

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017101004

赵旭德, 许大毛, 刘婷, 等. 青山湖叶绿素 a 分布及其与水质因子的关联特征[J]. 环境化学, 2018, 37(7): 1482-1490.

ZHAO Xude, XU Damao, LIU Ting, et al. Spatial distribution of chlorophyll-a and its correlation with and water quality indicators in Qingshan Lake[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(7): 1482-1490.

青山湖叶绿素 a 分布及其与水质因子的关联特征*

赵旭德¹ 许大毛^{1,2,3} 刘 婷¹ 龙海中¹ 张丽莉^{1**} 占长林¹
张家泉¹ 刘先利¹ 肖文胜¹

(1. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 黄石, 435003; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640;
3. 中国科学院大学, 北京, 100049)

摘 要 以典型工业城市湖泊——青山湖为研究对象, 于 2013 年 7 月对其进行取样监测, 研究叶绿素 a 空间分布特征及其影响因素. 采用常规理化分析, 结合多元统计方法, 定量探讨青山湖叶绿素 a 与水质因子间相互关系. 结果表明, 全湖区水体叶绿素 a 含量表现为 IV 区 ($34.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > II 区 ($32.96 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > III 区 ($32.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > I 区 ($21.46 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 整体呈现明显的空间异质性; 相关性分析显示, 主要相关因子为 T 、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 Pb; PCA 排序分析结果显示, 影响叶绿素 a 含量变化的水质因子主要包括 T 、pH、DO、Zn 和 TP; 逐步回归分析发现, 叶绿素 a 含量与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相关关系显著; 综合而言, 水温、总磷和 Zn 分别为藻类生长和分布驱动、限制性和毒性因子. 因此, 应当长期监测水温的时空序列变化, 采取外源性营养盐削减措施, 高度关注重金属污染的生态风险; 研究可为湖泊富营养化阻控和生态安全提供有价值的信息.

关键词 青山湖, 叶绿素 a, 水质因子, 关联特征, 多元统计方法.

Spatial distribution of chlorophyll-a and its correlation with and water quality indicators in Qingshan Lake

ZHAO Xude¹ XU Damao^{1,2,3} LIU Ting¹ LONG Haizhong¹ ZHANG Lili^{1**}
ZHAN Changlin¹ ZHANG Jiaquan¹ LIU Xianli¹ XIAO Wensheng¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi, 435003, China;
2. Guangzhou Institute of Geochemistry of the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China;
3. University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, China)

Abstract: In July 2013, Qingshan Lake, located in a typical industrial city, was selected as the research object. Surface water samples were collected to explore the spatial distribution characteristics of chlorophyll-a and reveal its relationship with driving factors. Combined with multiple statistical methods, conventional physical and chemical analysis were performed to quantitatively clarify the relationship between chlorophyll-a and water quality indicators in Qingshan

2017 年 10 月 10 日收稿 (Received: October 10, 2017).

* 湖北理工学院校级引进人才 (11yjz07R), 湖北理工学院优秀青年科技创新团队资助计划 (13xtz07), 湖北省科技支撑计划 (对外科技合作类) (2014BHE0030), 湖北省水利重点科研课题 (HBSLKY201407) 和国家自然科学基金 (41603117) 资助.

Supported by The Science and Technology of Talent Introduction Project of Hubei Polytechnic University (11yjz07R), the Outstanding Youth Science and Technology Innovation Team Projects of Hubei Polytechnic University (13xtz07), the Hubei Key Technology Support Program (foreign Scientific and Technological) (2014BHE0030), Water Conservancy Key Scientific Research Project of Hubei Province (HBSLKY201407) and National Natural Science Foundation of China (41603117).

** 通讯联系人, Tel: 18271636003, E-mail: zhangll0424@sina.com

Corresponding author, Tel: 18271636003, E-mail: zhangll0424@sina.com

Lake. The results showed that, the chlorophyll-a concentration of surface waters across lake was found in the decreasing order of IV area ($34.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > II area ($32.96 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > III area ($32.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > I area ($21.46 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), indicating its overall spatial heterogeneity was highly obvious. The correlation analysis suggested that the correlation factors mainly included T , pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and Pb. The ordination diagram of principal component analysis manifested that the chlorophyll-a concentration was influenced by specific water quality indicators, namely T , pH, DO, Zn and TP. The stepwise regression analysis demonstrated that the correlation between chlorophyll-a concentration and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was extremely significant. In conclusion, growth and distribution of algae were driven by T , restricted by TP and poisoned by Zn, respectively. Consequently, T in two-dimensional changes of time and space are regularly monitored, exogenous nutrition inputs are cut down as much as possible, and potential ecological risks of heavy metal contaminants are also widely concerned in coming years. Finally, the important information could presumably gain new insights into eutrophication control and ecological security of city lakes.

Keywords: Qingshan Lake, chlorophyll-a, water quality indicators, correlation features, multivariate statistical methods.

湖泊的富营养化早已成为世界最复杂和棘手的水环境问题之一,且已受到广泛关注^[1-3].随着城镇化加快、工业化发展及资源负荷增加,营养盐通过各种途径被过量输入非连续流动的中浅型城市湖泊,导致藻类等浮游植物在具备了水温、光照、水动力和降雨量等环境因子条件下迅速聚积;更为严重的是,自然灾害发生的潜在风险增加同时,湖泊呈富营养化趋势加剧^[4-10].城市湖泊兼具城市防洪、生态服务和美化城市环境等功能^[11],但其外源性营养盐负荷过重和具备最适的环境因子,从而为大规模、大面积藻华的暴发提供了良好的条件,势必对人群健康及生态环境构成重大的现实威胁^[12-13].近几十年来,随着河流、水库和湖泊等水体富营养化的加重及大面积“藻华”暴发机理的研究持续深入^[14-16];湖泊富营养化形成和发展的成因主要与水文、物化、气象和区域等环境要素密切相关,集聚体现协同诱导作用和非线性特征^[1, 17-18].

叶绿素 a(chlorophyll-a)是水体初级生产力和富营养化程度的基本标志,其浓度的调查通常被应用于描述水体富营养化状态和研究水质动态的变化^[19-20].长期以来,湖库型水体富营养化问题至今是城市水质目标管理实现的重点难题之一,现有研究更着重考虑不同类型水体中叶绿素 a 时空分布及其与营养盐的相互关系^[21-24],然而,纵观国内外研究进展,对工业城市湖泊水体中叶绿素 a 分布及其与水质因子间多重响应关联鲜有文献报道.

湖北省黄石市是长江经济开发带的重要支点、武汉城市圈的副中心城市和鄂东区域经济龙头.近年来,随着经济效益和生态环境存在的矛盾日益突显,青山湖已成为黄石市水质污染最为严峻的典型城市湖泊之一,其存在的问题仍主要是水体富营养化,且渐已成为关注的焦点.

本研究选取典型城市湖泊-青山湖为研究对象,通过水体中叶绿素 a 含量分布特征分析,试图探讨叶绿素 a 含量与理化因子、营养盐和痕量重金属元素等水质因子间的影响响应关系,进而揭示水体中叶绿素 a 与水质因子间偶联关系,有助于识别和控制影响湖泊营养化潜在威胁的首要因子;以期为城市湖泊水质目标管理及生态安全评估提供数据支持和历史参考,具有极其重要的实践价值和借鉴意义.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

青山湖位于鄂东南部,是黄石市第二大城市湖泊,地处长江中下游地区,地跨东经 $115^\circ 1.551'$ — $115^\circ 3.962'$,北纬 $30^\circ 13.915'$ — $30^\circ 14.469'$,湖泊汇水面积约为 6.2 km^2 ,水域面积约为 0.52 km^2 ;平时多呈典型的浅水封闭或者半封闭状态,由自然形成的 4 个子湖相连而成,通过排涝泵站与长江相连,兼具雨洪调蓄的重要作用;沿岸分布污水排放口仍有多处,富含营养物的工业废水和生活污水未经有效处理直

接排入湖中,是其周边人类活动区和经济聚集区的重要污染物容纳体.随着各种污染物过量输入,部分水面发生不同程度“水华”和“藻类爆发”现象,湖泊生态功能已遭到不同程度的削弱.

1.2 调查采样及样品采集

于 2013 年 7 月,综合考虑青山湖的自然形态、水流特点、面源分布以及布点方案可行性等,青山湖由西向东共布设 20 个采样点,在 4 个湖区选取的采样点编号分别为 S1—S6(I 区)、S7—S11(II 区)、S12—S14(III 区)和 S15—S20(IV 区)(具体采样点位信息如图 1 所示),同时使用 GPS 定位取样点位置.参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[25],用柱状采样器在每个采样点采集表层(深度约 0.5 m)水样 1 L,分装于瓶身,标志采样点信息的 500mL 聚乙烯塑料瓶中.收集完水样后,当天冷藏立即运往实验室,保存于 4 °C 环境下,在短期内完成各水质指标分析.

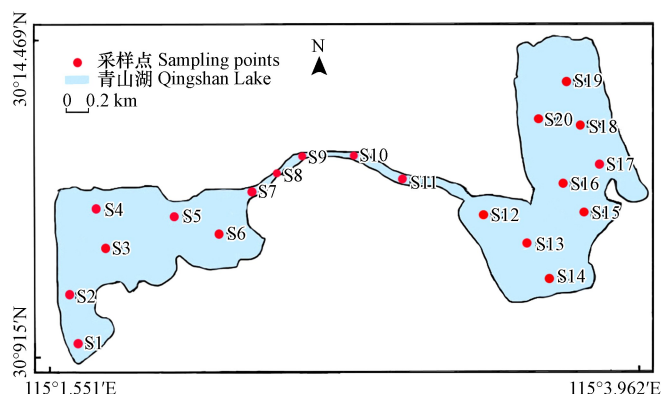


图 1 青山湖采样点位示意图

Fig.1 Location of sampling sites in Qingshan Lake

1.3 水质常规指标分析

监测指标包括水温(T , °C)、pH、溶解氧(DO , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、透明度(SD , m)、高锰酸盐指数(COD_{Mn} , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、叶绿素 a($Chl-a$, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、氨态氮(NH_4^+-N , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、硝态氮(NO_3^--N , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、亚硝态氮(NO_2^--N , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和总磷(TP , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)等.水质指标分析前,所有水样均经 0.45 μm 孔径的醋酸纤维素滤膜过滤.现场用 YSI 便携仪器测定 T 、pH、 DO 、 SD 采用直径 0.30 m 塞氏盘于现场同步测定.其余指标在水样带回实验室后进行测定,具体分析方法和详细步骤依据《水和废水监测分析方法(第四版)》^[25].其中, COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾法测定; $Chl-a$ 采用丙酮萃取分光光度法测定; NH_4^+-N 采用纳氏试剂法测定; NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定; NO_2^--N 采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定;无机氮(TN)含量为 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 分析结果的总和; TP 采用钼酸铵分光光度法测定.水样用王水+双氧水消解后,用火焰原子吸收分光光度法(美国 Varian AA 240)测定镉(Cd , $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、铜(Cu , $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、铅(Pb , $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、锌(Zn , $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)的总量.

1.4 数据处理及分析

每项水质指标测定结果为 3 个平行样,分析结果取其平均值,相对标准误差(RSD)控制在 10% 以内.本文所进行的描述性统计分析、单因素方差分析(ANOVA)、相关性分析、及逐步回归分析均使用 IBM SPSS 22.0 软件完成,使用 Canoco for Windows 4.5 软件对中心化和标准化水质因子进行基于线性模型的主成分排序分析(PCA);图表绘制采用 Excel 2013、Origin 9.0 和 Adobe Firework CS6 软件.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 水质因子特征分析

调查的青山湖水水质理化因子、营养盐和毒性物质的描述性统计结果见表 1. ANOVA(LSD 比较)分析结果显示,青山湖水域面积较小,形状不规则,水体交换缓慢以及面源污染不均,是各湖区水质因子的空间异质性相当显著的主要原因.青山湖水体整体呈弱碱性,各采样点 SD 均低于 1 m,主要是因为水体受

外源因素影响较大,加之水华的频繁发生造成水体透明度较低。 COD_{Mn} 相对含量为 $24.86\text{—}35.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $29.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过 V 类限值 ($15.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。水体中不同形态的氮呈现为 $NH_4^+-N(6.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}) > NO_3^--N(1.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}) > NO_2^--N(0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 的分布趋势,且可通过硝化、反硝化、矿化等作用发生转化。其中, NH_4^+-N 甚至超过 V 类标准限值 ($2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。 NH_4^+-N/TN 、 NO_3^--N/TN 和 NO_2^--N/TN 分别为 $52.98\%\text{—}98.29\%$ 、 $0.88\%\text{—}45.38\%$ 和 $0.14\%\text{—}30.89\%$ 。由此可以说明,影响水质的氮主要以 NH_4^+-N 形式为主。TP 含量水平为 $0.04\text{—}1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 严重超过 II 类标准限值。选择水体中 TN 和 TP 作为评价指标, N 和 P 元素含量水平均高于国际广泛认可的发生富营养化阈值 (即 $N < 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $P < 0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[26], 反映了水体受到生活污水、工业废水及水产养殖的混合贡献污染^[16], 致使水体中 N 和 P 元素含量均较高。有毒亲硫重金属元素含量均值排列顺序为 $Pb(46.28\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}) > Cu(20.23\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}) > Cd(16.53\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}) > Zn(14.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$ 。其中, Cu 和 Zn 的含量均未超过其对应的 II 类标准限值。

表 1 水质指标的统计描述及环境标准

Table 1 Statistical description of water quality indicators in Qingshan Lake and the environmental guideline of national quality standards for surface water

指标 Indicators	T/°C	pH	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SD/m	COD_{Mn} / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH_4^+-N / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NO_3^--N / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NO_2^--N / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cu/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Pb/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Zn/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
平均值	30.73	7.61	6.93	0.49	29.27	6.21	1.25	0.17	0.30	20.23	46.28	16.53	14.57
中位数	30.65	7.58	6.85	0.49	28.92	5.73	0.22	0.11	0.26	18.88	49.27	16.37	12.46
最小值	27.20	7.44	3.90	0.32	24.86	1.51	0.02	0.01	0.04	11.17	12.69	11.23	0.72
最大值	34.20	7.93	10.00	0.60	35.67	13.03	4.69	1.41	1.00	49.27	67.63	20.54	37.76
标准偏差	1.76	0.13	1.88	0.08	2.56	3.83	1.71	0.30	0.18	8.00	15.79	2.44	10.14
II类标准	—	6—9	≥ 6	—	≤ 4.0	≤ 0.5	—	—	≤ 0.1	1000	10	5	1000

注:国家地表水环境质量 II 类标准 (GB3838—2002)。Note: Surface water environment quality Class II National standard (GB3838—2002)。

2.2 Chl-a 含量空间分布特征

水体 Chl-a 含量空间分布显示 (图 2), 整体上看, 全湖区 Chl-a 含量的变化区间为 $20.65\text{—}35.88\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均含量为 $29.81\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 并以排入长江处 S17 点位的 Chl-a 含量最高 ($35.88\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 湖湾处 S5 点位的 Chl-a 含量最低 ($20.65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); 由此可以看出, Chl-a 含量介于 $20\text{—}40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 已达到了轻度藻华风险^[27], 这说明需重点关注潜在的富营养化区域, 从营养盐的首要外源途径上获得预防藻华局部暴发的管理措施。青山湖 Chl-a 含量呈明显的空间异质性, 各湖区 Chl-a 含量呈现的规律为 IV 区 ($34.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > II 区 ($32.96\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > III 区 ($32.85\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) > I 区 ($21.46\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。不同湖区水体 Chl-a 含量的分异受水流流向、盛行风向、径流量及湖泊形状等水文条件和物理特征的综合影响。与 I 区相比, II 区、III 区和 IV 区可能是因为较多的外源性营养物质利用不同途径在湖泊水体中逐步累积, 起到了促进藻类的快速繁殖的作用, 从而导致其 Chl-a 含量比 I 区 Chl-a 含量要高。

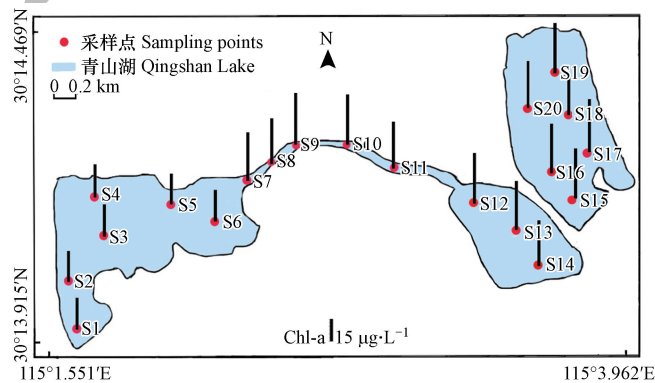


图 2 青山湖 Chl-a 含量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of chlorophyll-a in Qingshan Lake

此外,青山湖的氮磷元素主要供给为水产养殖、工业废水及生活污水等污染源,由于IV区通过排涝泵站将污水排入长江,部分氮磷等外源营养盐和藻类在湖水自西向东中汇入IV区而在此大量富集,使得该区域水体处于相对较高富营养化水平;由此可见,水体中 Chl-a 含量受外源营养盐输入以及人类活动强度的共同影响^[28].与此同时,II区采样处表现出湖形狭长、流动交换滞缓、营养盐容易积累等鲜明特征,为藻类生长提供了足够的营养物质,是其水体 Chl-a 含量保持较高的重要原因.采用 ANOVA(LSD 比较)检验 4 个湖区间 Chl-a 含量的显著性差异.结果表明,Chl-a 含量在 I 区与 II 区、III区和IV区无显著性的差异(ANOVA, $P < 0.05$),而 II 区、III区和IV区的 Chl-a 含量均存在显著性的差异,这与富营养化湖区高发的“水华”现象相吻合.

2.3 Chl-a 含量与水质因子间的关联特征

2.3.1 Chl-a 含量与水质因子间相关性分析

水体 Chl-a 含量受到诸多环境因素的共同制约.对全湖的水体 Chl-a 含量与主要水质因子进行 Pearson 相关性分析,结果见表 2.从表 2 可以看出,全湖区 Chl-a 含量与 T 和 pH 呈显著负相关($P < 0.01$),与 Zn 呈显著负相关($P < 0.05$),与 SD、 NO_2^- -N、Cu 和 Cd 呈一定的负相关;全湖区 Chl-a 含量与 NH_4^+ -N、Pb 呈显著正相关($P < 0.01$),与 DO、 COD_{Mn} 、 NO_3^- -N 和 TP 呈不同程度的正相关.由此可见,主要相关因子为 NH_4^+ -N > T > pH > Pb > Zn;然而,然而,由于实际水质因子时空变异强,应用单一的相关性显著并不能完全昭示各水质因子与 Chl-a 含量间的相互效应关系.

表 2 叶绿素 a 与水质因子间的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson's correlation coefficients between chlorophyll-a and water quality indicators

	T	pH	DO	SD	COD_{Mn}	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	NO_2^- -N	TP	Cu	Pb	Cd	Zn
Chl-a	-0.718**	-0.658**	0.062	-0.347	0.118	0.758**	0.344	-0.411	0.072	-0.033	0.627**	-0.388	-0.502*

注: ** 表示在 0.1 水平(双侧)上显著相关(极显著相关); * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关(显著相关).

Note: ** Correlation is significant at $P < 0.01$ (two-tailed); * Correlation is significant at $P < 0.05$ (two-tailed).

2.3.2 Chl-a 含量与水质因子的多因素统计分析

本研究以全湖 Chl-a 含量为因变量,水质因子为自变量,运用逐步预测回归分析的方法剔除了对 Chl-a 含量影响不显著的水质因子,筛选了相对关键的敏感因子;分析结果见表 3、图 3.

逐步回归预测模型(表 3)显示,不同预测回归模型均筛选出了主要的水质因子,调整后 R^2 分别为 0.552、0.677 和 0.732,且相应方程拟合显著($P = 0.000$).同时,从图 3 也可以看出,Chl-a 含量服从自然对数正态分布,模型拟合度较好.A 模型中 Chl-a 含量仅与 NH_4^+ -N 关系密切;B 模型中 Chl-a 含量与 T 和 NH_4^+ -N 关系紧密;C 模型中 Chl-a 含量与水质因子的关系则更加活跃,与之显著相关的水质因子入选达 3 个,分别受 T 、 NH_4^+ -N 和 Pb 的显著影响.相比而言,Chl-a 含量与 NH_4^+ -N 呈显著正相关,这说明 NH_4^+ -N 是影响水体 Chl-a 含量最关键的水质因子.方差分析发现(表 3),3 个回归模型中 Chl-a 含量与水质因子的 F 值分别为 24.732、20.904 和 18.323;说明筛选的因子对水体 Chl-a 含量的影响较为显著.

表 3 叶绿素 a 和水质因子的回归方程

Table 3 Stepwise multiple regression between chlorophyll-a and water quality indicators

回归预测模型 Regression prediction model	所筛选变量 Selected variable, X_i	逐步回归方程 Stepwise regression equation adjusted	R^2	调整后 R^2 Adjusted R^2	F	P
A	NH_4^+ -N	$\lg(\text{Chl-a}) = 22.710 + 1.143X_1$	0.575	0.552	24.372	0.000
B	NH_4^+ -N、 T	$\lg(\text{Chl-a}) = 68.900 + 0.789X_1 - 1.432X_2$	0.711	0.677	20.904	0.000
C	NH_4^+ -N、 T 、Pb	$\lg(\text{Chl-a}) = 54.212 + 0.700X_1 - 1.096X_2 + 0.106X_3$	0.775	0.732	18.323	0.000

注:逐步回归方程中各变量与所筛选变量一一对应, X_i 表示各水质因子.

Note: The variables in the stepwise regression equation correspond to the selected variables, respectively; X_i means the water quality factor.

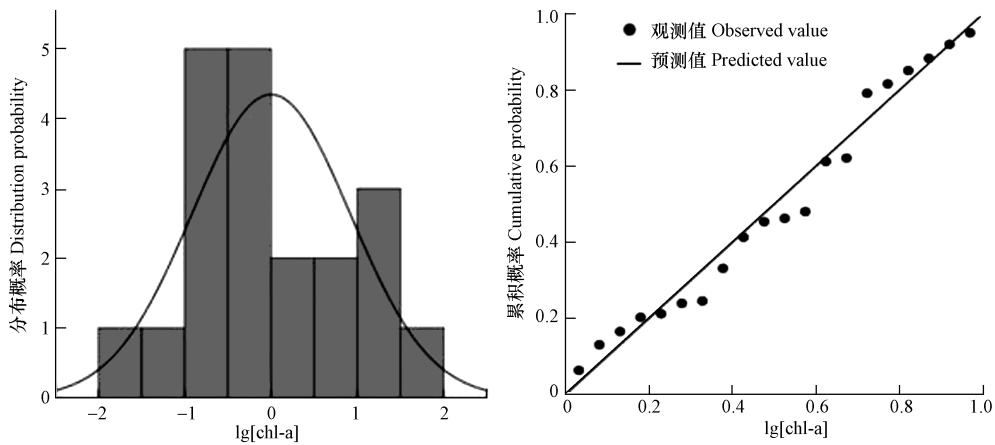


图 3 叶绿素 a(对数转换)可能性概率分布

Fig.3 Measured and predicted cumulative probability distribution of chlorophyll-a (lg-transformation)

2.4 水质因子对 Chl-a 的影响响应

2.4.1 水质因子 PCA 排序分析

采用主成分分析(PCA)方法研究了 13 个水质因子的共同作用对藻类生长的影响,结果见图 4 和表 4.

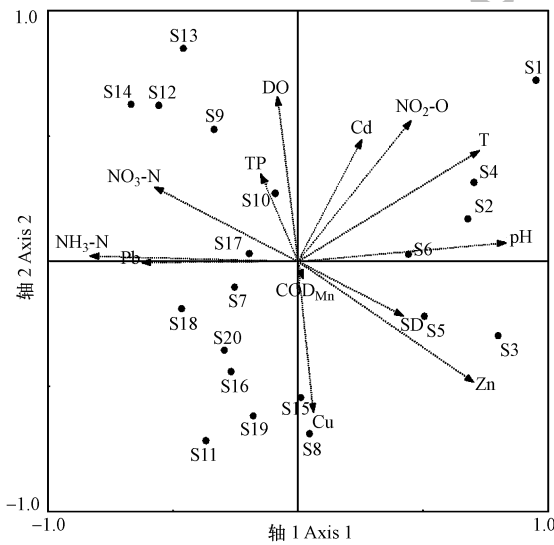


图 4 水质因子间的 PCA 二维排序图

Fig.4 Two-dimensional ordination diagram of Principal component analysis among water quality indicators

表 4 叶绿素 a 与水质因子间的 PCA 排序结果

Table 4 PCA analysis result between chlorophyll-a and water quality indicators

参数项 Parameter items	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 1	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4
特征值	0.276	0.157	0.142	0.118
叶绿素 a 与水质因子的相关系数	1	1	1	1
叶绿素 a 与水质因子关系的变异累积百分比/%	27.6%	43.3%	57.5%	69.4%

PCA 排序分析表明,轴 1 特征值均大于其余轴,前两个排序轴的相关系数达到 1.000,且前两个维度共解释了 43.3%的变异(图 4 和表 4).由此可知,水体浮游生物的生长和分布还可能受其他环境因子的协同或抑制影响.4 个主成解释释总方差的累积贡献率为 69.4%,说明解释了原始数据的大部分信息.主成分 1(PC1)揭示样本变量的信息最为丰富,主要代表了 T、pH 和 Zn;反映了水体理化及毒性环境.主成分 2(PC2)主要代表了 DO 和 NO₂-N;反映了水质污染状态.主成分 3(PC3)主要代表了 TP;反映了磷营

养盐限制性的特征.主成分 4(PC4)主要代表了 DO;反映了浮游植物的光合作用特征.

水体 Chl-a 含量与水质因子特征联系紧密.综合分析, T 是影响浮游植物生长和分布的驱动因子. pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 Zn 的影响效应位居次要地位.其中, N 和 P 元素对藻类生长起着重要贡献的元素, 水体中 N 营养盐过剩, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能为水体浮游植物细胞的合成持续提供足够的氮源;同时, 由于藻类对 P 元素的大量吸收及采样前的连续降雨引起水体中磷元素局部短缺, P 成为影响藻华暴发的限制性营养元素, 已在多数研究中得到证实^[7, 29]. COD_{Mn} 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等有机物和营养盐及毒性物质 Pb 是藻类第三大类影响因子. DO、SD、Cu 和 Cd 与 Chl-a 含量没有呈明显的相关性, 这说明其对藻类生长的影响相对较小.

2.4.2 Chl-a 与理化因子的关系

水温 (T) 变化经常会影响影响藻类光合作用和呼吸代谢速率, 这与早期的研究报道相吻合^[27, 30]. 与以往理解不同, 青山湖高温的夏季藻类生物量相对较低, 水体 Chl-a 含量与 T 呈显著负相关. 青山湖水温为 27.20—34.20 °C, 与蓝藻生长的响应温度范围 (25—33 °C) 重叠^[31]. 造成这种现象的原因可能是多方面的, 一方面, 蓝藻在与种间的生长竞争中具有显著优势, 一定程度上相应地增加了蓝藻的生物量而其他藻类的生长受到明显压制; 另一方面, 内源营养盐有限的释放作用及鱼类对浮游植物的摄食, 也可能是水深、光照、气温和降雨量等环境因素多重作用的结果.

pH、DO、SD 和 COD_{Mn} 等理化环境因子已被公认为是影响水体 Chl-a 含量变化的被动因子. 水体 pH 值的变化与浮游植物的光合作用有着密切联系^[32]. Berge 等研究认为, 当 pH 在 6.5—8.5 范围内波动时, 藻类的增值速率基本维持不变^[33]. 青山湖 pH 值变化范围为 7.444—7.93, 属于偏碱性且波动幅度较小; 另有研究认为, 碱性系统有助于藻类捕获大气中的 CO_2 , 光合作用明显大于呼吸作用, 从而在碱性水体中能够获得更高的生产力. 藻类的光合作用和呼吸作用等生理代谢对 pH 影响显著^[27]. 因此, pH 可能是藻类增殖的结果而非实质原因^[34]. 此外, 溶解氧对藻类有氧呼吸代谢的影响最为显著. 大多湖库水体 Chl-a 含量和 DO 呈负相关, 然而 Chl-a 和 DO 正相关, 与天山天池情况相一致^[35]. 原因可能是尽管水体中充足的有机物和氮元素含量促进藻类的生长, 但浮游生物的耗氧量远低于藻类的光合作用产生的溶解氧, 致使水体中 DO 不断地增加至饱和浓度. SD 是直观反映水体水质的重要指标, 其对水体生物的生长状况、活动强度及增殖速率均有较大的影响^[36]. SD 与水体 Chl-a 含量之间的关系也相当密切. 水体 Chl-a 含量间接表征了水体中藻类生物量的大小, 随着水体中藻类数量增多, 水体的浑浊度增加, 透光性就减弱, 藻类的光合作用因而会受到限制, 这与已有研究结论一致^[35]. 另外, COD_{Mn} 同样也是影响 Chl-a 含量的显著因子之一. Chl-a 与 COD_{Mn} 的正相关性可能是藻类大量繁殖而排泄有机物质所导致的, 是藻华爆发造成的被动原因^[37].

2.4.3 Chl-a 与营养盐的关系

氮磷营养盐含量及其比值同样被认为是影响 Chl-a 含量灵敏的相关因子之一, 逐渐受到学者们的重视^[38]. 水体 Chl-a 含量与 TP 无明显相关性, 但与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著相关, 而与其他形式氮无显著相关; 原因可能是浮游生物直接优先利用以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主的营养形态, 合成自身细胞所需的氨基酸等物质, 并会对其吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生严重抑制; 而 P 元素含量的相对缺乏是初级生产力的限制性因子^[5, 39]. 有研究指出, 氮磷比可被作为浮游植物营养限制类型的直接判据; 若水柱中 N/P 超过 10, 则 P 被认为是潜在的限制性营养盐^[40, 41]. 本研究中各点位的 N/P 均大于 10. 因此, 水体富营养化的形成和发展与充足的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量相关关系甚为显著.

2.4.4 Chl-a 与有毒亲硫重金属元素的关系

与水环境质量密切相关的有毒亲硫 (Cu、Pb、Cd 和 Zn) 被公认为是具有高生态风险的元素, 且它们通常对水体生物代谢产生协同毒性. 有研究证实, 水体中某些金属离子对藻类生长具有重要的作用. 如低 Zn^{2+} 浓度会促进藻类生长, 高浓度则会对藻类生长产生毒害作用^[26, 42]. 水体 Chl-a 含量与 Cu 和 Cd 的相关关系并不显著, 这可能是水体浮游生物对其长期耐受的结果.

3 结论 (Conclusion)

(1) 青山湖水体 Chl-a 含量的变化区间为 20.65—35.88 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均含量为 29.81 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 存在轻度

藻华风险发生的可能,应重点关注水体富营养化的状态;ANOVA 分析显示,青山湖水体叶绿素 a 分布及水质因子均有明显的空间异质性,这主要与其外源氮磷营养盐的分布及人为活动程度密切相关。

(2)综合多因素统计分析结果,水体 Chl-a 对水质因子的影响响应差异较大.其中, T 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 是调控水体富营养化的主要水质因子;pH、DO 和 Zn 的影响效应位居次要地位;第三大类影响因子主要包括 COD_{Mn} 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 Pb;而 SD、Cu 和 Cd 对 Chl-a 的空间分布差异性无显著影响。

(3)湖泊水质在时空动态变化中具有季节性和异质性特征,水质因子是多变元参数,且相互间存在着相当复杂的关系,具有相当的不确定性.利用多元统计技术,阐明特定水体中 Chl-a 与水质因子间的内在响应规律之外,还须施加非常规技术加以确认。

参考文献 (References)

- [1] 李玉照, 颜小品, 吴桢, 等. 典型云南高原湖泊叶绿素 a 与影响因子的定量关系及对比分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 402-410.
LI Y Z, YAN X P, WU Z, et al. Quantitative relationship between chlorophyll-a and key controlling factors in four plateau lakes in Yunnan Province, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 402-410 (in Chinese).
- [2] 王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1384-1392.
WANG L J, YU H, NIU Y et al. Distribution characteristics of water temperature and water quality of Fuxian lake during thermal stratification period in summer[J]. Environment Science, 2017, 38(4): 1384-1392 (in Chinese).
- [3] SMITH V H, SCHINDLER W. Eutrophication Science: Where do we go from here[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2009, 24(4): 201-207.
- [4] 杨斌, 钟秋平, 张晨晓, 等. 钦州湾叶绿素 a 和初级生产力时空变化及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1333-1340.
YANG B, ZHONG Q P, ZHANG C X, et al. Spatio-temporal variations of chlorophyll-a and primary productivity and its influence factors in Qinzhou Bay[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5): 1333-1340 (in Chinese).
- [5] 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 等. 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2141-2148.
LIU X, LIU B G, CHEN Y W, et al. Responses of nutrients and chlorophyll a to water level fluctuations in Poyang Lake[J]. Environment Science, 2016, 37(6): 2141-2148 (in Chinese).
- [6] 王兰, 王超, 赵秀侠, 等. 升金湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征[J]. 生物学杂志, 2016, 33(1): 49-52.
WANG L, WANG C, ZHAO X X, et al. Seasonal and spatial variation of chlorophyll-a concentration in Shengjin Lake[J]. Journal of Biology, 2016, 33(1): 49-52 (in Chinese).
- [7] 江立文, 林曦, 陈杨, 等. 瑶湖水体叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(17): 4069-4072.
JIANG L W, LIN T, CHEN Y, et al. Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a in Yao Lake and its correlation with environmental factors[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(17): 4069-4072 (in Chinese).
- [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[J]. 环境化学, 2013, 32(5): 789-796.
QIAN H Z, ZHAO Q H, QIAN P D, et al. Spatial-temporal characteristic and influential factors of the chlorophyll-a concentration of Taihu Lake[J]. Environment Chemistry, 2013, 32(5): 789-796 (in Chinese).
- [9] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 67-72.
WU A N, ZHU M J, TANG L, et al. Dynamics of chlorophyll-a and analysis of environmental factors in Dianshan Lake during summer and autumn[J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(1): 67-72 (in Chinese).
- [10] 金笑, 寇文伯, 于昊天, 等. 鄱阳湖不同区域沉积物细菌群落结构、功能变化及其与环境因子的关系[J]. 环境科学研究, 2017, 30(4): 529-536.
JIN X, KOU W B, YU H T, et al. Environmental factors influencing the spatial distribution of sediment bacterial community structure and function in Poyang Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(4): 529-536 (in Chinese).
- [11] 钟艳霞, 罗玲玲, 虎雪姣, 等. 银川市鸣翠湖湿地水质评价与污染物空间分布研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 100-105.
ZHONG Y X, LUO L L, HU X J, et al. The study of water quality evaluation and pollutants space distribution of Mingcui Lake wetland in Yinchuan city[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(26): 100-105 (in Chinese).
- [12] GAGALA I, IZVDORCZVK K, SKOWRON A, et al. Appearance of toxigenic cyanobacteria in two Polish lakes dominated by microcystis aeruginosa and *Planktothrix agardhii* and environmental factors influence[J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2010, 10(1): 25-34.
- [13] SMUTNA M, BABICA P, JARQUE S, et al. Acute, chronic and reproductive toxicity of complex cyanobacterial blooms in *Daphnia magna* and the role of microcystins[J]. Toxicon, 2014, 79: 11-18.
- [14] MA J R, D JUSTIN, BROOKES, et al. Environmental factors controlling colony formation in blooms of the cyanobacteria *Microcystis* spp. in Lake Taihu, China[J]. Harmful Algae, 2014, 31(1): 136-142.
- [15] 陈诗文, 袁旭音, 金晶, 等. 西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4179-4186.
CHEN S W, YUAN X Y, JIN J, et al. Characteristics and pollution source analysis of nutrients in tributary outlets of Xitiaozi watershed [J]. Environment Science, 2016, 37(11): 4179-4186 (in Chinese).
- [16] 苟婷, 马千里, 王振兴, 等. 龟山水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4141-4150.
GOU T, MA Q L, WANG Z X, et al. Eutrophication and characteristics of cyanobacteria bloom in summer in Guishi Reservoir[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4141-4150 (in Chinese).
- [17] SM D O M, MACHADO K B, CAMEIRO F M, et al. Environmental factors affecting chlorophyll-a concentration in tropical floodplain lakes, Central Brazil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(11): 611-619.
- [18] MAVORA G, DEVERCELLI M, GIRI F. Spatial variability of chlorophyll- a, and abiotic variables in a river-floodplain system during different hydrological phases[J]. Hydrobiologia, 2013, 717(1): 51-63.

- [19] 田时弥, 杨扬, 乔永民, 等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 31-37.
TIAN S M, YANG Y, QIAO Y M, et al. Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang river, Pearl River basin[J]. Journal of Lake Science, 2015, 27(1): 31-37 (in Chinese).
- [20] CARNEIRO F M, NABOUT J C, VIEIRA L C G, et al. Determinants of chlorophyll a concentration in tropical reservoirs [J]. Hydrobiologia, 2014, 740(1): 89-99.
- [21] ZHANG XF, MEI XY, D RAMESH, et al. Effects of N and P enrichment on competition between phytoplankton and benthic algae in shallow lakes: A mesocosm study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(6): 4418-4424.
- [22] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2061-2069.
ZHANG L, WEI J J, FU L, et al. Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll-a and their relationship in Pengxi river backwater area, Three Gorges Reservoir[J]. Environment Science, 2015, 36(6): 2061-2069 (in Chinese).
- [23] 张永生, 李海英, 任家盈, 等. 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4021-4031.
ZHANG Y S, LI H Y, REN J Y, et al. Temporal and spatial distribution of nutrients in Daning river sediments and their correlations with chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environment Science, 2015, 36(11): 4021-4031 (in Chinese).
- [24] DAGGETT CT, SAROS JE, BRENDA ML, et al. Effects of increased concentrations of inorganic nitrogen and dissolved organic matter on phytoplankton in boreal lakes with differing nutrient limitation patterns[J]. Aquatic Sciences, 2015, 77(3): 511-521.
- [25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
National environmental protection agency. Water and wastewater monitoring and analysis methods. Edition IV [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 2002 (in Chinese).
- [26] 姜伟, 周川, 纪道斌, 等. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2326-2335.
JIANG W, ZHOU C, JI D B, et al. Comparison of relationship between conduction and algal bloom in Pengxi river and modao River in Three Gorges Reservoir[J]. Environment Science, 2017, 38(6): 2326-2335 (in Chinese).
- [27] 宋云龙, 张金松, 朱佳, 等. 西丽水库叶绿素 a 时空分布特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2017, 30(4): 510-519.
SONG Y L, ZHANG J S, ZHU J, et al. Spatial and temporal characteristics of chlorophyll-a and influencing factors in Xili Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(4): 510-519 (in Chinese).
- [28] CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review [J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162(162): 145-173.
- [29] 孟小丽, 邓道贵, 张赛, 等. 巢湖春夏季节浮游植物的动态变化[J]. 生态科学, 2011, 30(2): 189-194.
MENG X L, DENG D G, ZHANG S, et al. Variations of phytoplankton in Chaohu Lake in spring and summer seasons[J]. Ecological Science, 2011, 30(2): 189-195 (in Chinese).
- [30] LV H, YANG J, LIU L, et al. Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2014, 21(9): 5917-28.
- [31] DENG JM, QIN BQ, PAERL HW, et al. Effects of nutrients, temperature and their interactions on spring phytoplankton community succession in lake Taihu, China[J]. Plos One, 2014, 9(12): 1-19.
- [32] GALLINA N, SALMASO N, MORABITO G, et al. Phytoplankton configuration in six deep lakes in the peri-alpine region: Are the key drivers related to eutrophication and climate? [J]. Aquatic Ecology, 2013, 47(2): 177-193.
- [33] BERGE T, DAUGBJERG N, ANDERSEN B B, et al. Effect of lowered pH on marine phytoplankton growth rates[J]. Marine Ecology Progress, 2010, 416(12): 79-91.
- [34] BOUYSSY A, NG H, MAU N V. The Wadi Natrun: Chemical composition and microbial mass developments in alkaline brines of eutrophic desert lakes[J]. Geomicrobiology, 1979, 1(3): 219-234.
- [35] 王斌, 马健, 王银亚, 等. 天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2465-2471.
WANG B, MA J, WANG Y Y, et al. Distribution of chlorophyll-a and eutrophication state in Tianchi Lake of Tianshan mountains in summer[J]. Environment Science, 2015, 36(7): 2465-2471 (in Chinese).
- [36] FLEMING-LEHTINEN A, LAANMANEN M. Long-term changes in secchi depth and the role of phytoplankton in explaining light attenuation in the baltic sea[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2012, 102-103(s102-103): 1-10.
- [37] 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[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(6): 7-13.
BI J B, ZHEN J, SHEN Y F, et al. Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a concentration and its relationship with environmental factors in the inlets of south Taihu lake[J]. Journal of Hydroecology, 2012, 33(6): 7-13 (in Chinese).
- [38] XU H, PAERL HW, QIN BQ, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic lake Taihu, China[J]. Limnology and Oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
- [39] BRONK D A, GLIBERT P M, WARD B B. Nitrogen uptake, dissolved organic nitrogen release, and new production[J]. Science, 1994, 265(5180): 1843-1846.
- [40] LIU X, LU X, CHEN Y. The Effects of temperature and nutrient ratios on microcystis, blooms in lake Taihu, China: an 11-Year investigation[J]. Harmful Algae, 2011, 10(3): 337-343.
- [41] GIBSON G, CARLSON R, SIMPSON J, et al. Nutrient criteria, technical guidance manual: Lakes and reservoirs[M]. washington: united states environmental protection agency.
- [42] KELLY J J, HAGGBLOM M M, III R L T. Effects of heavy metal contamination and remediation on soil microbial communities in the vicinity of a zinc smelter as indicated by analysis of microbial community phospholipid fatty acid profiles[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 38(2): 65-71.