

## 洪泽湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征\*

齐凌艳<sup>1,2</sup>, 黄佳聪<sup>1</sup>, 高俊峰<sup>1\*\*</sup>, 黄琪<sup>1,2</sup>, 周毅<sup>3</sup>, 田威<sup>3</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 江苏省水文水资源勘测局, 南京 210029)

**摘要:** 叶绿素 a 浓度是衡量藻类生物量及评价水体营养状态的重要指标. 基于洪泽湖 2012 年 12 月至 2013 年 11 月的水质监测数据, 利用统计手段分析湖区叶绿素 a 浓度的时空变化规律, 并进一步探究叶绿素 a 浓度与各项水质理化因子的响应关系. 从时间维度上看, 洪泽湖叶绿素 a 浓度季节变化规律在不同湖区有所差异, 东部湖区叶绿素 a 浓度随季节变化曲线呈“双峰型”, 分别在 3 月和 8 月达到峰值. 北、西部湖区叶绿素 a 浓度在春季变化平缓, 并在秋季达到峰值. 从空间维度上看, 3 个湖区之间叶绿素 a 浓度在春、冬两季存在显著差异, 其余季节差异不显著. 典范对应分析表明洪泽湖不同月份、不同湖区叶绿素 a 浓度与水质理化因子之间存在不同的响应关系. 本研究为探究洪泽湖藻类时空异质性原因、宏观掌控其营养状态以及制定相应水质改善措施提供参考依据.

**关键词:** 叶绿素 a; 洪泽湖; 时空变化; 典范对应分析

## Spatial-temporal variation characteristics of chlorophyll-a concentration in Lake Hongze

QI Lingyan<sup>1,2</sup>, HUANG Jiacong<sup>1</sup>, GAO Junfeng<sup>1\*\*</sup>, HUANG Qi<sup>1,2</sup>, ZHOU Yi<sup>3</sup> & TIAN Wei<sup>3</sup>

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, P.R.China*)

**Abstract:** Chlorophyll-a concentration is usually measured to indicate algae biomass and to evaluate eutrophication level of freshwater lakes. Based on the water quality monitoring data from December 2012 to November 2013, this paper is aimed to analyze the spatial-temporal variation characteristic of chlorophyll-a concentration in Lake Hongze and further to explore the relationship of chlorophyll-a concentration and other water quality factors. Firstly, from the statistical charts of series chlorophyll-a concentration from eight water sampling sites, the seasonal variation curve of eastern zone showed a bimodal in about March and August. However, the seasonal variation curve of chlorophyll-a concentration in the northern zone and western zone were different. The tendency of chlorophyll-a concentration in above two zones kept steady in spring, decreased in middle of summer and then increased to the summit in about September. There were significant differences among three zones in spring and winter, meanwhile, the difference of chlorophyll-a concentration in other two seasons was not significant. In spring and winter, the chlorophyll-a concentration in eastern zone was apparently lower than that of the other two zones, which was mainly due to its high liquidity and the frequent movement of lake currents. Moreover, because of a large amount of nutrients from the surrounding farmland and fish pond injecting into the southern zone, the chlorophyll-a concentration in this zone was much higher than that of other zones. Finally, the canonical correspondence analysis between chlorophyll-a concentration and aquatic factors, including chemical oxygen demand, dissolved oxygen, total phosphorus, total nitrogen and temperature, was applied in the present research. The results revealed different response relationship existed in different months and locations. Therefore, reducing the polluted inflow from upstream, farm and fish pond was probably effective way to control algae biomass in Lake Hongze.

**Keywords:** Chlorophyll-a; Lake Hongze; spatial-temporal variation; canonical correspondence analysis

\* 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB417006)资助. 2015-03-05 收稿; 2015-09-01 收修改稿. 齐凌艳(1988~), 女, 博士研究生; E-mail: qly1107@126.com.

\*\* 通信作者; E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn.

随着经济发展与人类活动加剧,水体富营养化已成为世界性的水环境问题.近年来,世界各大淡水湖和我国滇池、太湖、巢湖等内陆淡水湖多次发生大规模蓝藻集聚现象,严重破坏水生生态系统稳定,威胁当地生活生产用水安全.叶绿素 a(Chl.a)是藻类进行光合作用的重要色素,其在水中的浓度通常用于表征水中藻类总体含量以及评判水体的营养状态<sup>[1]</sup>.

国内外已开展大量淡水湖泊 Chl.a 浓度时空动态变化相关研究. Ghadouani 等研究伊利湖的藻类和营养盐分布,表明 Chl.a 高浓度区主要集中于西部湖湾及北部沿岸地区,且与营养盐分布密切相关<sup>[2]</sup>. Jindal 等对 Prashar 湖藻类随时间动态变化过程进行连续观测,发现 Chl.a 浓度曲线呈双峰型特征,分别在 5 月和 9 月达到峰值<sup>[3]</sup>. Wu 等针对鄱阳湖藻类时空变化进行分析,得出结论:水下光照强度和透明度是限制藻类生长的关键因子,同时南部湖区 Chl.a 浓度高于北部湖区主要受水温和营养盐影响<sup>[4]</sup>. Yang 等对巢湖 Chl.a 浓度和总氮(TN)、总磷(TP)等营养盐浓度进行空间分布和季节性变化特征研究,总结出巢湖藻类生物量存在明显先下降后上升的季节变化特点,同时东、西部湖区存在明显空间差异,西部湖区营养盐及 Chl.a 浓度高于东部主要受上游汇水影响<sup>[5-6]</sup>. Wu 等通过对太湖短期连续观测表明,Chl.a 浓度水平分布模式与风生流关系紧密<sup>[7]</sup>. 钱昊钟等分析太湖湖心、东南湖区与其他湖区 Chl.a 浓度差异,得出 TP、水温和溶解氧是主要限制性因子<sup>[8]</sup>. 朱晶晶等发现滇池 Chl.a 浓度总体呈周期性波动缓慢上升趋势,4—11 月上升达到峰值;空间分布上,滇池 Chl.a 浓度高值区多出现在靠近城镇的人口密集区域<sup>[9-10]</sup>. Huang 等通过分析滇池水体富营养化与人类活动的响应关系,得出含高浓度营养盐的污水排放对滇池富营养化起到关键性作用<sup>[11]</sup>. 郭劲松等研究三峡小江回水区 Chl.a 浓度季节变化特征为夏、秋季高,春、冬季低<sup>[1,12]</sup>. Zhang 等研究三峡水库蓄水后大宁河的藻类季节变化特征,得出水温和 TN/TP 是藻类暴发的关键因素<sup>[13]</sup>. 分析水体 Chl.a 浓度时空变化特征有助于深化对藻类水华发生过程机理的认识,从而为有效开展藻类水华防控治理工作提供科学依据.

洪泽湖是苏北地区居民生活、农业用水、发电以及维护当地生境的重要水源地.同时作为南水北调东线工程重要输水线路和调蓄湖泊,其水质不仅关系到南水北调水质安全,也关系到沿河、沿湖乃至整个淮河流域经济可持续发展<sup>[14]</sup>.因此全面认识洪泽湖富营养化水平和藻类时空分布特征十分重要.但是目前研究较多围绕洪泽湖富营养化水平定性分析和水质理化因子时空特征分析<sup>[15-16]</sup>,Chl.a 浓度时空变化特征研究相对较少.本文基于洪泽湖全年水质监测数据,采用方差分析和典范对应分析等统计手段研究洪泽湖藻类时空变化特征,进一步探究其藻类时空异质性原因,为宏观掌控洪泽湖营养水平、制定水质改善措施提供科学依据<sup>[16]</sup>.

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域

洪泽湖地处淮河中游末端(33°06′~33°40′N,118°10′~118°52′E),为中国第四大淡水湖泊.湖区跨洪泽、淮阴、泗阳、泗洪和盱眙五县.东岸平直,其余岸线曲折多湾.湖区集水面积为 15.6×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,补给系数为 99.常年平均水位 12.37 m,长 65.0 km,最大宽 55.0 km,平均宽为 24.26 km,最大水深 4.37 m,平均水深 1.77 m.湖区属北亚热带与南温带的过渡气候,多年平均气温 16.3℃,7 月平均气温最高为 28.8℃.多年平均降水量 925.5 mm,年内 7—9 月降水量约占年降水量的 65.5%.湖水来源除大气降水外,主要依靠地表径流,入湖河流主要有 8 条(淮河、新汴河、老汴河、新濉河、老濉河、徐洪河、怀洪新河和安东河),其中淮河流量最大<sup>[17]</sup>.洪泽湖为吞吐型湖泊,换水周期约为 35 d<sup>[18]</sup>.湖流以吞吐流和风生流形式并存,在淮河入湖口水流以扇形扩散.

根据湖盆形态,生境差异,水文、水力特征以及出入湖河流特性等因素,本研究将洪泽湖湖区分为 3 个子区:北部湖区、东部湖区和西部湖区.北部湖区即成子湖区域,水体流动性差,并且受宿迁市城市尾水的影响,水质总体略差;西部湖区包括溧河洼区域,地势较高且水深较浅,水生植物分布面积相对较广,生长茂盛<sup>[19]</sup>,水质整体较好;东部湖区包括淮河入湖口、过水通道及蒋坝闸湾,湖区水体流动性好,湖流运动较为剧烈.根据上述湖区形态特征,本研究在全湖共布设 8 个水质监测站点.北部湖区设有颜圩、高湖 2 个监测点;西部湖区有临淮、洪泽湖区(宿迁南)2 个监测点;东部湖区布设洪泽湖区(淮安北)、洪泽湖区(淮安西)、洪泽湖区(淮安东)和洪泽湖区(淮安南)4 个监测点(图 1).

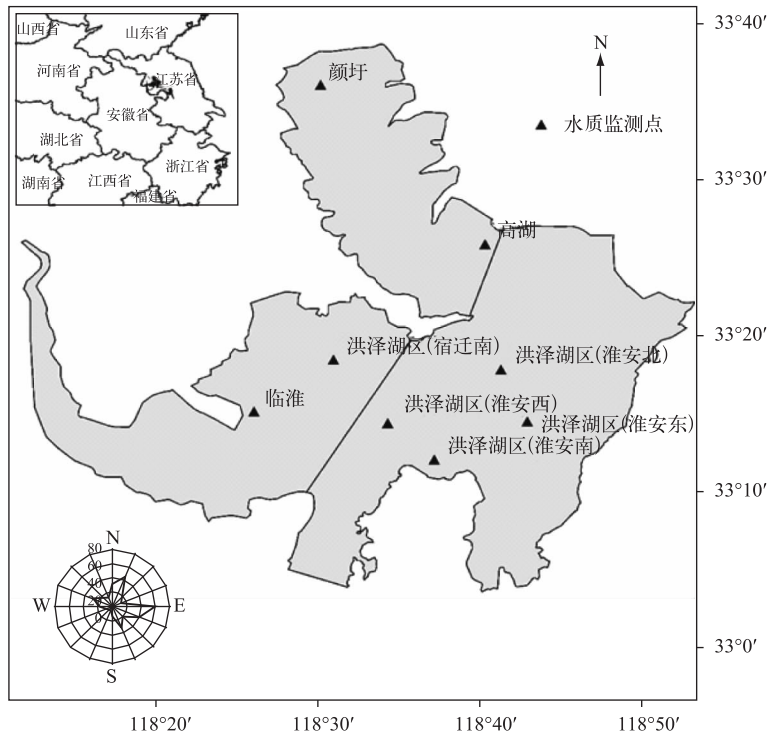


图 1 洪泽湖地理位置及水质监测点分布

Fig.1 Location of Lake Hongze and its water sampling sites

### 1.2 监测与调查方法

本研究选取 2012 年 12 月—2013 年 11 月采集的洪泽湖月水质监测数据样本,运用统计软件 IBM SPSS Statistic 19 和 Canoco for Windows 4.5 对数据进行统计分析.数据是由江苏省水文水资源勘测局提供的常规监测资料.监测项目包括 5 项:化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、TP、TN 和叶绿素 a(Chl.a)浓度.其中 COD 浓度用高锰酸盐指数法测定,DO 浓度用电化学探头法测定,TP 和 TN 浓度分别用钼酸铵分光光度法和碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,Chl.a 浓度用分光光度法测定.此外,日平均气温(T)数据来自国家气象中心的盱眙站(站点编号:58138).根据研究区全年气温变化规律和地处四季分明的温带地区,综合参考传统气候统计法,将研究区季节划分为:春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 至次年 2 月.

## 2 结果与分析

### 2.1 Chl.a 浓度的季节变化

洪泽湖 Chl.a 浓度的季节变化规律在不同湖区有所差异(图 2).北、西部湖区 Chl.a 浓度在冬末(1 月)出现明显的上升趋势,平均浓度达  $22.73 \pm 2.58 \mu\text{g/L}$ .进入春季(3—5 月),Chl.a 浓度稍有波动( $13.45 \pm 4.91 \mu\text{g/L}$ )后,变化趋于平缓( $17.95 \pm 4.94 \mu\text{g/L}$ ).春季湖区平均气温达到  $15.54^\circ\text{C}$ ,日光照时长为 6.45 h,光照气温条件适宜.同时春耕施肥等面源污染带来营养盐汇入,营养盐水平较高,水体中 TN 平均浓度为 1.35 mg/L,TP 平均浓度为 0.045 mg/L.藻类生理、生化活性恢复,生长速率加快,种群生物量快速增加后趋于稳定.夏季(6—8 月)洪泽湖区平均气温达到  $26.99^\circ\text{C}$ ,光照时长为 5.72 h.虽然光照充足、温度适宜,但大规模藻类生长为浮游动物及其他大型鱼类牧食提供便利,同时营养盐也被快速消耗,遏制藻类数目的进一步增加.造成不同站点 Chl.a 浓度先后回落至低浓度( $3.38 \pm 1.59 \mu\text{g/L}$ )后才逐步上升.进入秋季,藻类种间竞争得到缓解,优势种得以快速增殖,使 Chl.a 浓度在 9 月左右达到峰值( $36.28 \pm 45.92 \mu\text{g/L}$ ),其中颜圩站点浓

度高达  $104.9 \mu\text{g/L}$ . 随后 10—11 月 Chl.a 浓度受气温下降、光照减弱影响, 呈波动下降状态. 冬季湖区气温降至  $2.78^\circ\text{C}$ , 藻类代谢基本停止, 进入衰亡、休眠期<sup>[20]</sup>, 因此 Chl.a 浓度逐步下降至最低浓度 ( $1.55 \pm 1.98 \mu\text{g/L}$ ).

东部湖区 Chl.a 浓度季节变化曲线呈“双峰型”(图 2), 分别在 3 月和 8 月达到浓度峰值. 冬末春初(1—3 月)洪泽湖的适宜光照和温度以及较高营养盐水平(TN 浓度为  $4.30 \text{ mg/L}$ , TP 浓度为  $0.079 \text{ mg/L}$ )使得藻类快速从底泥中复苏, 进行大量增殖. Chl.a 浓度持续上升直至第 1 个峰值浓度 ( $13.45 \pm 4.89 \mu\text{g/L}$ ). 随后 Chl.a 浓度表现为迅速下降状态, 且至峰谷低浓度 ( $1.68 \pm 0.67 \mu\text{g/L}$ ). 研究表明在大型浅水湖泊中, 水动力对浮游生物的数量、分布影响十分明显. 如果水体滞留时间变长、流速变缓, 浮游植物拥有更长时间生长, 在适宜的营养条件下数量往往会显著增长<sup>[21]</sup>. 但由于东区包含过水通道, 水体流动性大且流速快. 藻类受水流冲刷, 不容易集聚, 造成 Chl.a 浓度曲线的下降. 夏季(6—8 月)藻类在充足光照下达到最大光合效率, 藻类生物量成倍增加, 使得 Chl.a 浓度再次上升并于 8 月达到第 2 个浓度峰值 ( $25.18 \pm 13.45 \mu\text{g/L}$ ). 秋季(9—11 月)光照减弱且温度持续下降使 Chl.a 浓度上下波动且总体呈下降趋势. 冬季(12 月)伴随着藻类大量休眠死亡、群落解体, Chl.a 浓度下降为最低值 ( $1.15 \pm 0.69 \mu\text{g/L}$ ).

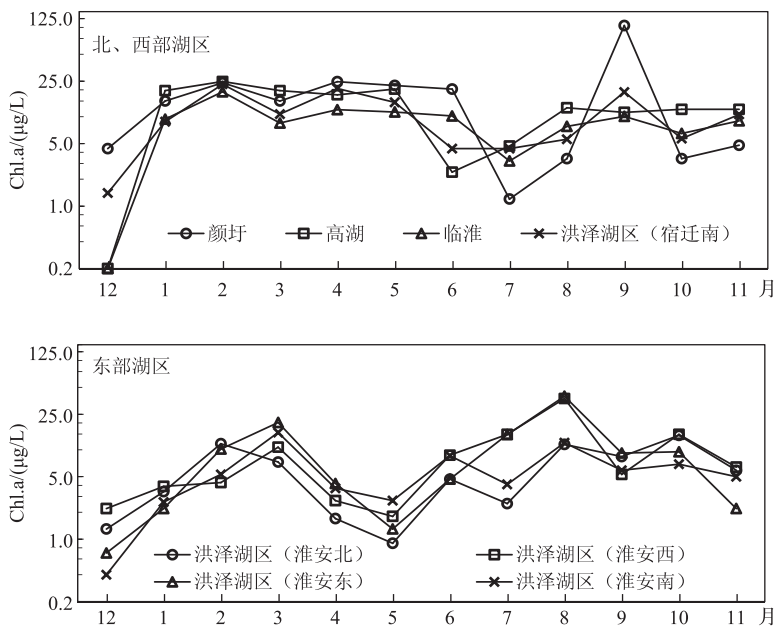


图 2 洪泽湖湖区 Chl.a 浓度的季节变化曲线

Fig.2 Seasonal variation of Chl.a concentrations in northern, western and eastern zones in Lake Hongze

## 2.2 Chl.a 浓度的空间变化

洪泽湖全年 Chl.a 浓度均值表现为北部湖区 ( $18.50 \pm 21.26 \mu\text{g/L}$ ) > 西部湖区 ( $9.8 \pm 5.94 \mu\text{g/L}$ ) > 东部湖区 ( $7.68 \pm 7.96 \mu\text{g/L}$ ). 单因素方差分析 (ANOVA, 表 1) 结果显示 3 个湖区的 Chl.a 浓度之间在春季存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其余季节差异不显著.

春季和冬季东部湖区 Chl.a 浓度显著低于北、西部湖区(图 3), 春季浓度均值为北部湖区 ( $19.95 \pm 3.13 \mu\text{g/L}$ ) > 西部湖区 ( $12.95 \pm 3.85 \mu\text{g/L}$ ) > 东部湖区 ( $6.06 \pm 6.00 \mu\text{g/L}$ ). 冬季浓度均值为北部湖区 ( $14.66 \pm 9.39 \mu\text{g/L}$ ) > 西部湖区 ( $10.32 \pm 8.40 \mu\text{g/L}$ ) > 东部湖区 ( $4.02 \pm 3.41 \mu\text{g/L}$ ). 3 个湖区的温度和光照等气象条件相近, 但是营养盐水平有所不同. 东部湖区的 TN 和 TP 浓度均高于北、西部湖区(图 4), 表明营养盐不是春季和冬季东部湖区 Chl.a 浓度的限制因子. 东部湖区 Chl.a 在春、冬季浓度较低很有可能是由于其过水通道特性, 流动性较好. 研究表明流速可能对着生藻类生物量具有显著影响, 较大流速环境不适合着生藻类的生长<sup>[22]</sup>. 当流速过大时, 水流的冲刷作用使藻类的生长、繁殖环境受到破坏, 藻类的增长和聚集受到有效抑

表 1 洪泽湖不同湖区 Chl.a 浓度单因素方差分析

Tab.1 Results of ANOVA based on Chl.a concentration of different zones in Lake Hongze

季节	ANOVA		Chl.a/( $\mu\text{g/L}$ )		营养状态
	F	P	均值	变化范围	
春季	14.32	<b>0.000</b>	11.26 $\pm$ 7.73	0.9~24.7	富营养型
夏季	1.174	0.328	9.75 $\pm$ 10.00	1.2~39.7	富营养型
秋季	3.296	0.057	14.44 $\pm$ 21.21	2.2~104.9	富营养型
冬季	4.689	<b>0.021</b>	8.25 $\pm$ 8.29	0.2~24.8	富营养型

制<sup>[23-24]</sup>. 北、西部湖区相对封闭, 湖流运动相对较弱, 藻类较容易进行快速繁殖. 同时西、北部湖区周围农耕渔业比东部湖区发达, 虽然营养盐浓度低于东区, 但是足够为藻类提供生长物质基础, 加之适宜的光照温度, 藻类生物量可以稳定上升.

夏季和秋季 3 个湖区之间 Chl.a 浓度无显著差异(图 3), 夏季浓度均值表现为东部湖区(13.64 $\pm$ 11.84  $\mu\text{g/L}$ )>北部湖区(7.45 $\pm$ 6.86  $\mu\text{g/L}$ )>西部湖区(5.93 $\pm$ 2.37  $\mu\text{g/L}$ ). 根据 Chl.a 浓度季节变化规律可知, 东部湖区由于春季藻类生物量下降, 种内竞争大大减弱, 造成在夏季藻类快速增长, 而北、西部湖区在夏季则是由于种内、种间竞争加剧造成生物量下降. 两者比较, 东部湖区 Chl.a 浓度高于其他 2 个湖区. 秋季洪泽湖 Chl.a 浓度均值表现为北部湖区(29.75 $\pm$ 40.85  $\mu\text{g/L}$ )>西部湖区(10.04 $\pm$ 4.72  $\mu\text{g/L}$ )>东部湖区(7.84 $\pm$ 3.60  $\mu\text{g/L}$ ). 北部湖区 Chl.a 浓度远高于其他两个湖区, 其中颜圩站点在 9 月和 11 月分别出现 Chl.a 浓度极大值(104.9 和 48  $\mu\text{g/L}$ ). 北部湖区由于引水条件较好以及水草丰富, 水产养殖业迅猛发展, 沿岸多为人工开挖鱼塘和围网养蟹池<sup>[14,25]</sup>, 造成该区水污染严重, 同时雨水冲刷引发农业和养殖业面源污染, 造成水质富营养化水平较高(图 4). TN 和 TP 浓度分别达到 1.76 $\pm$ 1.66 和 0.14 $\pm$ 0.12 mg/L. 丰富的营养盐条件促使藻类大规模生长暴发, 造成北部湖区局部 Chl.a 浓度较高.

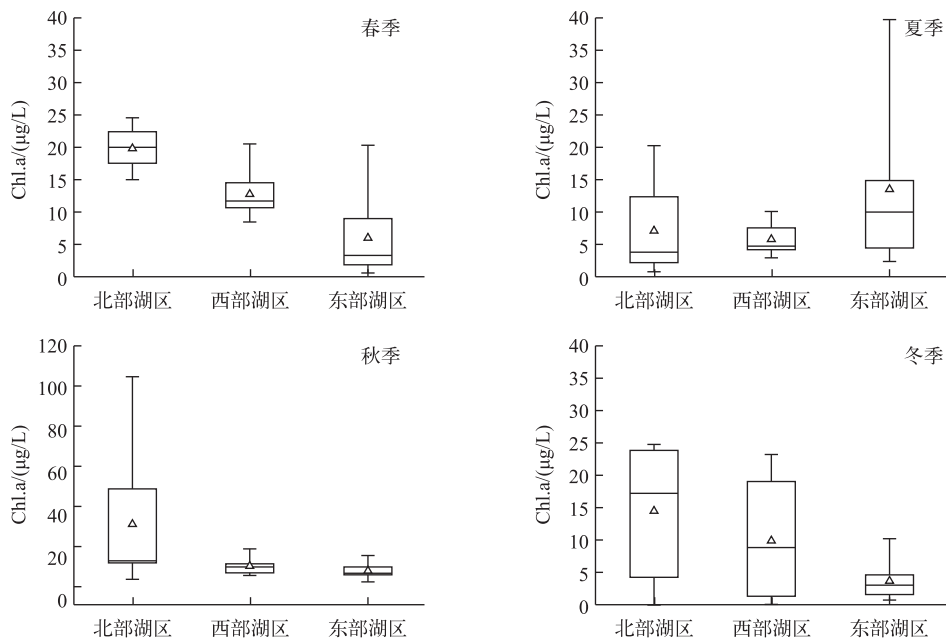


图 3 洪泽湖不同湖区水体 Chl.a 浓度的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of Chl.a concentrations of waters in different zones of Lake Hongze

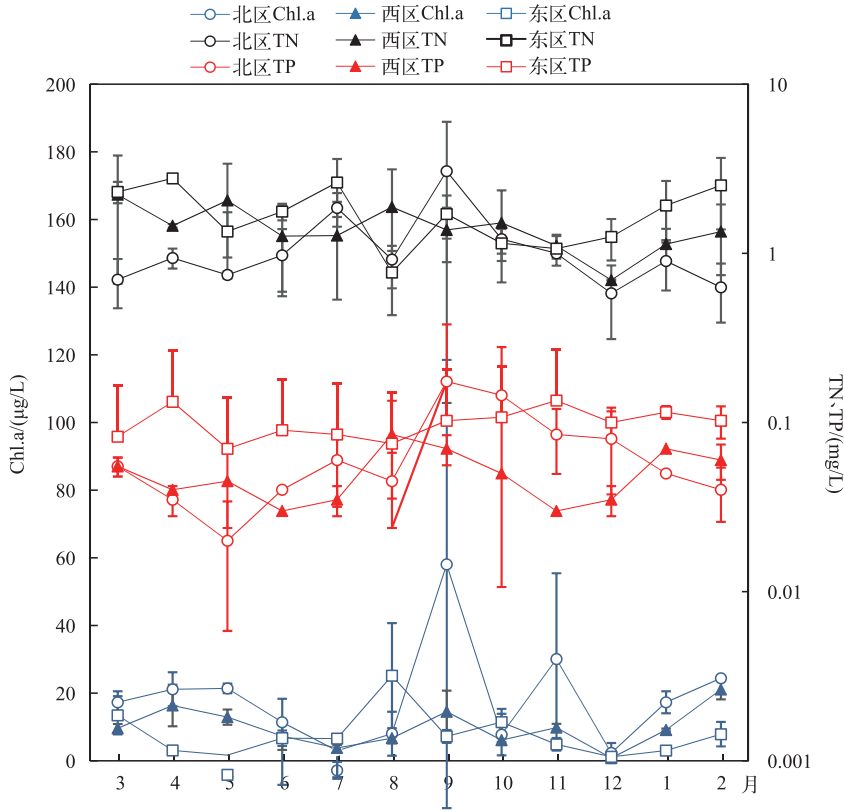


图 4 洪泽湖不同湖区 TN、TP 及 Chl.a 浓度的变化

Fig.4 Changes of TN, TP and Chl.a concentrations in different zones of Lake Hongze

2.3 Chl.a 浓度与水质理化因子的 CCA 分析

典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 提供了分析浮游植物群落与环境因子之间对应关系的工具<sup>[26]</sup>. 本研究进行全年月份和湖区站点 Chl.a 浓度与水质理化因子 (化学需氧量、溶解氧、TP、TN、温度) 之间的 CCA 分析, 结果表明, 两种 CCA 分析的轴 1 特征值均大于其余轴. 从浮游植物与环境因子之间的相关系数中, 可以看到与轴 1 和轴 2 的相关性都较高 (表 2).

表 2 洪泽湖 Chl.a 浓度与理化因子 CCA 分析的统计信息

Tab.2 Summary statistics for the first two axes of CCA performed between Chl.a concentration and water quality factors in Lake Hongze

分析对象	轴 1		轴 2	
	月份 CCA 分析	站点 CCA 分析	月份 CCA 分析	站点 CCA 分析
特征值	0.277	0.255	0.093	0.062
浮游植物与环境因子相关性	0.999	0.959	0.991	0.818
浮游植物与环境因子方差累积百分数	69.1	73.9	92.1	91.9

洪泽湖 12 个月的 Chl.a 浓度都分布在水轴 1 和水轴 2 构成的 4 个象限内, 这 4 个象限基本把研究区 4 个季节的 Chl.a 浓度分隔开. 第 1 象限内分布春初 (3 月) 和秋季中旬 (10 月) 的 Chl.a 浓度, 与 TN 浓度表现为正相关; 第 2 象限分布冬季 (1, 2 月) 和春季 (4, 5 月) 的 Chl.a 浓度, 与 TN/TP 表现出正相关; 第 3 象限分布秋季 (9, 11 月) 的 Chl.a 浓度, 与 COD 表现出负相关; 第 4 象限分布夏季 (6, 7, 8 月) 的 Chl.a 浓度与 TN、TP

浓度表现出不同程度的正相关(图 5). 以上结果证明,除秋季外,其余季节 Chl.a 浓度均受不同程度的营养盐浓度影响. 氮、磷营养盐是藻类生长不可或缺的元素,同时一定程度上,温度升高能显著促进藻类对营养盐的吸收利用<sup>[27]</sup>,因此夏季 Chl.a 浓度表现为与 TN 浓度呈正相关. 春、冬两季大多数月份 Chl.a 浓度与 TN/TP 呈正相关,研究表明 TN/TP 对藻类的爆发性生长具有重要意义,是水中浮游植物营养结构特点的重要反映<sup>[28]</sup>.

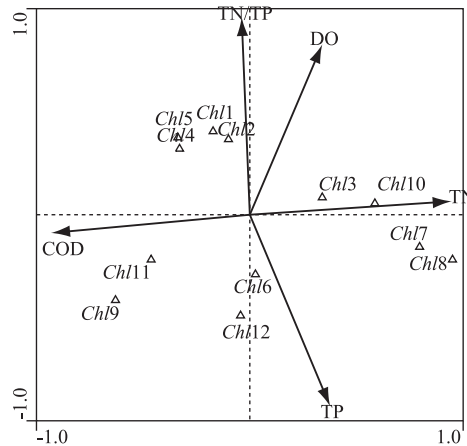


图 5 洪泽湖水质理化因子与月际 Chl.a 浓度的 CCA 分析结果 (Chl1~Chl12 分别代表 1—12 月的 Chl.a 浓度)

Fig.5 Results of canonical correspondence analysis between water quality parameters and monthly chlorophyll-a concentration in Lake Hongze

洪泽湖 3 个湖区的站点可以较好地根据象限区分开,东部湖区站点(洪泽湖区(淮安北)、洪泽湖区(淮安西)、洪泽湖区(淮安东)、洪泽湖区(淮安南))位于轴 1 右侧,与温度、DO 分别呈正、负相关关系(图 6). 通常情况下温度上升可以促进藻类生长繁殖. 但温度是影响水体 DO 的关键因素,非夏季月份,温度的升高导致 DO 浓度降低<sup>[29]</sup>,因此两者呈负相关. 此外东区是过水通道,湖流运动相对剧烈,一定程度上影响 DO 浓度,因而东部湖区 Chl.a 浓度受温度和 DO 影响. 北部湖区(颜圩)Chl.a 浓度主要受营养盐浓度影响,受 DO 浓度等因子影响较弱,主要是由于北部湖区相对封闭,且周围养殖、农耕地相对发达,外源营养盐的排入对北区 Chl.a 浓度产生重大影响. 西部湖区同时受 TN 和 DO 浓度的影响,西部湖区周边也进行了一定程度开发,人工投饵与施肥等均会对该区营养盐状况产生影响. 同时,淮河从西区老子山附近入湖,湖流运动也会对该区藻类生长造成影响.

### 3 结论与讨论

选取洪泽湖 2012 年 12 月至 2013 年 11 月水质监测数据,通过方差分析和 CCA 统计分析归纳总结洪泽湖 Chl.a 浓度时空变化规律,并进一步探究其原因. 从时间维度上看,洪泽湖 Chl.a 浓度季节变化规律在不同湖区有所差异. 东部湖区 Chl.a 浓度随季节变化曲线呈“双峰型”,北、西部湖区 Chl.a 浓度在春季保持平缓,夏季有所回落上升,在秋季达到峰值. 从空间维度上看,3 个湖区的 Chl.a 浓度变化在春、冬季均存在显著差异( $P < 0.05$ ),其余季节差异不显著. 全年月份和湖区站点 Chl.a 浓度与水质理化因子(COD、DO、TP、TN、温度)之间的 CCA 分析(图 6)显示,不同月份和不同湖区 Chl.a 浓度与水质理化因子之间存在不同的响应关系. 从以上结论可以看出:

- 1) 洪泽湖是典型的过水性湖泊,东区包含过水通道,湖流运动较为剧烈,对藻类生长起到一定的抑制作用.
- 2) 洪泽湖北区营养盐水平和 Chl.a 浓度较高,多是由于上游城市汇水以及周围水产养殖、农耕地带来

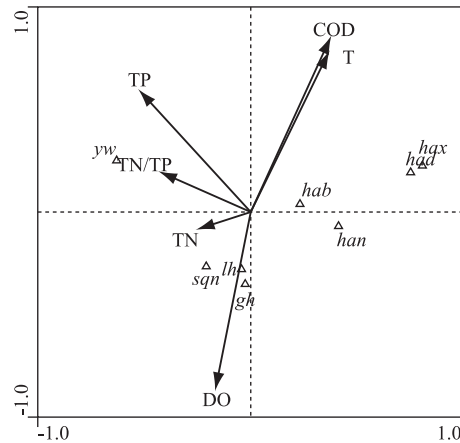


图 6 洪泽湖水水质理化因子与各站点 Chl.a 浓度的 CCA 分析结果  
(*yw*: 颜圩; *gh*: 高湖; *lh*: 临淮; *sqn*: 洪泽湖区(宿迁南); *hab*: 洪泽湖区(淮安北);  
*hax*: 洪泽湖区(淮安西); *had*: 洪泽湖区(淮安东); *han*: 洪泽湖区(淮安南))

Fig.6 Results of canonical correspondence analysis between water quality parameters and chlorophyll-a concentration in each water sampling site of Lake Hongze

的过剩营养盐. 丰富的营养盐为藻类大量繁殖提供物质基础, 因而造成北部湖区较为严重的水质污染.

3) 在洪泽湖藻类防控治理方面, 应该充分考虑上游污水的截留减排以及控制周围农业、渔业的投饵施肥量, 以降低湖区营养盐浓度, 有效控制藻类生物量.

致谢: 感谢国家气象中心提供建模气象数据.

#### 4 参考文献

- [ 1 ] 郭劲松, 陈园, 李哲等. 三峡小江回水区叶绿素 a 季节变化及其同主要藻类的相互关系. 环境科学, 2011, 32(4): 976-981.
- [ 2 ] Ghadouani A, Smith REH. Phytoplankton distribution in Lake Erie as assessed by a new in situ spectrofluorometric technique. *Great Lakes Research*, 2005, 31(2): 154-167.
- [ 3 ] Jindal R, Thakur RK, Ahluwalia AS. Ahluwalia phytoplankton dynamics and water quality of Prashar Lake, Himachal Pradesh, India. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 2014, 3/4: 101-113.
- [ 4 ] Wu Z, Cai Y, Liu X *et al.* Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39(3): 476-483.
- [ 5 ] Yang L, Lei K, Meng W *et al.* Temporal and spatial changes in nutrients and chlorophyll-a in a shallow lake, Lake Chaohu, China: An 11-year investigation. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(6): 1117-1123.
- [ 6 ] 姜霞, 王书航, 钟立香等. 巢湖藻类生物量季节性变化特征. 环境科学, 2010, 31(9): 2056-2062.
- [ 7 ] Wu X, Kong F, Chen Y *et al.* Horizontal distribution and transport processes of bloom-forming *Microcystis* in a large shallow lake (Taihu, China). *Limnological-Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, 40(1): 8-15.
- [ 8 ] 钱昊钟, 赵巧华, 钱培东等. 太湖叶绿素 a 浓度分布的时空特征及其影响因素. 环境化学, 2013, 32(5): 789-796.
- [ 9 ] 朱晶晶, 陈晋, 王胜强等. 基于 MERIS 数据的滇池叶绿素浓度时空变化(2003-2009 年)及趋势. 湖泊科学, 2011, 23(4): 581-590. DOI 10.18307/2011.0414.
- [ 10 ] 陈永川, 汤丽, 张德刚等. 滇池叶绿素 a 的时空变化及水体磷对藻类生长的影响. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1555-1560.
- [ 11 ] Huang C, Wang X, Yang H *et al.* Satellite data regarding the eutrophication response to human activities in the plateau lake Dianchi in China from 1974 to 2009. *Science of the Total Environment*, 2014, 485/486(1): 1-11.
- [ 12 ] 张晟, 李崇明, 郑坚等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化. 环境科学, 2009, 30(1): 64-69.



- [13] Zhang JL, Zheng BH, Liu LS *et al.* Seasonal variation of phytoplankton in the DaNing River and its relationships with environmental factors after impounding of the Three Gorges Reservoir: A four-year study. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, (2): 1479-1490.
- [14] 范亚民, 何华春, 崔云霞等. 淮河中下游洪泽湖水域动态变化研究. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(12): 1397-1403.
- [15] 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): 259-265. DOI 10.18307/2002.0311.
- [16] 李为, 都雪, 林明利等. 基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水质时空变化特征分析. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(12): 1593-1599.
- [17] 高俊峰. 中国五大淡水湖保护与发展. 北京: 科学出版社, 2012: 39-220.
- [18] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 268-269.
- [19] 张圣照. 洪泽湖水生植被. *湖泊科学*, 1992, **4**(1): 63-70. DOI 10.18307/1992.0108.
- [20] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. *生态学报*, 2005, **25**(3): 589-595.
- [21] 吴晓辉. 水动力条件对藻类影响的研究进展. *生态环境学报*, 2010, **19**(7): 1732-1738.
- [22] 吴述园, 葛继稳, 苗文杰等. 三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素. *生态学报*, 2013, **33**(21): 7023-7034.
- [23] 张毅敏, 张永春, 张龙江等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响. *中国环境科学*, 2007, **27**(5): 707-711.
- [24] Reynolds CS. *The ecology of freshwater phytoplankton*. London: Cambridge University Press, 1984: 132-133.
- [25] 阮仁宗, 夏双, 陈远等. 1979~2006 年洪泽湖西岸临淮镇附近湖泊变化研究. *湿地科学*, 2012, **10**: 344-349.
- [26] 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, **26**(7): 2355-2364.
- [27] 吴攀, 邓建明, 秦伯强等. 水温和营养盐增加对太湖冬、春季节藻类生长的影响. *环境科学研究*, 2013, **26**(10): 1064-1071.
- [28] Li Z, Guo JS, Fang F *et al.* Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(4): 509-517.
- [29] 曾春芬, 黄文钰, 王伟霞等. 天目湖溶解氧分布特征及环境影响因子. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(4): 445-451.