

## 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系\*

王震<sup>1</sup>, 邹华<sup>1\*\*</sup>, 杨桂军<sup>1</sup>, 张虎军<sup>2</sup>, 庄严<sup>2</sup>

(1: 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

(2: 无锡市环境监测中心站, 无锡 214023)

**摘要:** 2012年3月至2013年2月逐月对太湖水体叶绿素 a 含量、主要环境因子及不同门类浮游植物密度进行测定, 分析太湖叶绿素 a 含量和不同门类浮游植物密度的时空分布特征, 探讨太湖叶绿素 a 含量和环境因子与不同门类浮游植物密度之间的相关关系并建立逐步回归方程。结果表明: 太湖叶绿素 a 含量全年平均值为  $22.33 \pm 37.65 \text{ mg/m}^3$ , 变幅为  $0.48 \sim 347.85 \text{ mg/m}^3$ ; 叶绿素 a 含量随季节变化明显, 夏季最高、秋冬季次之、春季最低; 在空间分布上, 太湖北部和西北部最高, 东部和南部最低。蓝藻门、隐藻门、硅藻门、绿藻门密度随时间呈峰型变化, 均在 10 月份达到最大值, 黄藻门、金藻门和裸藻门密度的变化趋势呈“V”型, 在春、冬两季出现较大值; 不同门类浮游植物密度基本在西北区出现最大值。全湖叶绿素 a 含量的显著影响因子有总有机碳、亚硝态氮、溶解氧、pH、水温和磷酸盐;  $\lg(Y_{\text{Chl.a}})$  与  $\lg(X_{\text{TN}})$  呈显著负相关, 与  $\lg(X_{\text{TP}})$  呈极显著正相关, 与  $\lg(X_{\text{N/P}})$  呈极显著负相关。太湖叶绿素 a 含量与蓝藻门、隐藻门、裸藻门与甲藻门密度有显著相关关系。

**关键词:** 太湖; 叶绿素 a; 时空分布; 浮游植物; 相关性

## Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a and its relationship with environmental factors in Lake Taihu

WANG Zhen<sup>1</sup>, ZOU Hua<sup>1</sup>, YANG Guijun<sup>1</sup>, ZHANG Hujun<sup>2</sup> & ZHUANG Yan<sup>2</sup>

(1: School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, P. R. China)

(2: Wuxi Environmental Monitoring Central Station, Wuxi 214023, P. R. China)

**Abstract:** The spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a concentration and different phytoplankton densities were analyzed in this paper, respectively, based on the monthly monitoring data in Lake Taihu from March 2012 to February 2013. The correlation and stepwise multiple regression equations between chlorophyll-a, some key environmental factors and different phytoplankton densities were also studied. The results showed that the annual average of chlorophyll-a concentration in Lake Taihu was  $22.33 \pm 37.65 \text{ mg/m}^3$ , ranging from  $0.48$  to  $347.85 \text{ mg/m}^3$ . There was an obvious temporal and spatial variation of chlorophyll-a concentration and phytoplankton density. The highest average concentration of chlorophyll-a occurred in summer, while the lowest in spring; the average concentration of chlorophyll-a was much higher at the north and northwest of Lake Taihu than that at the east and south. Cyanophyta, Cryptophyta, Bacillariophyta and Chlorophyta densities changed as peak type, reaching a maximum in October. Xanthophyta, Chrysophyta and Euglenophyta densities changed in a V-type trend, reaching a maximum in spring or winter. The maximum of different phytoplankton densities almost all appeared in northwest region. Significant correlations were found between chlorophyll-a concentration and pH, dissolved oxygen, water temperature, nitrite, phosphate, total organic carbon.  $\lg(Y_{\text{Chl.a}})$  is negative correlated with  $\lg(X_{\text{TN}})$ , significantly positive with  $\lg(X_{\text{TP}})$  and significantly negative with  $\lg(X_{\text{N/P}})$ , respectively. Significant correlations were found between chlorophyll-a concentration and Cyanophyta, Cryptophyta, Euglenophyta and Pyrrophyta densities.

**Keywords:** Lake Taihu; chlorophyll-a; spatial and temporal distribution; phytoplankton; correlation

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07503-002-01)资助。2013-07-22 收稿; 2013-11-06 收修改稿。王震(1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: wzh.wz8@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: zouhua@jiangnan.edu.cn.

湖泊的富营养化问题是当前我国乃至全世界所面临的最主要的水环境问题之一. 太湖<sup>[1]</sup>、巢湖<sup>[2]</sup>、滇池<sup>[3]</sup>等高度富营养化的湖泊经常会暴发蓝藻水华, 其中太湖北部湖湾曾在 2007 年暴发大规模蓝藻水华, 引发了无锡市饮用水供水危机, 这引起了广大专家学者对太湖水环境问题的高度重视. 叶绿素是浮游植物的重要成分, 其中 Chl. a 是所有浮游植物门类都含有的叶绿素类型. Chl. a 不仅作为水体营养状态划分的重要指标<sup>[4]</sup>, 而且可用于表征浮游植物的现存量<sup>[5]</sup>. 因此, Chl. a 是湖泊富营养化调查的一个重要参数, 并且在水体富营养状况评价中起关键性作用<sup>[6]</sup>. 开展 Chl. a 的监测, 了解 Chl. a 的时空变化特征, 对于了解太湖水环境质量现状及演变趋势具有重要意义.

近年来国内外许多学者对湖泊中 Chl. a 的分布及其与各种环境因子的相关性开展了深入的研究, 得到的结果不尽相同<sup>[7-10]</sup>. 虽然大多数研究认为 Chl. a (或其对数) 主要与总磷 (或其对数) 呈线性相关, 但也有不少报道认为两者呈其他回归关系<sup>[11-13]</sup>. 此外, 研究者也注意到了 Chl. a 与其他环境因子的相关性, 如: 毕京博等<sup>[14]</sup>在南太湖入湖口研究了 Chl. a 与水温、pH、高锰酸盐指数、氨氮、溶解氧的关系, Wang 等<sup>[15]</sup>在太湖梅梁湾研究了浮游植物生物量与水温、pH、生化需氧量、透明度、溶解氧的相关关系.

太湖是我国第三大淡水湖, 各湖区地理环境、生态水质不尽相同, 目前的研究多着眼于水华严重的区域或河口. 本研究在全湖范围进行 Chl. a 的调查分析, 通过 2012 年 3 月至 2013 年 2 月间在太湖 34 个监测点进行 12 次野外定点水质、生态调查, 分析了全湖范围 Chl. a 含量与浮游植物密度的时空分布特征, 比较了不同区域的 Chl. a 与浮游植物水平, 探讨了 Chl. a 含量与不同环境因子、浮游植物密度之间的相关关系, 进一步揭示了不同门类浮游植物对 Chl. a 的贡献程度, 可为更好地进行水质预测预警奠定基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点布置及采样方法

本研究依据太湖地理地形、水动力特征以及近年水质变化规律, 对太湖水体进行了分区研究, 把太湖分为 6 大区域 (图 1), 分别为梅梁湾、贡湖、湖东区、西南区、湖心区和西北区. 采样点布设主要考虑饮用水源取水口和国家常规控制点位设置, 各分区的采样点均为 3 个以上, 能较好地反映作为饮用水源地的太湖 Chl. a 的空间分布差异, 共设置 34 个采样点 (图 1). 采样时间基本为每月月初 (除 8 月份受台风影响, 月中采样), 各点位采样顺序一致, 其中, 春季: 2012 年 3-5 月; 夏季: 2012 年 6-8 月; 秋季: 2012 年 9-11 月; 冬季:

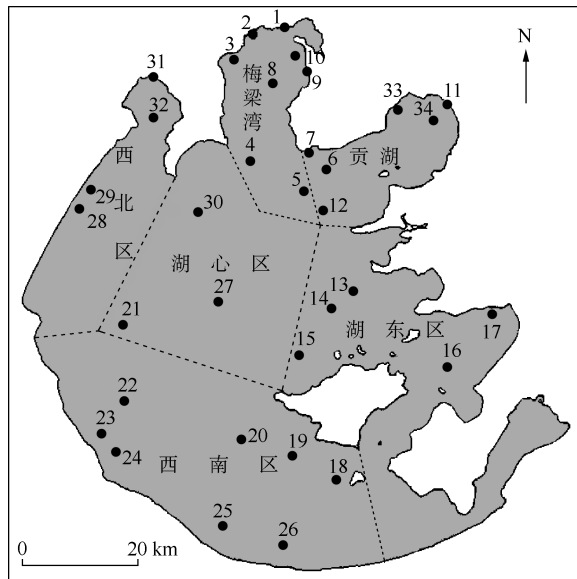


图 1 太湖分区及监测点分布

Fig. 1 Subareas of Lake Taihu and location of field observation sites

2012年12月—2013年2月.用上、下底均有阀门的5 L有机玻璃采水器分别采集离表层0.5 m和离水底0.5 m的混合水样;采集的水样24 h内进行各指标的测定.用采水器采集1 L水样,并用10 ml鲁哥试剂固定,用于不同门类藻类的鉴定.其中透明度(SD)采用赛氏圆盘法现场测定,水温(WT)、pH、溶解氧(DO)均采用多参数水质监测仪 YSI-6600 现场测定.

### 1.2 样品测定方法

采集的水样分析指标主要有:叶绿素 a (Chl. a),亚硝态氮( $\text{NO}_2^-$ -N)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、总氮(TN)、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )、总磷(TP)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总有机碳(TOC). Chl. a 含量的测定采用丙酮萃取分光光度法<sup>[16]</sup>.  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 采用酸性高锰酸钾法测定. TOC 含量采用差减法测定.  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、TP 含量均使用 Auto Analyzer 3 (AA3) 连续流动分析仪进行测定. 测定浮游植物的水样经48 h静置沉淀后,利用虹吸法轻轻吸掉上清液,浓缩至50 ml. 不同门类的藻类鉴定参照文献<sup>[17]</sup>.

### 1.3 统计方法

数据统计分析和做图使用 Excel 软件、Origin 8.0 软件和 SPSS 20.0 软件. 多元回归方程的建立一方面要满足统计学的要求,另一方面也要考虑研究的实际情况. 因此,建立 Chl. a 与水质因子逐步回归方程时,按照如下原则选择用于回归的水质因子:(1) 方程方差分析  $F$  值的显著水平  $P$  应小于 0.05, 否则建立的方程不能使用;(2) 自变量与因变量之间因果关系明确,自变量之间独立性较强.

## 2 结果与分析

### 2.1 Chl. a 含量及浮游植物密度的时空分布特征

2.1.1 Chl. a 含量的时空分布特征 2012年3月至2013年2月期间,太湖34个监测点 Chl. a 含量全年平均值为  $22.33 \pm 37.65 \text{ mg/m}^3$ , 变幅为  $0.48 \sim 347.85 \text{ mg/m}^3$ . 各湖区 Chl. a 含量年度变化比较明显,3—6月处于较低水平,7—10月出现峰值,总体呈现夏季最高、秋冬季次之、春季最低的规律(图2).

在空间分布上,全太湖及不同湖区 Chl. a 含量的年均值和变幅如表1所示,呈现的规律为:西北区 > 梅梁湾 > 湖心区 > 西南区 > 湖东区.

2.1.2 不同门类浮游植物密度的时空分布特征 太湖浮游植物主要包括蓝藻、隐藻、硅藻、绿藻、黄藻、金藻、裸藻和甲藻8个门类. 其中,蓝藻门、隐藻门、硅藻门、绿藻门密度随时间呈峰型变化,且变化趋势一致,均在10月份达到最大值. 黄藻门、金藻门和裸藻门密度的变化趋势呈“V”型,在春、冬两季出现较大值;而甲藻门密度随时间呈锯齿状下降趋势(图3).

太湖各湖区浮游植物密度最高值出现在西北区,为  $69.70 \times 10^6 \pm 149.78 \times 10^6 \text{ cells/L}$ , 变幅为  $0.47 \times 10^6 \sim 523.67 \times 10^6 \text{ cells/L}$ ;最低值出现在湖东区,为  $14.77 \times 10^6 \pm 20.04 \times 10^6 \text{ cells/L}$ , 变幅为  $0.37 \times 10^6 \sim 62.00 \times 10^6 \text{ cells/L}$ . 除了金藻门在西北区未能检出,不同门类的浮游植物全年在不同湖区均能检出. 蓝藻门密度在不同湖区大小顺序为:西北区 > 梅梁湾 > 湖心区 > 西南区 > 贡湖 > 湖东区,隐藻门、硅藻门、绿藻门和甲藻门密度均在西北区出现最大值,金藻门、裸藻门和黄藻门密度分别在贡湖、西南区和梅梁湾出现最高值. 其中,蓝藻门密度在浮游植物总密度中占有最大的比例,在95%以上. 从总体上看,太湖不同湖区浮游植物密度呈现西北部最高、东部最低的规律(图4).

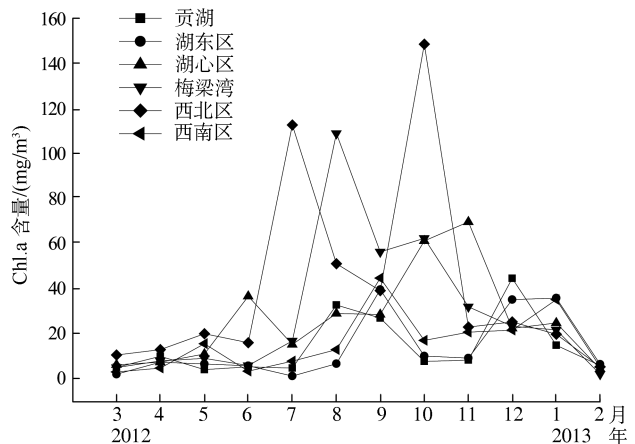


图2 太湖各湖区 Chl. a 含量的时空变化  
Fig. 2 Temporal and spatial variation of Chl. a concentration in each region of Lake Taihu

表 1 全太湖及各湖区 Chl. a 含量的年均值和变幅\*

Tab. 1 The average annual concentration and range of chlorophyll-a in Lake Taihu

分区	年均值/(mg/m <sup>3</sup> )	变幅/(mg/m <sup>3</sup> )
全湖	22.33 ± 37.65	0.48 ~ 347.85
贡湖	15.05 ± 26.17	1.75 ~ 188.69
湖东区	13.79 ± 18.32	0.48 ~ 78.78
湖心区	26.90 ± 34.87	4.23 ~ 151.10
梅梁湾	27.87 ± 47.43	1.64 ~ 269.01
西北区	43.99 ± 62.73	2.99 ~ 347.85
西南区	16.30 ± 22.68	0.53 ~ 175.28

\* 年均值数据表示为平均值 ± 标准差,且年均值为不同湖区所有点位的平均值.

### 2.2 Chl. a 含量与环境因子的相关性分析

2.2.1 Chl. a 含量与环境因子的逐步回归分析 依据上述筛选条件,应用 SPSS 软件的逐步回归分析方法建立相应的多元线性回归方程.结果表明,不同湖区筛选出的对 Chl. a 含量有显著影响的水质因子各不相同.梅梁湾 TOC 与 N/P 对 Chl. a 含量有显著影响,贡湖 TP 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 对 Chl. a 含量有较大影响,湖东区、西南区、湖心区与西北区分别为 TOC、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN 和 pH 对 Chl. a 含量有显著影响.在全湖对 Chl. a 含量有显著影响的因子有 TOC、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、DO、pH、WT 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (表 2).

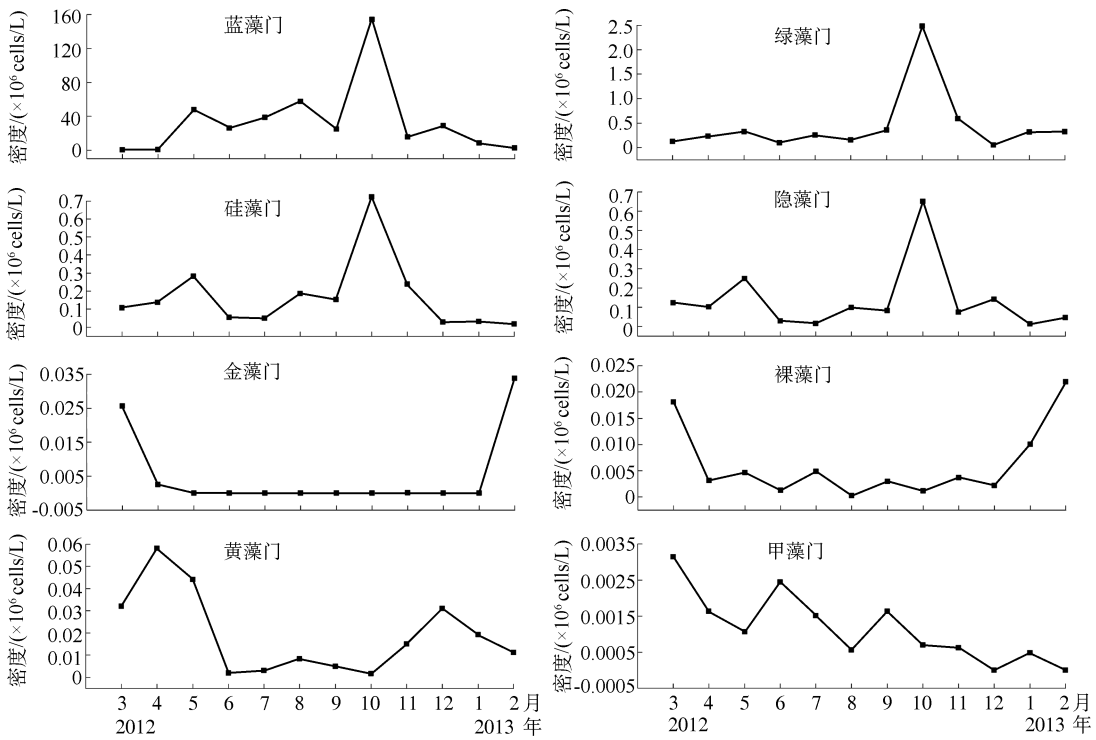


图 3 太湖不同门类浮游植物密度的时间分布

Fig. 3 Temporal distribution of different phytoplankton phyla densities in Lake Taihu

2.2.2 lg(Y<sub>Chl.a</sub>) 与 lg(X<sub>TN</sub>)、lg(X<sub>TP</sub>) 及 lg(X<sub>N/P</sub>) 的相关性分析 由于 Chl. a 含量与 TN、TP 含量相关性不显著,对全湖 Chl. a、TN、TP 含量及 N/P 取对数后进一步分析,结果表明 lg(Y<sub>Chl.a</sub>) 与 lg(X<sub>TN</sub>) 呈显著负相关,与 lg(X<sub>TP</sub>) 呈极显著正相关,而与 lg(X<sub>N/P</sub>) 呈极显著负相关(表 3).

根据对数相关关系建立线性回归方程,分别为:lg(Y<sub>Chl.a</sub>) = 1.279 - 0.433 lg(X<sub>TN</sub>), lg(Y<sub>Chl.a</sub>) = 1.569 + 0.482 lg(X<sub>TP</sub>), lg(Y<sub>Chl.a</sub>) = 1.628 - 0.409 lg(X<sub>N/P</sub>),其中 Chl. a 含量单位为 mg/m<sup>3</sup>,TN、TP 含量单位为 mg/L.

2.3 Chl. a 含量与浮游植物密度逐步回归分析

建立 Chl. a 含量与不同门类浮游植物密度逐步回归方程时,仍然按照上述原则进行.通过应用 SPSS 软件的逐步回归分析方法建立相应的多元线性回归方程,结果见表 4.不同湖区筛选出的对 Chl. a 含量有显著影响的浮游植物门类中,都包括蓝藻门.西南区未能建立回归方程.西北区对 Chl. a 含量有显著影响的因子较多,有蓝藻门、隐藻门、裸藻门和甲藻门密度.

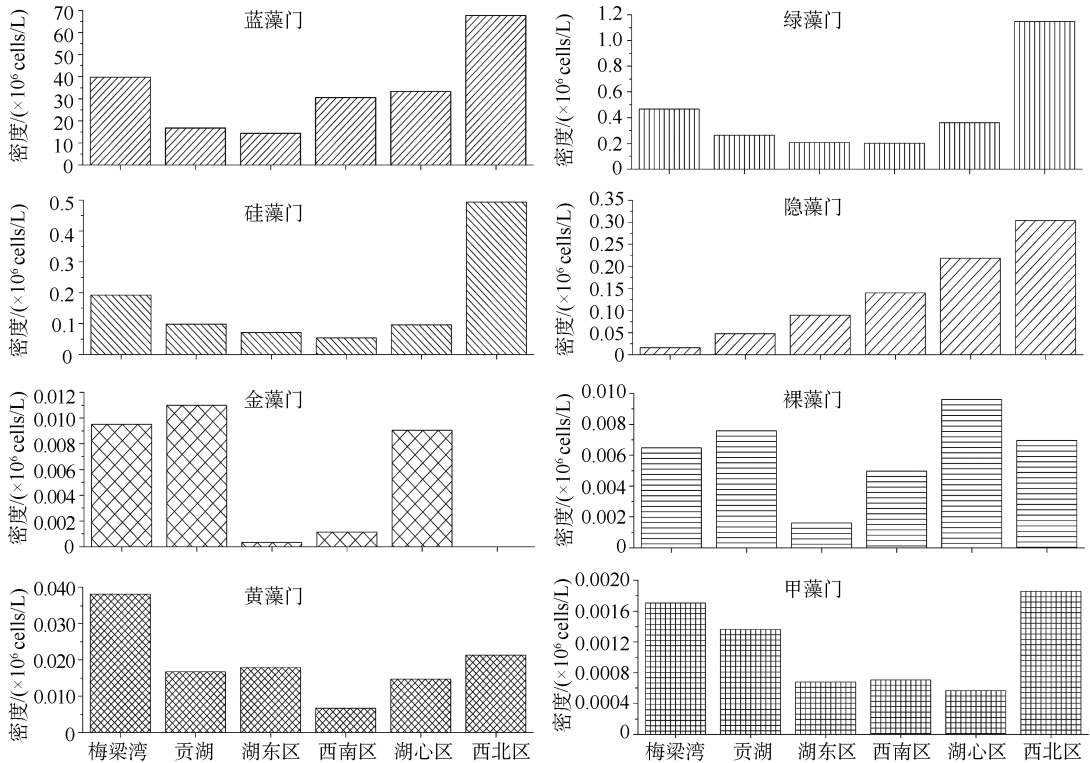


图 4 太湖不同门类浮游植物密度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of different phytoplankton phyla densities in Lake Taihu

表 2 Chl. a 含量与环境因子的回归方程\*

Tab. 2 Stepwise multiple regression equations between Chl. a concentration and environmental factors

湖区	回归方程	复相关系数 R	F	P
梅梁湾	$Y_{Chl.a} = -39.132 + 7.239X_{TOC} - 0.229X_{N/P}$	0.996	278.132	<0.001
贡湖	$Y_{Chl.a} = 13.249 + 28.593X_{TP} - 9.040X_{NO_3^-N}$	0.951	23.730	0.003
湖东区	$Y_{Chl.a} = 7.908 + 0.526X_{TOC}$	0.638	5.501	0.047
西南区	$Y_{Chl.a} = 28.039 - 11.644X_{NO_3^-N}$	0.697	7.542	0.025
湖心区	$Y_{Chl.a} = 47.550 - 8.832X_{TN}$	0.717	6.341	0.045
西北区	$Y_{Chl.a} = -534.105 + 74.142X_{pH}$	0.814	11.751	0.014
全太湖	$Y_{Chl.a} = -386.354 + 3.861X_{TOC} + 20.459X_{pH} + 284.997X_{NO_2^-N} + 15.191X_{DO} + 2.410X_{WT} + 78.516X_{PO_4^{3-}}$	0.850	17.839	<0.001

\*  $Y_{Chl.a}$  单位为  $mg/m^3$ ,  $X_{TOC}$ 、 $X_{TP}$ 、 $X_{NO_3^-N}$ 、 $X_{TN}$ 、 $X_{NO_2^-N}$ 、 $X_{PO_4^{3-}}$  和  $X_{DO}$  的单位均为  $mg/L$ ,  $X_{WT}$  的单位为  $^{\circ}C$ .

表3  $\lg(Y_{\text{Chl. a}})$  与  $\lg(X_{\text{TN}})$ 、 $\lg(X_{\text{TP}})$ 、 $\lg(X_{\text{N/P}})$  的相关系数Tab. 3 Correlation coefficients between  $\lg(Y_{\text{Chl. a}})$  and  $\lg(X_{\text{TN}})$ ,  $\lg(X_{\text{TP}})$ ,  $\lg(X_{\text{N/P}})$ 

	$\lg(Y_{\text{Chl. a}})$	$\lg(X_{\text{TN}})$	$\lg(X_{\text{TP}})$	$\lg(X_{\text{N/P}})$
$\lg(Y_{\text{Chl. a}})$	1			
$\lg(X_{\text{TN}})$	-0.293*	1		
$\lg(X_{\text{TP}})$	0.498**	-0.155	1	
$\lg(X_{\text{N/P}})$	-0.540**	0.634**	-0.863**	1

\* 表示  $P < 0.05$ , 显著相关; \*\* 表示  $P < 0.01$ , 极显著相关(双尾检验).

表4 Chl. a 含量与不同门类浮游植物密度的回归方程\*

Tab. 4 Stepwise multiple regression equations between Chl. a and different phytoplankton phyla densities

湖区	回归方程	复相关系数 $R$	$F$	$P$
梅梁湾	$Y_{\text{Chl. a}} = 16.431 + 3.362 \times 10^{-7} X_{\text{蓝藻门}}$	0.707	9.988	0.010
贡湖	$Y_{\text{Chl. a}} = 8.496 + 3.670 \times 10^{-7} X_{\text{蓝藻门}}$	0.804	18.222	0.002
湖东区	$Y_{\text{Chl. a}} = 6.542 + 5.409 \times 10^{-7} X_{\text{蓝藻门}}$	0.762	13.885	0.004
西南区	—	—	—	—
湖心区	$Y_{\text{Chl. a}} = 19.710 + 3.149 \times 10^{-7} X_{\text{蓝藻门}}$	0.814	19.731	0.001
西北区	$Y_{\text{Chl. a}} = 34.319 + 5.615 \times 10^{-7} X_{\text{蓝藻门}} - 7.565 \times 10^{-7} X_{\text{隐藻门}} - 0.001 X_{\text{裸藻门}} - 0.001 X_{\text{甲藻门}}$	0.991	192.088	<0.001
全太湖	$Y_{\text{Chl. a}} = 13.893 + 2.950 \times 10^{-7} X_{\text{蓝藻门}}$	0.785	112.410	<0.001

\*  $Y_{\text{Chl. a}}$  单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $X_{\text{蓝藻门}}$ 、 $X_{\text{隐藻门}}$ 、 $X_{\text{裸藻门}}$  和  $X_{\text{甲藻门}}$  单位均为  $\text{cells}/\text{L}$ .

### 3 讨论

#### 3.1 Chl. a 含量和浮游植物密度的时空分布特征

3.1.1 Chl. a 含量的时空分布特征 2012年3月至2013年2月期间,太湖 Chl. a 含量年平均值为  $22.33 \pm 37.65 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 变幅为  $0.48 \sim 347.85 \text{ mg}/\text{m}^3$ ; 依据国际经济合作和发展组织(OECD)对水体营养类型的划分标准<sup>[4]</sup>, Chl. a 含量的年均值和最大值均达到富营养化状态, 与朱广伟<sup>[18]</sup>研究认为太湖处于富营养化状态并有加重趋势的结论一致. 太湖 Chl. a 含量年度变化比较明显, 总体呈现夏季最高、秋冬季次之、春季最低的规律, 这与毕京博等<sup>[14]</sup>在南太湖入湖口、张晓晴等<sup>[19]</sup>在梅梁湾研究得到的规律类似.

太湖 Chl. a 含量空间分布规律为: 西北区 > 梅梁湾 > 湖心区 > 西南区 > 贡湖 > 湖东区. 不同水域 Chl. a 含量的差异受地理位置、湖流、风向、出入河流流向等多重影响. 北部梅梁湾和西北区的竺山湾含量最高, 这一方面与北部湖湾人口密集、工农业发达、污染源多有着密切的关系; 另一方面, 太湖夏季盛行东南风, 藻类飘向北部, 最终在北部和西北部湖湾聚集. 张晓晴等<sup>[19]</sup>研究认为, 梅梁湾、贡湖和竺山湾为水华暴发的高发区, 而本研究中贡湖的 Chl. a 含量较低, 可能与“引江济太”调水工程有关<sup>[20]</sup>, 经望虞河调水到贡湖, 从而对贡湖的水体起到了稀释的作用. 湖东区的水生植物生长茂盛, 大大抑制了藻类的生长, 使得 Chl. a 含量最低. 西南区主要有南部地区苕溪河的来水和东部太浦河的出水, 这样加快了水流的交换速度.

3.1.2 不同门类浮游植物密度的时空分布特征 Chl. a 是所有浮游植物门类都含有的叶绿素类型, 通过分析不同门类浮游植物密度, 找出对 Chl. a 贡献较大的浮游植物门类. 蓝藻门、隐藻门、硅藻门、绿藻门密度随时间呈峰型变化, 且变化趋势一致, 均在10月份达到最大值. Lv等<sup>[21]</sup>在研究中发现, 蓝藻门的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)在夏季占主导地位, 而太湖并未在夏季达到最大值, 可能与太湖流域雨热同期<sup>[22]</sup>有关, 夏季大量的降水对水体起到稀释作用. 秋季是硅藻门浮游植物的最适生长季节, 这与 Zhao等<sup>[23]</sup>在秦淮河的研究结果相似. 黄藻门、金藻门和裸藻门密度变化趋势呈“V”型, 在春、冬两季出现较大值.

不同门类的浮游植物全年在不同湖区的分布略有差别, 但大部分门类的最大值出现在西北区. 蓝藻门

密度在不同湖区大小顺序为:西北区 > 梅梁湾 > 湖心区 > 西南区 > 贡湖 > 湖东区, 隐藻门、硅藻门、绿藻门和甲藻门密度均在西北区出现最大值. 这可能与各个湖区的营养盐浓度高低有着密切的关系, 西北区 TN 和 TP 年平均值分别为 4.07 和 0.433 mg/L, 而全湖 TN、TP 年平均值分别为 2.33 和 0.244 mg/L. 金藻门、裸藻门和黄藻门密度分别在贡湖、西南区和梅梁湾出现最高值.

### 3.2 Chl. a 含量与环境因子的相关分析

3.2.1 Chl. a 含量与理化因子的关系 水温是影响 Chl. a 含量的关键因子, 而 pH、DO、透明度、 $COD_{Mn}$ 、TOC 等因子是影响 Chl. a 含量的被动因子. 太湖水温常年保持在 5℃ 以上, 5—10 月基本在 20℃ 以上, 7 月达到最高水温 (31℃), 而藻类生长的适宜水温条件为 20 ~ 30℃, 合适的水温促进藻类生长, 为夏季蓝藻水华暴发创造了有利条件.

张浏等<sup>[24]</sup> 研究认为藻类生长的适宜 pH 值为 7 ~ 9, 实验调查研究表明, 太湖 pH 值变化范围在 7.08 ~ 9.03 之间, 故太湖水体为藻类生长提供了良好的环境. 水体中 DO 含量与水温有着密切的关系, 同时张军毅等<sup>[25]</sup> 研究表明 DO 含量与 pH 存在着明显的线性关系.

3.2.2 Chl. a 含量与营养盐的关系 Chl. a 含量与氮、磷含量分别存在相关性, 还是与氮磷比存在相关性; 存在直线相关<sup>[6,26]</sup>、还是对数直线相关<sup>[14,27]</sup> 等众说纷纭. OECD<sup>[28]</sup> 对营养盐因子和 Chl. a 动态变化的相互关系进行了大量研究, 结果表明水体磷为唯一主导因子的占 80%, 氮为主导因子的占 11%, 其余 9% 的水体为氮和磷共同起作用. 大量研究<sup>[1,6,19,26]</sup> 表明 Chl. a 与氮、磷等营养盐有正、负显著相关或无显著相关的结论都存在.

营养盐对浮游植物生长的限制有两方面作用: 一是营养盐绝对浓度对浮游植物生长的影响, 通过绝对浓度判断的限制因子是指营养盐的绝对浓度低于限制浮游植物生长的阈值, 限制了浮游植物的生长; 二是营养盐的相对浓度比对浮游植物生长的影响, 通过相对比值判断为限制的因子只表明此营养盐将首先被消耗到低值, 但不一定是此营养盐低于限制浮游植物生长的阈值, 可能此营养盐高于阈值仍满足浮游植物的生长需要. 通常浮游植物倾向吸收水体中的铵态氮、亚硝态氮及硝态氮来合成细胞所需要的氨基酸等物质<sup>[29]</sup>, 太湖 Chl. a 含量与  $NO_3^-$ -N 呈显著负相关, 表明太湖浮游植物合成细胞的氮源主要是  $NO_3^-$ -N. 太湖  $\lg(Y_{Chl.a})$  与  $\lg(X_{TP})$  呈极显著正相关, 与  $\lg(X_{TN})$  呈显著负相关, 这与 Lv 等<sup>[21]</sup> 在研究武汉的 15 个城市浅水型富营养化湖泊得到 TP 与 Chl. a 相关性比 TN 高的结论一致. 许多学者<sup>[1,30]</sup> 认为氮磷比与藻类的生长有更直接的关系, 藻类正常代谢所需的 N/P 为 7, 当 N/P 大于 7 时, P 是可能的限制性营养盐; 当 N/P 小于 7 时, 则 N 可能是限制性营养盐. 在本研究中, 太湖全年 N/P 平均值为 23.6.  $\lg(Y_{Chl.a})$  与  $\lg(X_{TP})$  呈极显著正相关, 与  $\lg(X_{TN})$  呈显著负相关, 与  $\lg(X_{N/P})$  呈极显著负相关, 综合考虑, P 相对缺乏, 从而成为限制营养盐, 与上述理论一致.

### 3.3 Chl. a 含量与浮游植物密度的逐步回归分析

钱奎梅等<sup>[31]</sup> 研究认为蓝藻门的微囊藻是太湖浮游植物中的优势种群. 通过逐步线性回归分析拟合方程, 得到: 蓝藻门密度是不同湖区筛选出的对 Chl. a 含量有显著影响的因子, 即蓝藻门密度对 Chl. a 含量的贡献度最大. 西南区未能拟合方程, 可能与南部地区苕溪河的来水和东部太浦河的出水对西南区浮游植物的扰动比较大有一定的联系. 西北区通过逐步回归筛选出有显著影响的因子: 西北区富营养化程度较高, 为蓝藻门、隐藻门、裸藻门和甲藻门浮游植物的生长创造了条件. 总之, 蓝藻门密度对太湖 Chl. a 含量贡献度最大, 绿藻门、硅藻门、隐藻门密度次之.

## 4 结论

1) 作为饮用水水源地的太湖仍处于富营养化状态, 其水质并未得到明显改观. 在时间分布上, Chl. a 含量呈现夏季最高、秋冬季次之、春季最低的规律; 在空间分布上, 太湖北部和西北部最高, 东部和南部最低.

2) 蓝藻门、隐藻门、硅藻门、绿藻门密度随时间呈峰型变化, 且变化趋势一致, 均在 10 月份达到最大值; 黄藻门、金藻门和裸藻门密度变化趋势呈“V”型, 在春、冬两季出现较大值. 不同门类浮游植物密度基本在西北区出现最大值.

3) 在全湖对 Chl. a 有显著影响的因子有 TOC、 $NO_2^-$ -N、DO、pH、WT 和  $PO_4^{3-}$ .  $\lg(Y_{Chl.a})$  与  $\lg(X_{TN})$  呈显著

负相关,与  $\lg(X_{TP})$  呈极显著正相关,与  $\lg(X_{N/P})$  呈极显著负相关,其逐步线性回归方程分别为:  $\lg(Y_{Chl.a}) = 1.279 - 0.433 \lg(X_{TN})$ ,  $\lg(Y_{Chl.a}) = 1.569 + 0.482 \lg(X_{TP})$ ,  $\lg(Y_{Chl.a}) = 1.628 - 0.409 \lg(X_{N/P})$ .

4) 太湖 Chl. a 含量与蓝藻门、隐藻门、裸藻门与甲藻门密度有显著相关关系. 蓝藻门在不同湖区(除西南区)筛选出的对 Chl. a 有显著影响的因子中均出现. 其中,全太湖关于 Chl. a 含量与不同门类浮游植物密度的逐步回归方程为:  $Y_{Chl.a} = 13.893 + 2.950 \times 10^{-7} X_{\text{蓝藻门}}$ .

## 5 参考文献

- [ 1 ] Liu X, Lu XH, Chen YW. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation. *Harmful Algae*, 2011, **10**(3): 337-343.
- [ 2 ] 张红, 黄勇, 李堃. 湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3323-3328.
- [ 3 ] Liu YM, Chen W, Li DH *et al.* First report of aphanotoxins in China-waterblooms of toxigenic *Aphanizomenon flos-aquae* in Lake Dianchi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, **65**(1): 84-92.
- [ 4 ] 秦伯强, 许海, 董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践. 北京: 高等教育出版社, 2011: 1-35.
- [ 5 ] 刘波, 崔丽凤, 刘载文. 北京市城区地表水体叶绿素 a 与藻密度相关性研究. *环境科学与技术*, 2008, **31**(8): 29-33.
- [ 6 ] 吕唤春, 王飞儿, 陈英旭等. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析. *应用生态学报*, 2003, **14**(8): 1347-1350.
- [ 7 ] Chen YW, Fan CX, Teubner K *et al.* Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-a in a large shallow lake, Taihu, China: an 8-year investigation. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1): 273-279.
- [ 8 ] James T, Havens K, Zhu GW *et al.* Comparative analysis of nutrients, chlorophyll and transparency in two large shallow lakes (Lake Taihu, PR China and Lake Okeechobee, USA). *Hydrobiologia*, 2009, **627**(1): 211-231.
- [ 9 ] Wang XL, Lu YL, He GZ *et al.* Multivariate analysis of interactions between phytoplankton biomass and environmental variables in Taihu lake, China. *Environment Monitoring and Assessment*, 2007, **133**(1): 243-253.
- [ 10 ] Chen MJ, Li J, Dai X *et al.* Effect of phosphorus and temperature on chlorophyll a contents and cell sizes of *Scenedesmus obliquus* and *Microcystis aeruginosa*. *Limnology*, 2011, **12**(2): 187-192.
- [ 11 ] Popovich CA, Marcevecchio JE. Spatial and temporal variability of phytoplankton and environmental factors in a temperate estuary of South America (Atlantic coast, Argentina). *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(2): 236-244.
- [ 12 ] Mccauley E, Downing JA, Watson S. Sigmoid relationships between nutrients and chlorophyll among lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, **46**: 1171-1175.
- [ 13 ] Chow FP, Trew DO, Findlay D *et al.* A test of hypotheses to explain the sigmoidal relationship between total phosphorus and chlorophyll a concentrations in Canadian Lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, **51**: 2052-2065.
- [ 14 ] 毕京博, 郑俊, 沈玉凤等. 南太湖入湖口叶绿素 a 时空变化及其与环境因子的关系. *水生态学杂志*, 2012, **33**(6): 7-13.
- [ 15 ] Wang XL, Lu YL, He GZ *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: A 5-year study. *Environmental Sciences*, 2007, **19**(8): 920-927.
- [ 16 ] 陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定. *湖泊科学*, 2000, **12**(2): 185-187.
- [ 17 ] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心等. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [ 18 ] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 21-26.
- [ 19 ] 张晓晴, 陈求稳. 太湖水质的时空特性及其与蓝藻水华的关系. *湖泊科学*, 2011, **23**(3): 339-347.
- [ 20 ] 张军毅, 陆敏, 叶凉等. 夏季梅梁湖蓝藻密度和叶绿素的时空分布特征. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(1): 97-100.
- [ 21 ] Lv J, Wu HJ, Chen MQ. Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China. *Limnological-Ecology and Management of Inland Waters*, 2011, **41**(1): 48-56.
- [ 22 ] Qin BQ, Liu Z, Havens K *et al.* Eutrophication of shallow lakes with special reference to Lake Taihu, China. The Netherlands: Springer, 2007: 8-15.
- [ 23 ] Zhao ZH, Mi TF, Xia LL *et al.* Understanding the patterns and mechanisms of urban water ecosystem degradation: phyto-



- plankton community structure and water quality in the Qinhuai River, Nanjing City, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2013, **20**(7):5003-5012.
- [24] 张 浏,陈 灿,高 倩等. 两种营养状态下 pH 对轮叶黑藻生长和抗氧化酶活性的影响. *生态环境*, 2007, **16**(3): 748-752.
- [25] 张军毅,黄 君,严 飞等. 梅梁湖水体溶解氧特征及其与 pH 的关系分析. *复旦学报:自然科学版*, 2009, **48**(5): 623-627.
- [26] 王丽卿,张军毅,王旭晨等. 淀山湖水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析. *上海水产大学学报*, 2008, **17**(1):58-64.
- [27] 卢 柳. 滴水湖富营养化评价与叶绿素 a 与水质因子的多元分析[学位论文]. 上海:上海海洋大学, 2011:36-40.
- [28] Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). *Eutrophication of waters: Monitoring assessment and control*. Paris: Organization for Economic Cooperative Development, 1982.
- [29] 刘建康. *高级水生生物学*. 北京:科学出版社, 1999.
- [30] Vollenweider RA. Elemental and biochemical composition of plankton biomass; some comments and explorations. *Archiv für Hydrobiologie*, 1985, **105**(1):11-29.
- [31] 钱奎梅,陈宇炜,宋晓兰. 太湖浮游植物优势种长期演化与富营养化进程的关系. *生态科学*, 2008, **27**(2):65-70.