1 藻类群落组成

2008年5月至2009年5月,3个采样点鉴定的藻类共6门31属48种。其中蓝藻门5属7种,占14.6%(表1);绿藻门14属23种,占47.9%;硅藻门7属13种,占27.1%;裸藻门2属2种,占4.2%;甲藻门2属2种,占4.2%;隐藻门最少,只有1属1种,占2.1%。空间上,3个采样点藻类群落结构没有明显的差异。时间尺度上,绿藻门、蓝藻门在春、夏两季出现较多。整体上,藻类优势种群为蓝藻门的铜绿微囊藻(*Microcystic aeruginosa*),出现频度为90.9%;亚优势种为绿藻门的普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)和硅藻门的小环藻(*Cyclotella sp.*),出现频度分别为78.7%和80.2%。

塘西湖区、十五里河湖区及一水厂取水口3个样点藻类物种丰富度指数(Margalef值)的变化范围分别为0.14~0.97、0.10~0.94、0.31~1.84(图2),均低于3,故3个样点区域水质总体处于 α -中污状态^[11-12]。一水厂取水口取样点Margalef平均值显著高于塘西湖区和十五里河湖区($\alpha=0.05, P<0.05$),表明一水厂取水口采样点水体藻类种类组成较前两者丰富。3个样点冬季Margalef值均低于其他季节,表明冬季藻类物种多样性较低。藻细胞密度与Margalef指数表现出相同的季节变化规律(图3)。同时,藻细胞密度还呈现出空间上的差异。塘西湖区($21.11 \times 10^6 \sim 825.00 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值 $414.18 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$)与十五里河湖区($69.27 \times 10^6 \sim 401.33 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值 $268.25 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$)两个样点年度内藻细胞密度差异不显著($\alpha=0.05, P=0.22$),但二者均显著高于一水厂取水口样点值($12.65 \times 10^6 \sim 58.10 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值 $40.32 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$)。

自然水体藻类群落对水环境因子的变化响应十

分敏感,水质状况往往是藻类组成尤其是优势种群变化的客观诱因^[13]。赵影等在 1999 年对巢湖 4 个季节的调查发现,全年内取水口水域藻类优势种群为铜绿微囊藻^[14]。张良璞^[15]对巢湖藻类组成进行了较长时间的调查,结果表明,2001—2005 年巢湖藻类优势种群仍为蓝藻门的铜绿微囊藻,其次为针晶蓝纤维藻、尖尾蓝隐藻和小环藻。本研究结果同样显示,2008 年巢湖藻类首要优势种群为铜绿微囊藻,亚优势种则为绿藻门的普通小球藻和硅藻门的小环藻。这表明,近些年巢湖水质整体上似乎没有明显变化。另外,本研究

中藻细胞密度冬季显著低于其他季节,这可能是由于冬季气温较低,加之为枯水季节,其水文及光热条件不利于藻类的生长繁殖所致^[16]。

2.2 3 个样点水质季节变化

监测结果表明,西半湖塘西湖区样点水质全年处于 V 类,溶解氧、总氮、总磷、COD_{Mn}、叶绿素 a、pH、透明度的周年均值分别为 8.74±1.82 mg·L⁻¹、3.60±1.53 mg·L⁻¹、0.25±0.16 mg·L⁻¹、6.62±1.29 mg·L⁻¹、14.53±18.15 μg·L⁻¹、8.0±0.2、0.19±0.11 m(表 2)。十五里河湖区采样点水质除秋季外(Ⅳ类),其他季节水质均为 V

表 1 3 个采样点藻种类数季节变化
Table 1 Seasonal variations of algae species at three sampling sites

时间(年.月)	采样点	绿藻门	蓝藻门	硅藻门	裸藻门	隐藻门	甲藻门	合计
2008.5	塘西湖区	8	3	3	1			15
	十五里河湖区	9	3	3	2			17
	一水厂取水口	7	2	8				17
2008.7	塘西湖区	5	3	2		1	2	13
	十五里河湖区	7	1	4		1		13
	一水厂取水口	7	2	2				11
2008.8	塘西湖区		1					1
	十五里河湖区	2			1			3
	一水厂取水口	11	6	7	3		1	28
2008.9	塘西湖区	2	2	1		1		6
	十五里河湖区	1	2	3		1		7
	一水厂取水口	13	4	4	1		1	23
2008.10	塘西湖区	2	4	1				7
	十五里河湖区	2	1	1				4
	一水厂取水口	5	3					8
2008.11	塘西湖区		2	2				4
	十五里河湖区		2	1				3
	一水厂取水口	2	4	1				7
2008.12	塘西湖区	1	3	3				7
	十五里河湖区	1	3	3				7
	一水厂取水口	6	2	2	1			11
2009.2	塘西湖区		3	2		1	1	7
	十五里河湖区	1	6	2		1	1	11
	一水厂取水口	4	2	5	1			12
2009.3	塘西湖区	2	4	3				9
	十五里河湖区	5	4	4				13
	一水厂取水口	3	2	5	1			11
2009.4	塘西湖区	5	2	6	1	1	1	16
	十五里河湖区	9	1	4	1	1		16
	一水厂取水口	6	1	8		1		16
2009.5	塘西湖区	7	5	5		1		18
	十五里河湖区	5	4	4		1		14
	一水厂取水口	8	4	4				16

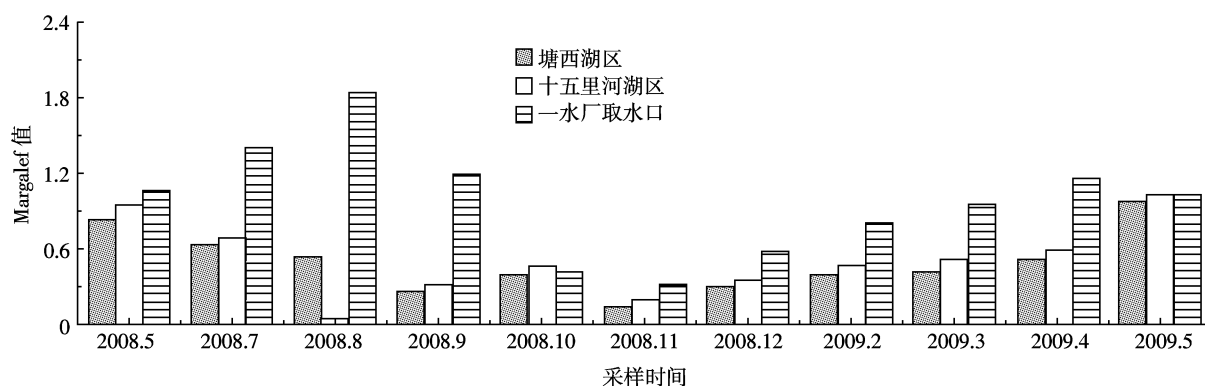
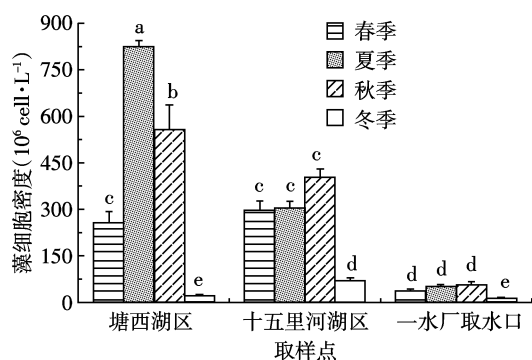


图2 巢湖藻类物种丰富度指数

Figure 2 Species richness of algae in Lake Chaohu



均值±SD, 不同字母表示均值间在 0.05 显著水平上差异显著
mean±SD, different letters indicate significant difference at $\alpha=0.05$

图3 采样点藻细胞密度季节变化

Figure 3 Seasonal variation of algae density

类水;溶解氧、总氮、总磷、 COD_{Mn} 、叶绿素 a、pH、透明度的周年均值分别为 $9.59 \pm 2.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $3.50 \pm 1.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.23 \pm 0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $6.68 \pm 0.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $9.71 \pm 7.65 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 8.1 ± 0.3 、 $0.21 \pm 0.08 \text{ m}$ 。比较而言,东半湖一水厂取水口样点水质四季均为Ⅲ类水,水质优于西半湖两个采样点,其溶解氧、总氮、总磷、 COD_{Mn} 、叶绿素 a、pH、透明度周年均值分别为 $8.73 \pm 2.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.90 \pm 0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.10 \pm 0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $4.85 \pm 0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.65 \pm 0.13 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 7.7 ± 0.1 、 $0.35 \pm 0.05 \text{ m}$ 。塘西湖区与十五里河湖区秋季叶绿素含量显著高于其他季节,而总磷含量在夏季最高。其他水质指标没有明显的季节变化。7个水质指标周年数据的变异系数(CV)介于 1.84%~124.96%之间,且各水质指标间数据的变异系数差异显著。叶绿素 a 与总磷变异系数较高,表明二者的季节变化较其他指标明显。所有水质指标中,叶绿素 a 的变异系数最高,达到 70.51%。

自 20 世纪 80 年代以来,巢湖污染日益加重,水华蓝藻频繁爆发,成为长江中下游地区典型的富营养

化湖泊之一。王振祥等对巢湖的水质调查显示,2000—2007 年巢湖 TN、TP、 COD_{Mn} 浓度的变化范围分别为 1.18~4.16、0.1~0.36、3.81~7.37 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;除 2003 年为重度富营养化状态外,其他年份均为中度富营养化^[17]。本研究(2008 年)中 TN、TP、 COD_{Mn} 的变化范围分别为 0.76~5.75、0.06~0.34、4.29~8.55 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与王振祥等研究结果相比没有显著的变化,表明虽然近些年政府对巢湖进行了大量的污染治理工作,但巢湖水质仍不容乐观,巢湖污染治理仍是亟待解决的难题之一。

2.3 藻类群落与环境因子关系的 CCA 分析

根据藻类出现频度和相对密度,选取了 13 种藻类用于 CCA 分析,藻类代码见表 3。图 4 反映了藻类组成与 5 种环境因子间的关系。环境因子第一、二轴间的相关系数为 0,表明分析结果可信^[18]。第一轴排序与 TP 正相关(0.08),与其他环境因子负相关。第二轴排序与 pH(0.36)、DO(0.14)和 TP(0.38)正相关,与 TN(-0.11)和 COD(-0.47)负相关。同时,藻类属种与环境因子的 CCA 分析结果较好反映了藻类与环境特征的相关性。结果显示,13 种藻类大致可分为 4 组。种组 I 只有杆裂丝藻 1 种,并与 TP 浓度负相关,表明 TP 是影响杆裂丝藻生长的限制条件。种组 II 包含铜绿微囊藻和水华鱼腥藻,与 pH 和 DO 有较强的负相关性,与 TP 有强烈的正相关,表明两种藻类生长受 pH、DO 和 TP 的影响。种组 III 包含与 TP 浓度正相关的湖生卵囊藻、十字藻、水华束丝藻、直舟形藻、针杆藻;而种组 IV 包含四角盘星藻、柱状栅藻、普通小球藻、小环藻、球衣藻 5 种;小环藻与 TN 浓度负相关与 COD 浓度正相关,其余藻类均与 pH 和 COD 正相关。整体上,TP 浓度是影响巢湖藻类种群分布格局的主要因素。

表 2 取样点水质季节变化
Table 2 Seasonal variation of water quality

采样点	季节	DO	TN	TP	COD _{Mn}	Chla/ μg·L ⁻¹	pH	SD/ m	水质
		mg·L ⁻¹							
塘西湖区	春季	8.83a	3.31a	0.15b	5.93a	4.43b	8.0a	0.20b	V
	夏季	9.65a	5.75a	0.48a	8.55a	41.10a	8.3a	0.10b	V
	秋季	6.16a	2.12a	0.14b	6.13a	11.03b	8.1a	0.13b	V
	冬季	10.30a	3.21a	0.21b	5.85a	1.55b	7.8a	0.34a	V
	年平均	8.74±0.82	3.6±1.53	0.25±0.16	6.62±1.29	14.53±18.15	8.0±0.2	0.19±0.11	
	CV/%	20.82	42.61	65.18	19.58	124.96	2.58	55.53	
十五里河	春季	7.97a	3.68a	0.20b	6.60a	8.33b	8.0a	0.19b	V
	夏季	13.15a	4.64 a	0.34a	8.05a	19.85a	8.5a	0.13b	V
	秋季	6.43a	1.98 a	0.14 b	5.77a	9.37b	7.9a	0.19b	IV
	冬季	10.80a	3.71 a	0.22 b	6.30a	1.30b	8.0a	0.32a	V
	年平均	9.59±2.99	3.5±1.11	0.23±0.08	6.68±0.98	9.71±7.65	8.1±0.3	0.21±0.08	
	CV/%	31.14	31.64	37.27	14.61	78.76	3.34	38.63	
一水厂取水口	春季	8.32a	1.22a	0.12a	4.29a	1.60a	7.7a	0.29a	III
	夏季	6.91a	0.77a	0.10a	4.65a	1.63a	7.6a	0.38a	III
	秋季	8.08a	0.76a	0.11a	5.54a	1.83a	7.6a	0.34a	III
	冬季	11.59a	0.84a	0.06a	4.90a	1.53a	7.9a	0.40a	III
	年平均	8.73±2.01	0.9±0.22	0.1±0.03	4.85±0.53	1.65±0.13	7.7±0.1	0.35±0.05	
	CV/%	23	24.28	26.97	10.87	7.81	1.84	13.78	
整体 CV/%		24.99	32.85	43.14	15.02	70.51	35.98	34.87	

注:均值±SD,同一列数据不同字母表示均值间差异显著(α=0.05)。

典范对应分析(CCA)能够客观反映群落与环境因子的相互关系,近年被广泛应用于湖泊等水体藻类群落与水环境因子复杂关系的研究。如邢伟通过 CCA 分析发现滇池水体铜绿微囊藻生物量与优势度主要受硝酸盐、亚硝酸盐、总氮等含量影响,而水华束丝藻生物量和优势度主要受氨氮的影响^[19]。邢鹏等对太湖藻类与环境因子的 CCA 分析结果显示,藻类群落变化与浮游细菌高度相关^[20]。沈会涛与刘存歧对白洋淀藻类群落与水环境因子的 CCA 分析表明,pH 及 TP 浓度是影响水体藻类物种分布格局的重要因素^[16]。国家重点治理的“三湖”中,有关巢湖藻类与环境因子关系的 CCA 分析并不多见。本研究中 CCA 分析结果显示,水体 TP 和 pH 是影响巢湖藻类分布的主要因素。然而,值得注意的是,富营养化水体中碳酸盐体系的化学平衡决定 pH 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 与藻类初级生产力显著正相关^[21]。因此,我们认为本文中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。

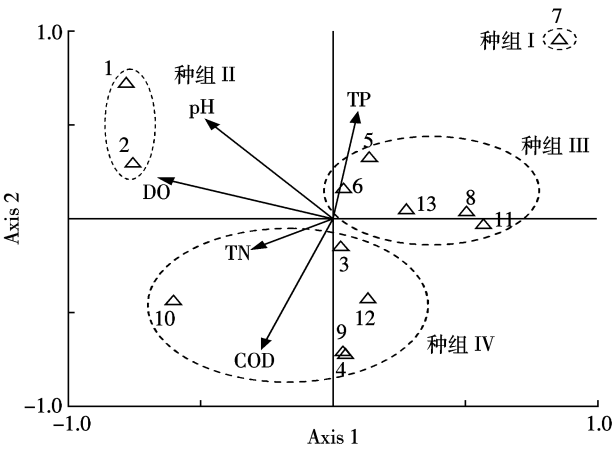


图 4 巢湖 3 个采样点藻类与环境因子的 CCA 排序图
Figure 4 CCA analyses between algae species and environmental factors

3 结论

(1) 监测时间内共鉴定藻类 6 门 31 属 48 种;其中以绿藻门为主,共 14 属 23 种,占总数的 47.9%。3 个样点藻类群落结构没有明显差异。藻类物种丰富度指数(Margalef 值)和藻细胞密度的变化范围分别为 (0.10~1.84)×10⁶ cell·L⁻¹ 和 (12.65~825.00)×10⁶ cell·

表 3 CCA 分析中藻种类代码

Table 3 Code of phytoplankton species for CCA

编号	种类	编号	种类
1	铜绿微囊藻 <i>Microcystic aeruginosa</i>	8	水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>
2	水华鱼腥藻 <i>Anabaena flos-aquae</i>	9	普通小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>
3	四角盘星藻 <i>Pediastrum tetras</i>	10	小环藻 <i>Cyclotella sp.</i>
4	柱状栅藻 <i>S. bijuga</i>	11	直舟形藻 <i>Navicula directa</i>
5	湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustis Chod</i>	12	球衣藻 <i>Chlamydomonas sp.</i>
6	十字藻 <i>Crucigenia apiculata</i>	13	针杆藻 <i>Synedra sp.</i>
7	杆裂丝藻 <i>Stichococcus bacillaris</i>		

L^{-1} ,在冬季二者值均较低。一水厂取水口 Margalef 值与藻细胞密度大于塘西湖区与十五里河湖区。

(2)塘西湖区和十五里河湖区两个样点水质总体为 V 类,一水厂取水口水质为Ⅲ类。3 个样点叶绿素 ($1.30\sim 41.10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)和总磷 ($0.06\sim 0.48\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)含量分别在秋季和夏季显著高于其他季节,其他水质指标季节变化不明显。

(3)CCA 分析结果显示,藻类群落分布受水环境因子的影响较为明显。整体上,TP 是影响巢湖藻类物种分布格局的重要因素。

参考文献:

- [1] Gabrielle Thiébaud, Guillaume Tixier, Francois Guérol, et al. Comparison of different biological indices for the assessment of river quality: application to the upper river Moselle (France)[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 570:159-164.
- [2] 章宗涉,莫珠成,戎克文. 用藻类监测和评价图们江的水污染[J]. 水生生物学集刊, 1983, 8(1):97-104.
ZHANG Zong-she, MO Zhu-cheng, RONG Ke-wen. The application of algae monitoring for water quality assessment of the Tumen River[J]. *Monographic Series of Hydrobiological*, 1983, 8(1):97-104.
- [3] 董旭辉,羊向东,王 荣,等. 长江中下游地区湖泊硅藻-总磷转换函数[J]. 湖泊科学, 2006, 18(1):1-12.
DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, WANG Rong, et al. A diatom-total phosphorus transfer function for lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *J Lake Sci*, 2006, 18(1):1-12.
- [4] 董旭辉,羊向东,王 荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5):570-574.
DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, WANG Rong. Diatom indicative species of eutrophication of the lakes in the middle and lower reach regions of Yangtze River[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5):570-574.
- [5] Ter Braak C.J.F, Prentic IC. A theory of gradient analysis[J]. *Advances in Ecological Research*, 1986, 18:271-317.
- [6] 李坤阳,储昭升,金相灿,等. 巢湖水体藻类生长潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10):2124-2131.
LI Kun-yang, CHU Zhao-sheng, JIN Xiang-can, et al. The algal growth potential of research in Chaohu Lake water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10):2124-2131.
- [7] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境出版社, 2002.
Chinese EPA. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater [M]. The 4th Edition. Beijing:China Environmental Science Press, 2002.
- [8] 汤坤贤,袁东星,林泗彬,等. 江蕨对赤潮消亡及主要水质指标的影响[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2):24-27.
TANG Kun-xian, YUAN Dong-xing, LIN Si-bin, et al. Depression and affect of red tide on main water quality index by *Gracilaria tenuistipitata* [J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(2):24-27.
- [9] 徐金森,郑天凌,郭清华,等. 两种海洋细菌对赤潮藻的细胞生物量的影响研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(12):57-60, 67.
XU Jin-sen, ZHENG Tian-ling, GUO qing-hua, et al. Influence on the cell biomass of red tide alga alexandrium tamarense(lebour) balech cultured with two marine bacteria[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(12):57-60, 67.
- [10] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50:673-687.
- [11] Douterelo I, Perona E, M ateo P. Use of cyanobacteria to assess water quality in running waters[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 127:377-384.
- [12] 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):87-91.
KUANG Qi-jun, MA Pei-ming, HU Zheng-yu, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2):87-91.
- [13] Hambrook J A. Bioassessment of stream water quality using benthic and planktonic algae collected along an urban intensity gradient in the Eastern Cornbelt Plains Ecoregion, Ohio, USA[J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38:14-15.
- [14] 赵 影,王志强,杨志平,等. 巢湖取水口浮游藻类污染调查 [J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(4):316-318.
ZHAO Ying, WANG Zhi-qiang, YANG Zhi-ping, et al. Investigation on water pollution by algae at locations of water collection in Chaohu Lake[J]. *Journal of Environmental Health*, 2002, 19(4):316-318.
- [15] 张良璞. 巢湖藻类群落多样性分析[J]. 生物学杂志, 2007, 24(6):

- 53–54, 72.
ZHANG Liang–pu. Diversity analysis of algae in Chaohu Lake[J]. *Journal of Biology*, 2007, 24(6):53–54, 72.
- [16] 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(1):773–779.
SHEN Hui–tao, LIU Cun–qi. Canonical correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. *J Lake Sci*, 2008, 20(1):773–779.
- [17] 王振祥, 朱晓东, 孟 平. 巢湖富营养化年度尺度变化分析及对策[J]. 环境监测, 2009, 416(3B):33–36.
WANG Zhen–xiang, ZHU Xiao–dong, MENG Ping. Analysis on eutrophication and countermeasure at annual scale in Chaohu Lake[J]. *Environmental Monitoring*, 2009, 416(3B):33–36.
- [18] ter Braak C.J.F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. *Ecology*, 1986, 67(5):1167–1179.
- [19] 邢 伟. 铁对水华蓝藻的生态生理学效应研究 [D]. 中国科学院研究生院(水生生物研究所)博士论文, 2007.
XING Wei. Ecophysiological effects of iron on Bloom –forming Cyanobacteria[D]. Doctoral Dissertation of Graduate University of the Chinese Academy of Sciences(Institute of hydrobiology), 2007.
- [20] 邢 鹏, 孔繁翔, 曹焕生, 等. 太湖浮游细菌与春末浮游藻类群落结构演替的相关性[J]. 生态学报, 2007, 27(5):1696–1702.
XING Peng, KONG Fan–xiang, CAO Huan–sheng, et al. Relationship between bacterioplankton and phytoplankton community dynamics during late spring and early summer in Lake Taihu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1696–1702.
- [21] 朱文昌, 陆 敏, 石浚哲. 梅梁湖水体浮游植物与环境因子的关系[J]. 环境监测管理和技术, 2010, 22(3):27–30.
ZHU Wen–chang, LU Min, SHI Jun–zhe. Relationships between phytoplankton and environmental factors in waters of Meiliang Lake[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2010, 22(3):27–30.