

## 巢湖水环境因子的时空变化及对水华发生的影响<sup>\*</sup>

王书航, 姜霞<sup>\*\*</sup>, 金相灿  
(中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 为研究巢湖水环境因子与藻类生物量的相互作用, 筛选出对藻类生物量相对重要的环境因子, 以 2008 年巢湖水质监测数据为基础, 采用多元统计方法对巢湖监测点数值数据进行了聚类分析、判别分析及污染特征识别, 研究了水环境因子与藻类生物量的关系. 结果表明: 巢湖水环境自西向东分为重度污染区、中度污染区和轻度污染区, 叶绿素、溶解性总氮可作为巢湖水环境空间显著性差异的指示因子. 各监测点污染分级排序为: 南淝河入湖区 > 十五里河入湖区 > 塘西河入湖区 > 西半湖湖心 > 派河入湖区 > 杭埠河入湖区 > 忠庙 > 兆河入湖区 > 坝口 > 东半湖湖心 > 造船厂 > 中埠乡. 对藻类生物量影响较大的环境因子存在季节性变化, 全年总磷、总氮、温度、硝氮、铵氮与藻类生物量的关系较为密切.  
**关键词:** 时空变化; 因子分析; 聚类分析; 多元回归; 巢湖; 水华

## Spatial-temporal variations of aquatic environmental factors and their influences to algal blooming in Lake Chaohu

WANG Shuhang, JIANG Xia & JIN Xiangcan  
(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China)

**Abstract:** In order to understand the interactions between environmental factors and the algal biomass in Lake Chaohu, those relatively important environmental factors to alga biomass were extracted. Based on monitored water quality data of Lake Chaohu in 2008, cluster analysis, discriminate analysis and the recognition of pollution feature were carried out to reveal the relationships between water environment factors and algal biomass. Results suggest that the Lake Chaohu can be divided into severe polluted area, moderately polluted area, and mildly polluted area from west to east. The Chl.a and dissolved total nitrogen are the indicative factors describing the significantly spatial difference in water environment. The sequence of pollution classification for all the monitoring sites are as follows: Nanfei river inlake area > Shiwuli river inlake area > Tangxi river inlake area > West lake center area > Paihe river inlake area > Hangbu river inlake area > Zhongmiao area > Zhaohe river inlake area > Bakou area > East lake center area > Ship factory > Zhonghan town area. The screened important environmental factors to algal biomass vary with seasons. TP, TN, temperature,  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N are closely related to algal biomass all the year round.

**Keywords:** Spatial-temporal variations; factor analysis; cluster analysis; multiple regression; Lake Chaohu; algal bloom

湖泊富营养化已成为一个世界性问题, 在人口众多、经济高速发展的中国尤为严重. 人类活动导致水体容纳了数倍甚至数十倍的环境污染负荷, 加速了水体富营养化进程<sup>[1-3]</sup>. 近年来对湖泊富营养化的研究主要集中在氮、磷的迁移转化及各形态的赋存特征、藻类种类及生物量的变化、营养盐的吸附释放等方面<sup>[4-9]</sup>. 水环境因子的变化既为水华暴发提供必不可少的条件, 又是水华暴发的结果, 因此分析水环境因子与藻类生物量的相互作用对研究湖泊富营养化过程至关重要<sup>[10-12]</sup>. 本研究以巢湖为研究对象, 运用聚类分析、判别分析、因子分析、逐步回归分析等多元统计方法对 2008 年 12 个监测点逐月的水质监测数据进行系统分析, 以弄清该地区水环境因子时空变化特征, 筛选出与藻类生物量变化最密切的环境影响因

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(21077097)和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX0701-010)联合资助.  
2010-11-01 收稿; 2011-05-23 收修改稿. 王书航, 男, 1985 年生, 硕士研究生; E-mail: shuhang125126@163.com.

<sup>\*\*</sup> 通讯作者; E-mail: jiangxia@craes.org.cn.

子,并对巢湖各监测点和各月份污染等级进行排序,以期对巢湖富营养化机理研究和水华控制提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域

巢湖位于安徽省中部( $30^{\circ}25'28''-31^{\circ}43'28''N, 117^{\circ}16'54''-117^{\circ}51'46''E$ ),是我国五大淡水湖之一,属长江下游左岸水系,湖面面积为  $760\text{ km}^2$ ,正常水文年平均水深  $3\text{ m}$  左右,主要环湖河流有 9 条,分为 7 条水系,分别为南淝河(店埠河)、十五里河、杭埠河、派河、柘皋河、双桥河、兆河、白石山河、裕溪河(图 1)。

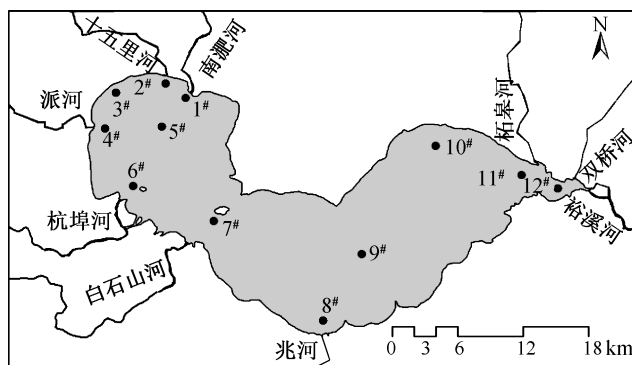


图 1 巢湖采样点分布

Fig. 1 Sampling sites of Lake Chaohu

### 1.2 样品的采集与处理

对巢湖 12 个监测点开展每月 1 次的现场监测和水质分析(图 1),水质指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、五日生化需氧量( $BOD_5$ )、高锰酸盐指数( $COD_{Mn}$ )、铵氮( $NH_4^+-N$ )、硝氮( $NO_3^--N$ )、溶解性总氮(DTN)、叶绿素 a(Chl.a)等,水样需放入  $2-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  保温箱中保存并在  $48\text{ h}$  之内测定<sup>[13]</sup>. 现场监测项目包括溶解氧(DO)、水温(T)、pH 值、电导率(CD)、透明度(SD)等. TN、DTN 含量的测定采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法, $NO_3^--N$  含量的测定用紫外吸收法, $NH_4^+-N$  含量的测定用纳氏试剂分光光度法,TP 含量测定采用磷钼蓝比色法,叶绿素 a 测定采用同步荧光法<sup>[14]</sup>,水样指标测定详见《水和废水监测分析方法》<sup>[15]</sup>.

### 1.3 数据处理与分析

数据处理与分析采用 Excel 2007、Origin 8.0 以及 SPSS 17.0 软件. 采用多元统计分析法对全湖水水质参数月均值及监测点年均值进行聚类分析、判别分析、因子分析及多元逐步回归分析<sup>[16]</sup>. 聚类分析和主成分分析前需对各因子数据进行标准化,以消除量纲影响,本次计算使用标准正态变化: $X_{norm} = (x - \bar{x})/SD$ ,式中, $x$  为参数的实测值, $\bar{x}$  为各参数的平均值, $SD$  为标准差, $X_{norm}$  为标准化后值.

聚类法(CA)采用系统聚类,即先把  $N$  个变量看成  $n$  种分类,然后把性质相近的两类逐步合并,相似度计算采用欧式平方距离. 判别分析采用逐步判别法,分析和验证方法分别为 Fisher 判别和交叉验证. 因子分析先计算变量方差和协方差矩阵的特征量,将多个变量通过降维转化为少数几个综合变量,从而能够从众多水质指标中识别出对河流水质影响较大的成分,因子提取方法为主成分法.

## 2 结果及分析

### 2.1 水环境因子空间变化

湖泊水环境受多种因素驱动,主要包括自然因素和社会经济因素,其结果是产生空间的相似性与差异性<sup>[17]</sup>. 为识别巢湖水环境因子空间相似性和差异性,采用系统聚类分析将巢湖监测点划分为不同类型(图 2).

在  $(D_{link}/D_{max}) \times 100 < 25$  时,将巢湖监测点分为三类( $D_{link}$  为聚类组间距离; $D_{max}$  为聚类最大距离). 第一类(组 A)包括南淝河入湖区、十五里河入湖区、塘西河入湖区;第二类(组 B)包括西半湖湖心、忠庙、杭埠河入湖区、派河入湖区;第三类(组 C)包括兆河入湖区、东半湖湖心、中埠乡、造船厂、坝口. 参照地表水质量标准(GB3838-2002)及采样点位置图(图 1)可以看出:组 A 位于巢湖西部城市合肥附近,代表重度污染区域;组 B 位于巢湖西部和中部,代表中度污染区域;组 C 位于巢湖东半湖,代表轻度污染区域. 监测点空间聚类分析显示巢湖水环境由东向西逐渐恶化.

Chl.a、DTN 可作为巢湖水环境空间显著性差异的指示因子(图 3). 同时,交叉验证显示 Chl.a、DTN 可 100% 对监测点进行正确分类.

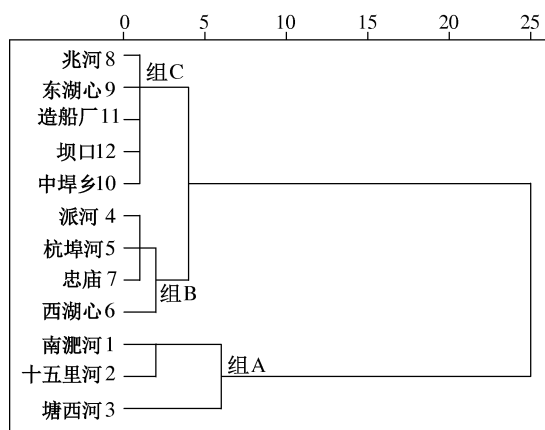


图 2 巢湖监测点空间聚类分析结果

Fig. 2 Spatial cluster analysis results of sampling sites in Lake Chaohu

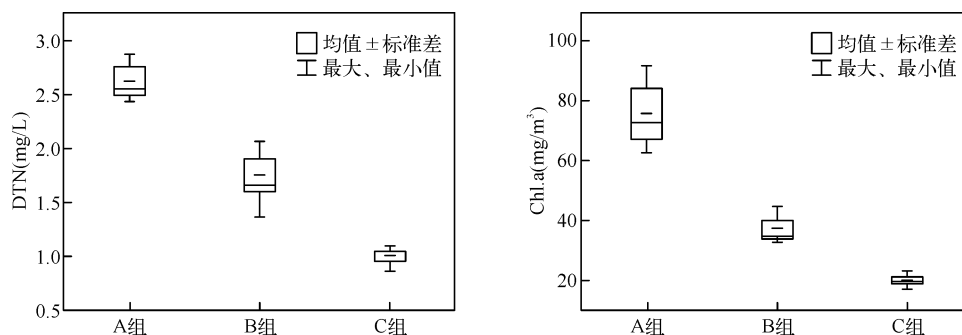


图 3 不同组别空间显著性差异因子年均值变化

Fig. 3 Annual mean value variations of spatial significant different factors in different groups

## 2.2 水环境因子季节变化

巢湖水体偏弱碱性,pH 月均值在 7.70–8.83 之间,随时间呈波浪形变化(图 4a). 全湖平均 DO 含量在 6.17–10.67 mg/L 之间,春季较高,夏、秋季较低(图 4b),主要因为在温度较高的夏、秋季节,微生物活动和有机污染物的矿化消耗大量溶解氧. SD 均值在 0.29–0.46 m 之间,夏、秋季藻类生物量的增加导致 SD 较低,而春季和冬季较高(图 4c),同时可以看出,7 月份 SD 稍有升高,可能是“引江济巢”工程使巢湖的水环境得到暂时改善. 水体中 Chl.a 平均含量在 6.91–146.37 mg/m<sup>3</sup> 之间,呈明显的季节性变化(图 4d). 5 月份开始,水柱中藻类生物量明显增加;8 月份达到最大值,平均 Chl.a 含量为 146.37 mg/m<sup>3</sup>;然后在秋季开始下降,同时可以看出 Chl.a 呈明显的区域性分布,A 组地区明显高于 C 组地区. TN、TP 在季节上都呈“双峰”趋势变化(图 4e 和图 4f),在 4 月份和 8 月份含量较高. 结合当地气候和水体中 Chl.a 含量可知,4 月份流域植被覆盖度较小,雨量增加,水土流失导致水体中氮、磷含量增加;8 月份藻类生物量急剧增加,同时高温加速有机物的矿化作用,导致水体中氮、磷含量的明显增高. 全湖铵氮平均含量在 0.21–0.90 mg/L 之间,冬季和春季较高,夏季、秋季较低(图 4g),主要因为巢湖夏秋季的主要优势水华藻类——铜绿微囊藻在生长过程中吸收大量铵氮<sup>[18]</sup>,导致铵氮浓度较低. COD<sub>Mn</sub> 含量呈春高冬低变化趋势,在 4.25–6.49 mg/L 之间(图 4h),同时可以看出,在 9 月出现一个峰值,稍晚于 Chl.a 和 TN、TP 峰值,可能是藻类死亡残体导致水体中 COD<sub>Mn</sub> 含量升高.

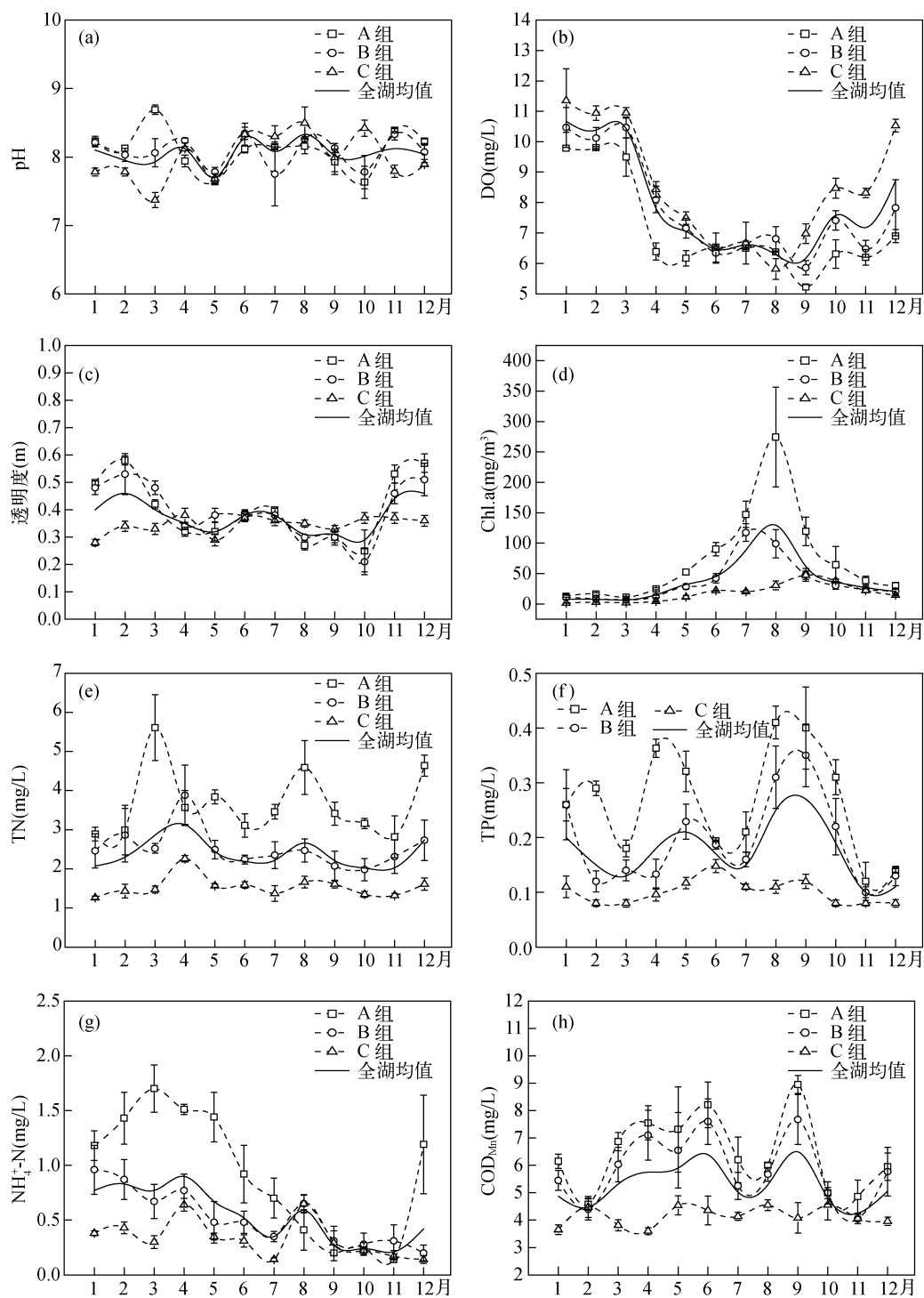


图4 巢湖水环境因子季节性变化

Fig. 4 Seasonal variations of water environmental factors of Lake Chaohu

2.3 巢湖的水环境因子污染特征识别

影响湖泊水环境质量特征的因子较多且错综复杂,找出对其水质起主要作用的因子至关重要<sup>[19]</sup>,同时为有针对性地编制巢湖水污染治理方案、研发相应治理技术奠定科学基础.因子分析方法以多个变量之间的相互关系为基础,可用较少具有代表性的水质因子揭示不同时间和空间水环境的差异性,并识别出影响湖泊水环境的主要因素<sup>[20]</sup>.以不同监测点年均值为基础数据的因子分析提取了2个主成分,解释总方差的87.8%.F1贡献率为79.09%,其中CD、SD、DO、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、Chl.a、DTN、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的因子负荷较大,涵盖了湖泊大部分富营养化指示因子,反映了湖泊富营养化程度;F2贡献率为8.71%,其中pH的因子负荷最大,主要代表酸碱度对水质的影响(表1).

空间因子得分分析可以找出污染类型和监测点的相关性,能够进一步验证聚类分析的结果.因子得分越高,监测点受该种污染类型的影响就越大.不同监测点在主成分中得分可以看出,南淝河入湖区、十五里河入湖区、塘西河入湖区、派河入湖区、西半湖湖心在F1中得分较高(图5),说明西半湖富营养化较为严重;而东半湖湖心、兆河、忠庙、十五里河入湖区、塘西河入湖区在F2中得分较高(图5),说明酸碱度对其影响较大.结合各主成分贡献率,用各主成分得分与对应的方差贡献率乘积的总和即为综合得分,而主成分综合得分在某种程度上反映了错综复杂的环境因子对水质污染程度的综合影响,为监测点污染程度定量分级提供数据支持.本次研究中,各个采样点污染分级排序为:南淝河入湖区>十五里河入湖区>塘西河入湖区>西半湖湖心>派河入湖区>杭埠河入湖区>忠庙>兆河入湖区>坝口>东半湖湖心>造船厂>中埠乡(图5).

表1 影响巢湖水环境质量的主要因素识别\*

Tab.1 Identification of main influence factors of water environmental quality of Lake Chaohu

指标	空间主成分		时间主成分		
	F1	F2	F1	F2	F3
T	-0.639	0.003	<u>0.888</u>	-0.146	0.238
pH	0.302	<u>0.917</u>	0.289	0.061	<u>0.866</u>
CD	<u>0.957</u>	-0.023	<u>0.829</u>	0.050	0.018
SD	<u>0.882</u>	-0.139	<u>-0.877</u>	-0.095	0.327
DO	<u>-0.908</u>	0.366	<u>-0.822</u>	0.176	-0.212
COD <sub>Mn</sub>	<u>0.936</u>	-0.069	0.586	0.489	-0.243
BOD <sub>5</sub>	<u>0.955</u>	-0.022	-0.152	-0.767	-0.096
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	<u>0.916</u>	0.255	-0.345	<u>0.839</u>	-0.126
TP	<u>0.981</u>	-0.014	0.797	0.224	-0.305
Chl.a	<u>0.877</u>	0.210	<u>0.802</u>	-0.136	0.425
DTN	<u>0.974</u>	0.174	-0.673	0.699	-0.102
TN	<u>0.988</u>	0.086	-0.106	0.729	0.106
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	<u>0.977</u>	0.103	-0.769	0.421	-0.163
特征值	10.282	1.133	6.122	2.690	1.240
贡献率	79.09%	8.71%	47.09%	20.69%	9.54%

\*提取方法:主成分分析法;旋转法;具有 Kaiser 标准化的正交旋转法.下划线表示负荷较大.

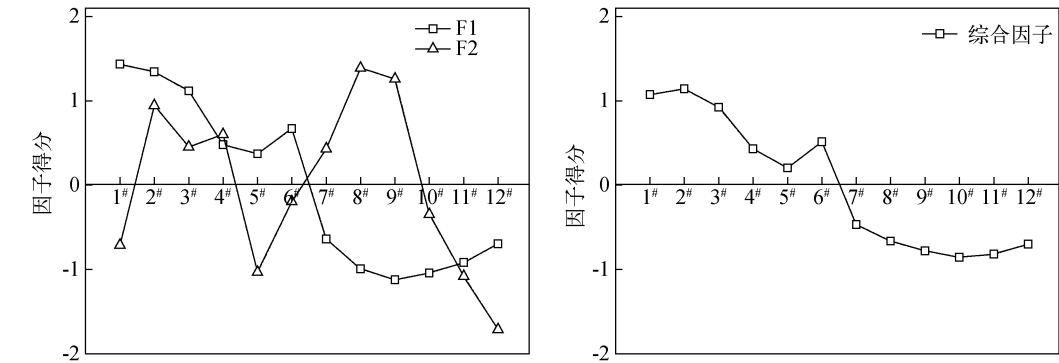


图5 巢湖不同监测点主成分得分对比

Fig.5 Comparisons of principal component scores between different monitoring sites in Lake Chaohu

以全湖环境因子各月均值为基础数据的因子分析提取了三个主成分,解释了总方差的77.32%.F1贡献率为47.09%,其中T、CD、SD、DO、Chl.a的因子贡献率较大,主要反映了藻类生物量对水质的影响,

代表了“水华”发生程度;F2 贡献率为20.69%,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  因子负荷较大,主要反映营养盐对水体生态环境的影响;F3 贡献率为9.54%,其中 pH 的因子负荷最大,主要代表酸碱度对水质的影响.主成分之间相互独立,反映了不同污染机制对水环境的影响.

不同月份在主成分中得分可知,4-10 月份得分较高,且最大值出现在8月,其趋势与水体中Chl.a含量变化相似,说明此阶段水体中藻类生物量较大;1月、3月、4月、5月、6月、8月在第二主成分 F2 中得分较高,反映此阶段水体中营养盐含量较高;6月、7月、11月、12月在第三主成分 F3 中得分较高,代表此阶段酸碱度对水体影响较大.不同月份水环境质量排序为:8月>6月>9月>4月>5月>7月>10月>1月>3月>12月>11月>2月(图6).

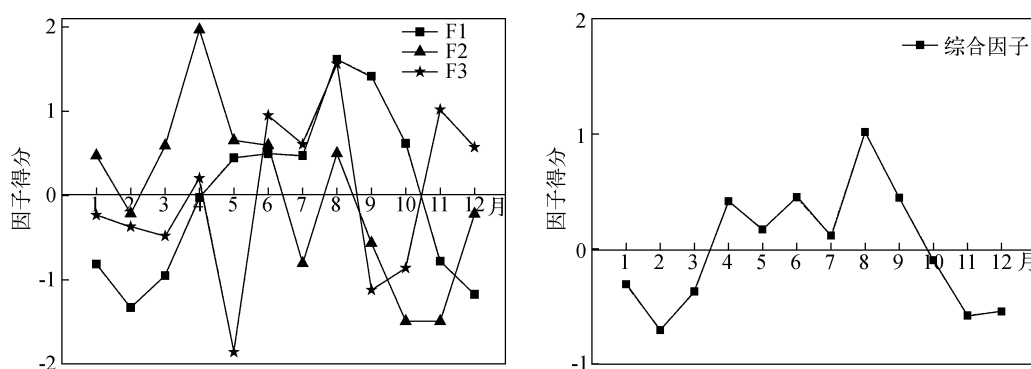


图6 巢湖不同月份主成分得分对比

Fig. 6 Comparisons of principal component scores between different months in Lake Chaohu

### 3 讨论

环境因子的变化对藻类生长有着间接或直接的影响作用<sup>[9,21]</sup>. 水体温度显著影响水体中藻类的生物量,温度适宜时藻类急剧增加;SD的变化会导致光在水下辐射的变化,进而影响藻类的生长,同时藻类生物量的变化又直接影响水体SD;藻类生长过程及生物量的变化可导致电导率、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和DO的变化,同时电导率、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和DO变化又可能会影响藻类的生长与消亡;氮、磷营养盐是限制藻类生长的重要因素;pH与水体酸碱度有关,pH的变化会影响沉积物和水体中悬浮颗粒中营养物质的吸附与释放<sup>[22-23]</sup>.

藻类生物量主要受温度控制,故Chl.a与T呈极显著正相关(表2). 巢湖水体中藻类生物量季节性变化明显,在夏季较高,而水温亦有明显的季节变化. 研究表明巢湖水华优势种铜绿微囊藻的生长在10-28℃范围内与水温呈线性相关关系<sup>[24]</sup>. 藻类生物量的增加导致水体SD降低,故Chl.a浓度与SD呈显著负相关. 藻类光合作用释放氧气会增加水体中溶解氧的含量,但藻类残体分解矿化作用消耗水体中大量氧气,沉积物和水体中有机物矿化消耗氧气的协同作用,导致水体中DO降低,所以Chl.a与水体DO呈显著负相关. Chl.a与 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和 $\text{BOD}_5$ 呈极显著正相关,主要是因为藻类死亡残体分解导致水体中有机体增加. Chl.a与TN和TP呈极显著正相关,主要因为藻类生长过程中吸收大量营养盐,导致间隙水和上覆水之间营养盐浓度差增大而加速营养盐从间隙水向上覆水的释放;另外,夏季有机物的矿化作用会明显增加水体中营养盐含量. 藻类生长过程伴随对水体中铵氮、硝氮等溶解性营养盐的吸收,但同时促进营养盐由间隙水向上覆水扩散,补充上覆水中营养盐含量,故Chl.a与铵氮、硝氮的相关性不显著.

环境因子对藻类的影响作用各不相同,各环境因子之间存在不同程度的显著相关,因此,为了防止多重共线性,同时为了找出与藻类生物量最为密切的环境因子,本次研究采用多元逐步回归分析,以期建立不同环境因子对藻类生物量的“最优”回归方程,筛选出对藻类生物量相对重要的环境因子.

表2 巢湖水环境因子与藻类生物量(Chl.a)的相关关系( $n=144$ )

Tab.2 Correlationship between water environmental factors and algal biomass of Lake Chaohu

因子	Chl.a	T	pH	CD	SD	DO	COD <sub>Mn</sub>	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	DTN	TN
Chl.a	1												
T	0.46 **	1											
pH	0.05	0.16	1										
CD	0.37 **	0.42 **	0.03	1									
SD	-0.19 *	-0.48 **	0.28 **	-0.19 *	1								
DO	-0.44 **	-0.74 **	-0.17 *	-0.48 **	0.13	1							
COD <sub>Mn</sub>	0.26 **	0.12	0.13	0.44 **	0.07	-0.36 **	1						
BOD <sub>5</sub>	0.26 **	-0.07	0.06	0.35 **	0.35 **	-0.30 **	0.43 **	1					
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.06	-0.32 **	0.19 *	0.31 **	0.35 **	0.06	0.36 **	0.26 **	1				
TP	0.47 **	0.18 *	-0.03	0.66 **	-0.10	-0.40 **	0.58 **	0.51 **	0.32 **	1			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-0.08	-0.36 **	0.06	0.11	0.49 **	-0.03	0.36 **	0.60 **	0.58 **	0.24 **	1		
DTN	0.05	-0.31 **	0.20 *	0.26 **	0.49 **	-0.10	0.48 **	0.57 **	0.81 **	0.38 **	0.84 **	1	
TN	0.35 **	-0.10	0.19 *	0.34 **	0.29 **	-0.23 **	0.50 **	0.58 **	0.57 **	0.47 **	0.62 **	0.77 **	1

\* 代表显著相关, $P<0.05$ ; \*\* 代表极显著相关, $P<0.01$ .

不同季节筛选出对藻类生物量相对重要的环境因子不同(表3).冬季和春季各有3个因子入选,分别为T、DTN、SD和TP、T、DTN,并且都是正相关.夏季有2个因子入选,其中TN为正相关,DTN为负相关.秋季有3个因子入选,其中TN、TP为正相关,BOD<sub>5</sub>为负相关.全年有5个因子入选,其中TP、TN、T为正相关,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N为负相关.水体中高水平的氮、磷是藻类生物量增加的原因,同时藻类生物量增加又会导致水体中TN、TP含量提高;藻类生物量增加的同时伴随着对溶解性营养盐的吸收,所以藻类生物量与溶解性营养盐呈负相关.从不同季节藻类生物量与环境因子逐步回归统计结果可以发现:春季营养盐为藻类生物量的第一限制因子,尤其是磷对藻类生物量的贡献最大;夏季藻类生物量与水体中的总氮呈正相关,与溶解性总氮呈负相关,说明氮作为藻类生物量的促进因子,可显著影响藻类生物量的峰值;结合水体中氮、磷浓度可知,秋季藻类生物量在一定程度上是水体氮磷增加的原因;冬季藻类死亡分解导致水体中溶解性营养盐增高.

表3 藻类生物量与环境因子逐步回归统计结果

Tab.3 Stepwise regression results of algal biomass and environmental factors

季节	方程	相关系数	综合F值	Durbin-Watson
冬季	$Chl.a = 1.94 \times T + 5.26 \times DTN + 28.72 \times SD - 23.32$	0.878	35.778	2.123
春季	$Chl.a = 34.52 \times TP + 2.70 \times T + 5.54 \times DTN - 46.4$	0.887	39.301	1.432
夏季	$Chl.a = 87.92 \times TN - 54.5 \times DTN - 38.6$	0.874	53.634	2.485
秋季	$Chl.a = 164.16 \times TP + 25.92 \times TN - 4.95 \times BOD_5 - 14.57$	0.772	15.687	1.979
全年	$Chl.a = 155.37 \times TP + 1.94 \times T + 23.93 \times TN - 26.14 \times NO_3^- - N - 24.1 \times NH_4^+ - N - 50.96$	0.696	25.930	1.271

空间聚类分析结果显示,巢湖水环境自西向东可分为三类,分别为重度污染区、中度污染区和轻度污染区,结合不同季节藻类生物量与环境因子的逐步回归方程,可为“引江济巢”治理巢湖工程提供理论支持,同时可以证明在春季进行“引江济巢”更能显著降低夏季藻类生物量.

4 参考文献

[ 1 ] Smith VH, Tilman GD, Nekola JC. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestri-

- al ecosystems. *Environmental Pollution*, 1999, **100**(1): 179-196.
- [ 2 ] Lehrter JC. Regulation of eutrophication susceptibility in oligohaline regions of a northern Gulf of Mexico estuary, Mobile Bay, Alabama. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **56**(8): 1446-1460.
- [ 3 ] Van RW, Kloosterhuis H. Phosphorous sorption in superficial intertidal sediments. *Marine Chemistry*, 1994, **48**(1): 1-16.
- [ 4 ] 王书航, 姜 霞, 钟立香等. 巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征. 环境科学, 2010, **31**(4): 115-122.
- [ 5 ] 姜 霞, 钟立香, 王书航等. 巢湖水华暴发期水-沉积物界面溶解性氮形态的变化. 中国环境科学, 2009, **29**(11): 1158-1163.
- [ 6 ] Sundareshwar PV, Morris JT. Phosphorus sorption characteristics of intertidal marsh sediments along an estuarine salinity gradient. *Limnology and Oceanography*, 1999, **44**(7): 1693-1701.
- [ 7 ] Smith DR, Warnemuende EA, Haggard BE *et al.* Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance. *Ecological Engineering*, 2006, **27**(1): 71-78.
- [ 8 ] Ruttenberg KC. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography*, 1992, **33**(4): 1460-1482.
- [ 9 ] 刘冬梅, 姜 霞, 金相灿等. 太湖藻对水-沉积物界面磷交换过程的影响. 环境科学研究, 2006, **19**(4): 8-13.
- [ 10 ] Kowalkowski T, Zbytniewski R, Szejna J *et al.* Application of chemometrics in river water classification. *Water Research*, 2006, **40**(4): 744-752.
- [ 11 ] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 63-71.
- [ 12 ] 李 波, 濮培民, 韩爱民. 洪泽湖水质的时空相关性分析. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 259-266.
- [ 13 ] 金相灿, 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.
- [ 14 ] 阎 荣, 孔繁翔, 韩小波. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 163-168.
- [ 15 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [ 16 ] 张文彤. SPSS 11 统计分析教程. 北京: 北京希望电子出版社, 2002.
- [ 17 ] Kowalkowski T. Classification of nutrient emission sources in the Vistula River system. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(6): 1867-1872.
- [ 18 ] 杨苏文, 金相灿, 姜 霞. 铜绿微囊藻、四尾栅藻和藻小环竞争实验培养基的选择. 生态环境, 2006, **15**(1): 129-133.
- [ 19 ] Astel A, Tsakovski S, Simeonov V *et al.* Multivariate classification and modeling in surface water pollution estimation. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, **390**(5): 1283-1292.
- [ 20 ] 潘继征, 熊 飞, 李文朝等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 681-686.
- [ 21 ] 刘丽萍. 滇池水华特征及成因分析. 环境科学研究, 1999, **12**(5): 36-37.
- [ 22 ] 王圣瑞, 金相灿, 庞 燕. 不同营养水平沉积物在不同 pH 下对磷酸盐的等温吸附特征. 环境科学研究, 2005, **18**(1): 53-57.
- [ 23 ] Carignan R, Vaithianathan P. Phosphorus availability in the Parana floodplain lakes ( Argentina ): influence of pH and phosphate buffering by fluvial sediments. *Limnology and Oceanography*, 1999, **44**(6): 1540-1548.
- [ 24 ] 金相灿, 储昭升, 杨 波等. 温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长、光合作用及浮力变化的影响. 环境科学学报, 2008, **28**(1): 50-55.