

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012~2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM_{2.5} 重污染过程卫星反演研究 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降水中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河口区水体反硝化及其影响因素 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌金属耐性机制研究进展 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算

金颖薇^{1,2}, 朱广伟^{1*}, 许海¹, 朱梦圆¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于 2013 年 7 月的空间高密度采样数据, 对太湖水华期水体营养盐进行了空间分异特征分析及赋存量估算, 探讨了大型浅水湖泊不同生态类型湖区水华与营养盐的相关关系及样点设置的代表性. 研究发现, 水华期太湖水体营养盐及叶绿素 a 浓度 (CHL) 总体上均呈现由西北向东南降低的趋势; 氮主要以溶解态存在, 占总氮 (TN) 的 76.28%, 磷主要以颗粒态赋存, 占总磷 (TP) 的 66.38%. 采用主成分分析和聚类分析, 可以将采样点分为相互之间具有显著性差异的 4 个区域: 第一区位于西北湖区, 代表水华严重的重富营养湖区; 第二区主要包括梅梁湾及南太湖的入湖河口一带湖区, 代表水华和富营养化程度都相对中等的湖区; 第三区包括湖心区和西南湖区, 代表中等污染但水华频现湖区; 第四区包括贡湖湾、胥口湾和东太湖等其他区域, 代表水华影响较弱、水质较好湖区. 分区统计分析表明, 不同湖区影响浮游藻类生长的因子也不同: 从全湖来看, 与 CHL 显著相关的营养盐指标为 TP、TN、溶解性总氮 (TDN) 和硝态氮 (NO_3^- -N), 而在第一区则为 TP 和 TDN, 第二区为 TN 和 TDN, 第三区为 TP、磷酸盐 (PO_4^{3-} -P) 和 TDN, 第四区为 PO_4^{3-} -P、溶解性总磷 (TDP) 和亚硝酸盐 (NO_2^- -N). 基于空间插值获得调查期间太湖水体 TN、TDN、TP 和 TDP 的赋存量分别为 12 800、9 800、445 和 150 t. 研究表明, 作为一个大型浅水湖泊, 因蓝藻水华空间迁移积聚特征和生态类型异化等特征, 太湖水华期的营养盐具有高度空间异质性, 对于此类大型浅水湖泊的监测与评价, 应当考虑点位的合理布设及结果的恰当解读, 避免因监测布点和统计方法不当而以偏概全.

关键词: 大型浅水湖泊; 蓝藻水华; 营养盐赋存量; K-means 聚类; 多元逐步回归; 分异性

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0936-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.2015.03.024

Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu

JIN Ying-wei^{1,2}, ZHU Guang-wei^{1*}, XU Hai¹, ZHU Meng-yuan¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the data of high density spatial sampling in July 2013, we analyzed the spatial distribution pattern of nutrients and estimated their amount during bloom season in Lake Taihu to discuss the correlation of algal bloom in different types of ecological water and nutrients in large shallow lake and the representative of its sampling sites. The research showed that nutrients and chlorophyll-a concentration (CHL) in Lake Taihu tended to reduce from northwest to southeast in general during bloom season. Nitrogen was mainly present in dissolved form, accounting for 76.28 percent of the total nitrogen (TN), and phosphorus was mainly present in particulate form, accounting for 66.38 percent of the total phosphorus (TP). The sampling points in the whole lake could be divided into four sections with significant difference between each other using principal component analysis and cluster analysis; The first section was located in the district of northwestern Lake Taihu, which represented the heavy eutrophic lake areas with serious blooms; the second section mainly included Meiliang Bay and area of river inflow into lake in South of Lake Taihu, which stood for moderate eutrophication of water quality; The third section included the central area and the southwest of lake, which represented the water area with medium water pollution, but blooms were frequent; And the fourth area was the remainder areas including Gonghu Bay, Xukou Bay, and Eastern Taihu, which stood for the region of weaker blooms and better water quality. Different factors also affected the growth of planktonic algae in different sections: From the point of the whole lake, CHL was significantly correlated with TP, TN, total dissolved nitrogen (TDN) and nitrate nitrogen (NO_3^- -N); while in the first section, CHL was significantly correlated to TP and TDN; CHL was correlated to TN and TDN in the second section; in the third section, the influencing factors were TP, reactive phosphate (PO_4^{3-} -P), TDN; PO_4^{3-} -P, total dissolved phosphorus (TDP) and nitrite nitrogen (NO_2^- -N) were the influencing factors for the fourth section. The study showed that the values of TN, TDN, TP and TDP respectively were 12 800 tons, 9 800 tons, 445 tons and 150 tons during the research period. As a large shallow lake, Lake Taihu showed high spatial heterogeneity in nutrients during bloom season, which was resulted from the space migration accumulation characteristics of cyanobacteria blooms and the alienation characteristics of ecological type. Therefore, when monitoring and evaluating the large shallow lakes, sampling points should be set rationally and the

收稿日期: 2014-07-27; 修订日期: 2014-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230744, 41171368); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点项目(NIGLAS2012135002, NIGLAS2012135003)

作者简介: 金颖薇(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖库有害蓝藻生态学, E-mail: jyw910419@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

results should be interpreted properly, to avoid overgeneralization due to improper monitoring points and statistical methods.

Key words: large shallow lake; cyanobacterial bloom; nutrients amount; K-means cluster; multiple stepwise regression; heterogeneity

20 世纪 80 年代后期, 太湖北部的梅梁湾开始频繁暴发蓝藻水华, 并且水华面积在 1997 ~ 2007 年呈现逐年增大的趋势^[1], 太湖水质问题逐渐得到关注. 相关研究表明^[2-5], 光照、温度、营养盐都是水华生发的重要影响因素. 从气候条件看, 夏季是太湖蓝藻的过度繁殖期^[4], 也是蓝藻生长与氮、磷营养盐供需矛盾最突出的季节. 因此, 研究水华期水体营养盐与藻类生物量之间的关系对于蓝藻水华防控至关重要^[3-6]. 叶绿素 a 含量(CHL)是表征藻类现存量的重要指标之一, 也是水体监测中的重要生物学参数^[7], 通过估算营养盐及 CHL 的赋存总量能够在一定程度上反映太湖水华期水质状况.

太湖面积约 2 238 m², 平均水深 1.9 m, 是一个典型的大型浅水湖泊^[8]. 除了易受风浪扰动影响外^[9], 还连接 200 多条河流, 湖汊众多, 藻型生态类型与草型生态类型共存, 导致水质存在很大的空间差异性^[8]. 许多学者已经关注到太湖水质的这种空间异质性, 对太湖不同湖区进行了一系列的研究^[10-16]. 但是通常在小样本的基础上进行聚类或者用少量样点代表一个湖区, 代表性不够. 本研究针对水华对营养盐空间分布的影响问题, 在太湖蓝藻水华暴发严重的 7 月, 相对均匀地布设 138 个采样点, 对太湖水华期营养盐及 CHL 的空间异质性进行分析, 并对各形态营养盐及 CHL 的赋存量进行了估算, 分析水华期不同类型湖区营养盐与蓝藻水华之间的关系, 探讨大型浅水湖泊营养特征监测和评估中存在的问题.

1 材料与方法

1.1 采样点布设与数据获取

2013 年 7 月 3 ~ 7 日, 在太湖均匀布设了 138 个采样点(图 1), 采集表层水样进行 CHL 和各形态氮磷含量分析. 分析指标包括总氮(TN)、溶解性总氮(TDN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、溶解性总磷(TDP)、磷酸根(PO₄³⁻-P)、CHL. 这些指标也都是中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(太湖站)的逐月常规监测指标. 同时获取太湖站夏季常规调查数据进行比较.

1.2 测定与分析方法

水温、pH、水深采用 6600 V2 型多参数水质仪(美国 Yellow Spring Instrument 公司)现场测定. 水样带回实验室分析 TN、TDN、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、

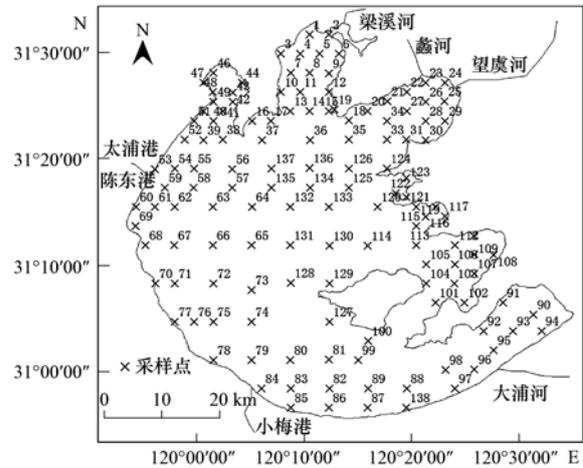


图 1 太湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Taihu

NH₄⁺-N、颗粒态总氮(TPN)、TP、TDP、颗粒态总磷(TPP)、PO₄³⁻-P、CHL, TPN 及 TPP 为 TN 与 TDN 及 TP 与 TDP 的差值, 测定与计算方法见文献[17].

1.3 数据处理

应用 ArcGIS 9.3 中克里金插值法, 得到营养盐及 CHL 的空间插值图. 在浓度插值的基础上, 同时为了考虑每个监测点位的空间代表性, 运用 ArcGIS 的泰森多边形网格工具为每个监测点位划分代表区域, 得到 138 个代表区域的面积, 结合监测点的水深数据, 计算出每个区域内的总水量, 再根据代表该区域监测点各形态氮、磷的浓度, 采用加权平均的方法获得水华期太湖水体各形态氮、磷的赋存量. 采用相同的方法, 估算出全湖 CHL 赋存量, 用于近似反映水体中浮游藻类的生物量.

运用 SPSS 16.0 将数据正态化, 完成主成分分析^[18]. 通过对多维空间降维处理, 在系统变异信息损失最小的情况下, 得到线性无关的几个主成分^[19]. 根据距离代价函数公式:

$$F(S, k) = L + D = \sum_{i=0}^k |m_i - m| + \sum_{i=0}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i|$$

式中, L 为类际距离; D 为类内距离; m 为全部样本的均值; m_i 为簇 C_i 所含样本的均值; p 为任一空间对象, 即样本; k 为所要聚类的个数, F_{\min} 对应的 k 值为最优解(最小距离)^[20]. 基于提取的主成分和 k 值最优解, 采用 SPSS 16.0 实现 K-means 聚类^[21]; 首先选取有代表性的初始凝聚点作为聚类核心, 根据

欧氏距离将每个采样点归入到与其最近的凝聚点所代表的类,以构成暂时的类,再以暂时的类的重心作为新的凝聚点重新聚类,一直迭代至到达收敛标准为止,最后得到凝聚点间的距离.类别间的差异需通过 t 检验有显著性差异,聚类结果才有效.不同于系统聚类法,快速聚类法能够对大样本的样品进行聚类,避免了极大的计算工作量.

通过 SPSS 16.0 多元线性相关分析^[21],比较营养盐与 CHL 之间的密切程度,并通过多元逐步回归

统分析^[21],计算统计量 F 值,经过 F 检验筛选不同湖区对藻类生长主要影响因子, F 值的显著水平和各个回归系数的偏相关系数的显著水平 P 要小于 0.05,才能建立最优多元逐步回归方程.

2 结果与分析

2.1 营养盐及 CHL 的空间分布

图 2 为太湖水华期水体 CHL、各形态氮、磷以及水深的空间分布插值状况. CHL 总体呈自西北向

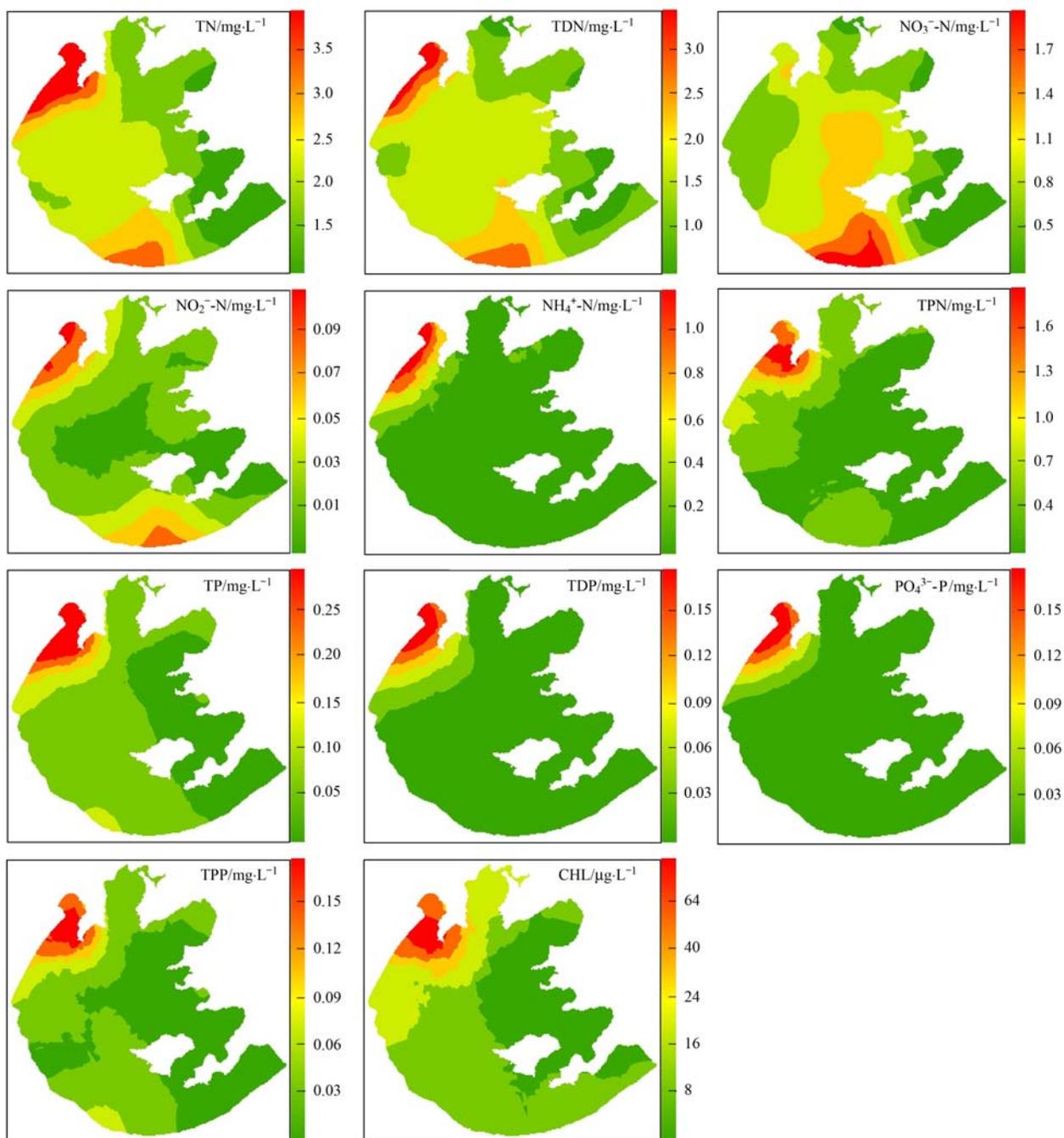


图 2 太湖水华期营养盐及 CHL 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of nutrients and CHL during bloom period in Lake Taihu

东南逐步降低的特点,这一分布形式与太湖的营养盐入湖来源有关,也与太湖夏季盛行东南风,蓝藻水华在西北部的聚集和堆积有关。调查期全湖 CHL 平均浓度为 $17.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $1.91 \sim 185.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。最高值出现在西北湖区竺山湾 50 号点,该湖区 CHL 平均浓度高出其他湖区 2~6 倍;梅梁湾和大浦口 CHL 仅次于竺山湾;CHL 的最低值出现在胥口湾 108 号点,胥口湾和东太湖都属于草型区,是太湖水质最好的湖区。

太湖水华期水体营养盐的空间分布与 CHL 空间分布联系密切。从图 2 中的各形态氮、磷营养盐空间分布可以看出,主要营养盐指标也大体呈现出由西北向东南逐渐降低的趋势。调查期间,TN 平均浓度为 $2.26 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.68 \sim 5.79 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在西北湖区竺山湾 50 号点,最低值出现在贡湖湾 30 号点。TDN 平均浓度为 $1.69 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.53 \sim 4.31 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在西北湖区 53 号点,最低值出现在胥口湾 102 号点。 NO_3^- -N 平均浓度为 $0.85 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.03 \sim 2.95 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在南太湖 85 号点,最低值出现在贡湖湾 29 号点。 NO_2^- -N 平均浓度为 $0.03 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.0001 \sim 0.16 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在西北湖区 52 号点,最低值出现在贡湖湾 29 号点。 NH_4^+ -N 平均浓度为 $0.24 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.05 \sim 3.22 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在竺山湾 51 号点,最低值出现在西南湖区 80 号点。TPN 平均浓度为 $0.57 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.01 \sim 3.51 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在竺山湾 50 号点,最低值出现在梅梁湾 10 号点。

TP 平均浓度为 $0.093 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.011 \sim 0.590 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在西北湖区竺山湾 50 号点,最低值出现在贡湖湾 30 号点。TDP 平均浓度为 $0.034 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.001 \sim 0.253 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在西北湖区竺山湾 51 号点,最低值出现在西南湖区 99 号点。 PO_4^{3-} -P 平均浓度为 $0.023 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.001 \sim 0.228 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在竺山湾 51 号点,最低值出现在贡湖湾 30 号点。TPP 平均浓度为 $0.059 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变幅为 $0.007 \sim 0.369 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高值出现在竺山湾 50 号点,最低值出现在胥口湾 111 号点。

TN、TPN、TP、TPP 和 CHL 最高值都出现在竺山湾同一采样点(50 号点)。TN、TP 的最低浓度也出现在相同位置,位于胥口湾 30 号点。除了 NO_3^- -N 浓度最高值出现在南太湖,溶解性氮磷的最高浓度也基本出现在西北湖区的同一采样点(51 号点)。

但是南部湖区的总溶解性氮浓度普遍比北部湖区高。除了 TPP 最低浓度出现在梅梁湾,其他氮磷营养盐与 CHL 最低值均集中在胥口湾。水华期太湖水体营养盐及 CHL 的空间分布规律大体相似,均呈现由西北向东南降低的趋势,但是不同形态氮、磷的空间分布略有不同。

在对营养盐浓度进行插值的基础上,结合水华期太湖水体水深的插值,计算出 2013 年水华期太湖水体 TN、TDN、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、TPN、TP、TDP、 PO_4^{3-} -P、TPP、CHL 的赋存量分别为 12 800、9 800、5 300、125、881、3 000、445、150、79、295 和 85 t。其中,TDN、TPN 分别占 TN 的 77%、23%,说明水华期太湖水体中的氮主要以溶解态赋存。在溶解态氮中, NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 分别占有 1%、9% 和 54% 的比例, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 对水体总氮的贡献较大。TP 中含有 34% 的 TDP 和 66% 的 TPP,主要赋存形态是颗粒态。

2.2 营养盐含量的空间分异

2.2.1 主成分分析

表 1 为太湖水华期 11 个重点研究指标的 Pearson 相关系数矩阵,从中可以看出,11 个水化指标中除了 NO_3^- -N 以外,其他指标之间基本都呈极显著相关,每个指标都在不同程度上反映了太湖的差异性,因此将所有指标一起进行统计分析时提供的空间差异信息在一定程度上有所重叠,不能得到令人信服的排序结果^[17]。如果存在一定相关性的指标不能综合考虑,尤其是本研究中含有大量采样点和多项水化指标数据,会增加问题分析的复杂性,影响数据分析的准确性。本研究采用主成分分析来概括 11 个指标的主要信息,转化为少数综合指标,以揭示大样本的内在关系。

根据选取主成分个数的原则,特征值要求大于 1 且累计贡献率达 80%~90% 所对应的主成分^[19]。将 11 个水化指标的标准化数据通过主成分分析可以得到各综合指标所对应的特征根和方差贡献值,表 2 是根据特征值选取的 3 个综合指标,已经可以解释原始变量 91.155% 的信息。主成分主要是由 11 个研究指标的系数决定的,第一主成分主要反映了 TN、 NO_3^- -N 和 CHL 的浓度,系数分别为 0.41、0.40、0.40;第二主成分主要反映了 TDN、TDP 和 PO_4^{3-} -P 的情况,系数分别为 0.42、0.33、0.48;第三主成分主要反映了 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P,系数分别为 0.24、0.28、0.69。本研究基于主成分分析选取的 3 个综合指标,通过聚类将太湖进行分区。

表 1 太湖营养盐及 CHL 的 Pearson 相关性系数矩阵¹⁾

Table 1 Pearson coefficient correlation matrix of nutrients and CHL in Taihu Lake

| | TN | TDN | NO ₃ ⁻ -N | NO ₂ ⁻ -N | NH ₄ ⁺ -N | TPN | TP | TDP | PO ₄ ³⁻ -P | TPP | CHL |
|----------------------------------|-------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|-------------|------|
| TN | 1.00 | | | | | | | | | | |
| TDN | 0.83 | 1.00 | | | | | | | | | |
| NO ₃ ⁻ -N | 0.33 | 0.43 | 1.00 | | | | | | | | |
| NO ₂ ⁻ -N | 0.69 | 0.70 | 0.39 | 1.00 | | | | | | | |
| NH ₄ ⁺ -N | 0.62 | 0.68 | -0.10 | 0.54 | 1.00 | | | | | | |
| TPN | 0.72 | 0.32 | 0.03 | 0.37 | 0.24 | 1.00 | | | | | |
| TP | 0.88 | 0.65 | 0.11 | 0.58 | 0.62 | 0.82 | 1.00 | | | | |
| TDP | 0.87 | 0.74 | 0.09 | 0.66 | 0.75 | 0.67 | 0.93 | 1.00 | | | |
| PO ₄ ³⁻ -P | 0.86 | 0.73 | 0.07 | 0.34 | 0.77 | 0.66 | 0.92 | 0.99 | 1.00 | | |
| TPP | 0.78 | 0.48 | 0.11 | 0.44 | 0.42 | 0.86 | 0.94 | 0.75 | 0.75 | 1.00 | |
| CHL | 0.66 | 0.30 | 0.07 | 0.65 | 0.28 | 0.90 | 0.82 | 0.68 | 0.67 | 0.84 | 1.00 |

1) 黑体表示极显著相关($P < 0.01$, 双尾检验), 黑斜体表示显著相关($P < 0.05$, 双尾检验)

表 2 主成分分析的总方差分解表

Table 2 Total variance decomposition of principal component analysis

| 成分 | 抽取主成分 | | |
|----|-------|--------|----------|
| | 特征值 | 方差贡献/% | 方差累积贡献/% |
| 1 | 5.602 | 62.239 | 62.239 |
| 2 | 1.474 | 16.377 | 78.616 |
| 3 | 1.128 | 12.539 | 91.155 |

2.2.2 K-means 聚类及太湖分区

本研究中, 聚类分析按照指标属性将具有相似性质的采样点聚为一类, 差别较大的归为不同的类. 以往大多数从统计角度对太湖湖区的划分, 基本上都采用 Q 型聚类的方法^[7,11], 但是当样本量较大时 (一般大于 100)^[21], 用系统聚类计算的工作量很大, 而且作出的树状图也很复杂, 不便于分析. 因此, 基于以上的插值分析和主成分分析, 本研究采用 K -means 聚类方法^[21], 即对 138 个采样点进行快速聚类, 首先选取有代表性的初始凝聚点作为聚类核心, 根据欧氏距离将每个采样点归入到与其最近的凝聚点所代表的类, 以构成暂时的类, 再以暂时的类的重心作为新的凝聚点重新聚类, 一直迭代至到达收敛标准为止. 与系统聚类的最大不同是快速聚类需要事先给定聚类数 k , 本研究借鉴杨善林等^[20]在 k 值优化问题研究中采用计算距离代价取最小值的方法来确定最优 k 值. 经验规则考虑到 $k \leq \sqrt{n}$, 应有 $k \leq \sqrt{138}$, 即 $k \leq 11$. 根据距离代价函数^[20] 计算得出 $F(S, 4)$ 为最小值, $k=4$ 为最优解.

快速聚类分析, 按照主成分空间关系的密切程度, 将水华期太湖 138 个采样点分成四类湖区 (图 3).

第一类湖区采样点主要位于竺山湾、大浦口, 属于入湖污染重、蓝藻水华堆积严重的湖区. 在西

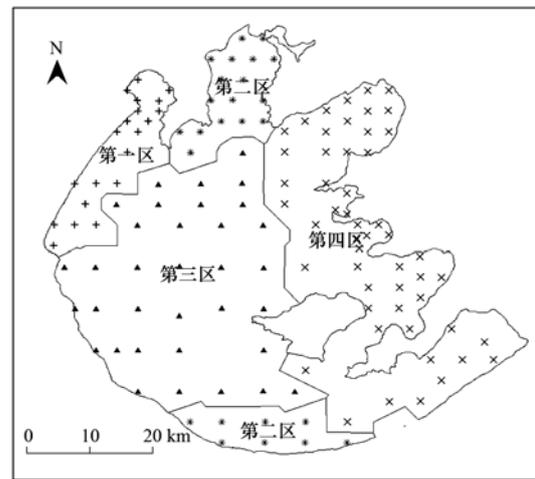


图 3 太湖分区示意

Fig. 3 Subareas of Lake Taihu

北湖区有密集の入湖港口^[22], 包括太滬运河、漕桥河、陈东港、大浦港和双桥港等, 都是太湖主要的污染来源. 根据 GB 3838-2002 水质评价标准, 水质劣 V 类的河流大都位于太湖西北区. 该区流域受到发达城市、工农业、生活污水的影响, 入湖河道的污染问题严峻. 同时, 夏季水华期太湖盛行东南风, 造成该区出现蓝藻水华堆积严重, 也加剧了该湖区水质的进一步恶化.

第二类湖区为梅梁湾及南太湖最南部的入湖河口区一带, 该类湖区水质相对于第三类湖较差, 污染程度仅次于第一类湖区. 梅梁湾是最早发生蓝藻水华的湖区, 由于武进港、直湖港和五里湖处在北湖区的入湖口处, 也属于典型的污染型湖区, 但是近年来由于加强了治理力度, 水质情况逐年好转, 南部小部分湖区主要受到苕溪来水的影响, 水质较差.

第三类湖区包括湖心区及西南湖区 (不包括最南部部分水域). 湖心区不直接连接入湖河道, 水域

面积开阔,交换通畅,蓝藻水华不易堆积,因此该水域营养盐含量显著降低.西南湖区只有西部区域直接与入湖港口相连,而且主要来水区的污染源密度明显降低^[22],污染程度相对较轻.

第四类湖区则为贡湖湾、胥口湾和东太湖.从整体水环境情况来看是水质最好的湖区.贡湖湾在2007年饮用水危机之后成为太湖蓝藻水华防控的重点,在一系列治理工程措施之后,该水域水质情况得到了好转^[11].胥口湾和东太湖是典型的草型湖区^[23],自净能力强,较少发生水华.

四类湖区凝聚核心的距离见表3.将四类采样点的主成分经过 t 检验(双尾检验),得出的结果表明第一区与第二区采样点($t=9.16, P=0.000$)、第一区与第三区采样点($t=6.20, P=0.004$)、第一区与第四区采样点($t=12.18, P=0.000$)、第二区与第三区采样点($t=-2.85, P=0.006$)、第二区与第四区采样点($t=6.79, P=0.007$),以及第三区与第四区采样点($t=6.46, P=0.002$)在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平上均有显著差异性.

将同一类采样点代表的区域进行合并,并给出明确界线,更有利于结果的分析比较,根据龙胤慧

表3 K-means聚类最终核心点的距离

| 湖区凝聚核心 | 第一区 | 第二区 | 第三区 | 第四区 |
|--------|------|------|------|------|
| 第一区 | 0.00 | | | |
| 第二区 | 1.42 | 0.00 | | |
| 第三区 | 2.86 | 1.44 | 0.00 | |
| 第四区 | 3.38 | 1.96 | 0.52 | 0.00 |

表4 太湖不同类湖区的营养盐及CHL统计

| 湖区 | TN /mg·L ⁻¹ | TDN /mg·L ⁻¹ | NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹ | NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹ | NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹ | TPN /mg·L ⁻¹ | TP /mg·L ⁻¹ | TDP /mg·L ⁻¹ | PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹ | TPP /mg·L ⁻¹ | CHL /μg·L ⁻¹ |
|-----|---------------------------|----------------------------|--|--|--|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|
| 第一区 | 3.96 | 2.71 | 0.86 | 0.076 | 0.84 | 1.26 | 0.259 | 0.127 | 0.105 | 0.132 | 47.39 |
| 第二区 | 2.34 | 1.69 | 1.01 | 0.043 | 0.10 | 0.65 | 0.089 | 0.021 | 0.011 | 0.068 | 21.49 |
| 第三区 | 2.17 | 1.72 | 0.90 | 0.012 | 0.11 | 0.46 | 0.077 | 0.023 | 0.008 | 0.054 | 11.95 |
| 第四区 | 1.54 | 1.24 | 0.72 | 0.013 | 0.14 | 0.30 | 0.043 | 0.009 | 0.003 | 0.034 | 7.52 |

2.3 不同湖区营养盐与CHL的相关性

从表5可以看出,全湖层面上,太湖水华期水体CHL与TN、NO₂⁻-N、TPN、TP、TDP、PO₄³⁻-P、TPP都呈极显著相关,与TDN、NO₃⁻-N呈显著性相关,与NH₄⁺-N不相关,总体上说明太湖蓝藻水华的严重程度与营养盐累积程度有关.这种关系一部分是因为营养盐高导致蓝藻水华增殖多所致,更多地可能是蓝藻水华本身巨大的营养盐效应所致^[25].从表5的分区情况看,不同湖区CHL与各形态氮、磷之间的相关程度差异显著,因此有必要分区进行统计

等^[24]对泰森多边形法的研究结果,表明基于ArcGIS的泰森多边形网格工具可以避免人为主观划分的主观性和不确定性,且比人为划分更为便捷.网格工具将太湖自动划分成138个区域,将同一类采样点所代表的区域合并,分区界限见图3.

2.2.3 水华期不同湖区水质的空间分异性

不同类湖区营养盐与CHL浓度如表4所示.水华期第一类湖区TN、TDN、TPN、TP、TDP、PO₄³⁻-P、TPP和CHL平均浓度均最高,分别为3.96 mg·L⁻¹、2.71 mg·L⁻¹、1.26 mg·L⁻¹、0.259 mg·L⁻¹、0.127 mg·L⁻¹、0.105 mg·L⁻¹、0.132 mg·L⁻¹和47.29 μg·L⁻¹,第四类湖区平均浓度最低,分别为1.54 mg·L⁻¹、1.24 mg·L⁻¹、0.30 mg·L⁻¹、0.043 mg·L⁻¹、0.009 mg·L⁻¹、0.003 mg·L⁻¹、0.034 mg·L⁻¹和7.52 μg·L⁻¹,高值区与低值区的差别很大.NO₃⁻-N平均浓度最高值出现在第二类湖区,为1.01 mg·L⁻¹,最低平均浓度也出现在第四类湖区,为0.72 mg·L⁻¹,总体差别不大.而NO₂⁻-N和NH₄⁺-N最高平均浓度分别为0.076 mg·L⁻¹和0.84 mg·L⁻¹,都出现在第一类湖区,最低值分别为0.012 mg·L⁻¹和0.098 mg·L⁻¹,NO₂⁻-N出现在第三类湖区,NH₄⁺-N出现在第二区.统计各指标在不同湖区的平均浓度可知,水体中TN、TDN、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TPN、TP、TDP、PO₄³⁻-P、TPP和CHL水平最大相对变幅为107%、87%、34%、221%、308%、168%、232%、347%、443%、166%和222%,反映出极高的空间异质性.

分析.

为了进一步描述水华期太湖空间的差异,通过逐步回归分析筛选出太湖不同区域和整体湖区对CHL相对重要的水质影响因子,建立了不同湖区的CHL最优多元线性回归方程,对方程显著性进行了检验^[26],结果见表6.

水质因子没有通过 F 检验的就没有作为湖区水质的主控因子.从表6可以看出,对于水华严重的第一区,CHL的主控因子可能是TP和TDN,磷和溶解性氮的供给可能对水华赋存量影响最大.第二

表 5 太湖各湖区营养盐和 CHL 之间的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between nutrients and CHL in various types of sampling sites in Taihu Lake

| 湖区 | TN | TDN | NO ₃ ⁻ -N | NO ₂ ⁻ -N | NH ₄ ⁺ -N | TPN | TP | TDP | PO ₄ ³⁻ -P | TPP |
|-----|-------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|-------------|
| 第一区 | 0.56 | -0.05 | 0.15 | -0.16 | -0.08 | 0.93 | 0.78 | 0.48 | 0.46 | 0.90 |
| 第二区 | 0.30 | -0.16 | -0.19 | -0.13 | 0.15 | 0.83 | 0.65 | 0.60 | 0.62 | 0.62 |
| 第三区 | 0.20 | -0.46 | -0.36 | 0.04 | 0.02 | 0.75 | 0.72 | 0.34 | 0.21 | 0.21 |
| 第四区 | 0.20 | 0.05 | 0.31 | 0.55 | 0.12 | 0.35 | 0.39 | 0.59 | 0.82 | 0.82 |
| 全湖 | 0.66 | 0.30 | 0.07 | 0.65 | 0.28 | 0.90 | 0.82 | 0.68 | 0.67 | 0.84 |

1) 黑体表示极显著相关($P < 0.01$, 双尾检验), 黑斜体表示显著相关($P < 0.05$, 双尾检验)

表 6 CHL 与太湖营养盐的逐步回归统计

Table 6 Stepwise multiple regression between nutrients and CHL in Taihu Lake

| 湖区 | 多元回归方程 | 复相关系数 | F | P |
|-----|--|-------|---------|-------|
| 第一区 | CHL = $2.342 \times 10^{-16} + 1.114 \times TP - 6.34 \times TDN$ $t(TP) = 13.102, P = 0.000, t(TDN) = -7.458, P = 0.000$ | 0.949 | 86.049 | 0.000 |
| 第二区 | CHL = $-3.468 \times 10^{-16} + 0.852 \times TP - 0.421 \times TDN - 0.338 \times PO_4^{3-}-P$ $t(TP) = 7.521, P = 0.000, t(TDN) = -4.368, P = 0.000, t(PO_4^{3-}-P) = -2.951, P = 0.000$ | 0.855 | 27.251 | 0.000 |
| 第三区 | CHL = $-0.259 \times 10^{-16} - 1.448 \times TDN + 1.523 \times TN$ $t(TDN) = -6.811, P = 0.000, t(TN) = 7.164, P = 0.000$ | 0.830 | 26.663 | 0.000 |
| 第四区 | CHL = $-1.667 \times 10^{-16} + 0.600 \times PO_4^{3-}-P + 0.222 \times NO_2^{-}-N + 0.195 \times TDP$ $t(PO_4^{3-}-P) = 5.170, P = 0.000, t(NO_2^{-}-N) = 2.575, P = 0.013, t(TDP) = 2.075, P = 0.043$ | 0.855 | 43.375 | 0.000 |
| 全湖 | CHL = $8.288 \times 10^{-16} + 0.511 \times TP - 1.073 \times TDN + 1.129 \times TN + 0.100 \times NO_3^{-}-N$ $t(TP) = 5.750, P = 0.000, t(TDN) = -12.230, P = 0.000, t(TN) = 8.019, P = 0.000,$ $t(NO_3^{-}-N) = 2.557, P = 0.012$ | 0.923 | 186.608 | 0.000 |

区的主控因子可能是 TP、TDN、PO₄³⁻-P,与第一区的情况类似,增加了磷酸根的供给能力. 第三区的主控因子可能是 TDN 和 TN,氮很可能成为决定蓝藻增殖量、水体蓝藻生物量的主控因子,磷因补给充分而显得不重要了. 第四区主要相关因子则是 PO₄³⁻-P、NO₂⁻-N 和 TDP 影响,磷的补给能力对水体浮游植物生物量的影响更大,而不是氮.

3 讨论

3.1 太湖水华期 CHL 与营养盐的关系

从图 2 及前面的分析可以看出,东北湖区的望虞河入湖区、西南湖区的苕溪湖小梅港入湖区、西北湖区的陈东港、北部的梁溪河入湖区和蠡湖等环湖河道入湖口 CHL 都相对较高,这表明水华期营养盐的外源供给对太湖藻类生长具有较大的影响. 此外,根据 2009 年环太湖入、出湖河水量及污染负荷通量的研究,外源净输入的 TN、TDN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TPN、TP、TDP、PO₄³⁻-P、TPP、CHL 分别是水华期太湖水体赋存量的 1.18 倍、1.29 倍、1.10 倍、4.89 倍、0.80 倍、1.83 倍、3.20 倍、4.18 倍、0.89 倍、0.76 倍^[27]. 由此可见,外源输入对 NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 的贡献较大,其次是 TDP,这些形

态营养盐也正是太湖蓝藻生长最重要的营养盐形态. 外源输入对 TPN、TPP 以及 CHL 的贡献相对较小^[27]. 本次调查显示太湖东北部贡湖湾 CHL 远低于高浓度营养盐湖区,说明该区域的水华受外来影响较大. 这与孔繁翔等^[28]提出蓝藻的堆积很可能是受水文与气象条件的影响结论一致.

不同湖区水体藻类 CHL 的影响因素可能有很大不同. 钱昊钟等^[11]研究过太湖水质因子的季节变化对 CHL 的影响,得出夏季氮、磷营养盐的影响都较为显著,但是没有对夏季水华期进行深入研究. 另外有关湖泊环境理化因子与 CHL 的相关性也已有大量的研究^[29~32]. 但是对于一个具有高度空间异质性的的大型浅水湖泊,如果只对湖泊整体氮磷营养盐与 CHL 的关系进行分析,可能因不同湖区间控制因子的巨大差异,总体分析反而会掩盖一些重要信息. 本研究在水质分区的基础上,分别研究四类湖区营养盐与 CHL 之间的关系,以获得不同水质湖区 CHL 受营养盐的影响情况.

从太湖四类湖区综合来看(表 5),水华期各形态磷基本都与 CHL 呈显著正相关,只有第三类湖区(湖心区和西南湖区)的 CHL 与 TDP、PO₄³⁻-P、TPP 不存在显著相关,该区的固体悬浮物(SS)的平均浓度高于其他 3 个区,因此相关性不显著可能与湖心

区和西南湖区的泥沙较多有关. 营养盐中 TP 对 CHL 的影响更为显著, 这与以往大量研究得出的结果一致^[11-15,33], 表明太湖无论是水华期还是非水华期磷浓度都与蓝藻生物量有良好的相关关系, 在很大程度上, 水华是水体磷的主要存在形态^[25,34]. 蓝藻水华的适宜磷浓度范围为 $0.1 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[35], 处于这个范围内的采样点多分布在第一区(西北湖区), 第二区(梅梁湾及南太湖最南部)有少数几个, 而另外两个湖区的磷浓度都低于最适生长浓度, 并且许海等^[10]的实验研究证明竺山湾蓝藻生长潜力相对于其他水域较大, 西北湖区很容易成为蓝藻水华的生长区, 蓝藻的大量生长需要吸收利用 TDP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 但是该湖区的 TDP/TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\text{TDP}$ 相对于其他湖区的值较高, 说明西北湖区的蓝藻水华堆积的磷释放作用显著, 降解时沉积物和蓝藻体内都释放溶解态磷^[33]. 底泥沉积物的释放也是造成营养盐空间分异的重要原因之一, 太湖底泥主要分布在竺山湾、梅梁湾、湖西岸和入湖口附近以及贡湖湾^[36], 不仅造成了湖泊磷浓度的空间差异, 也影响了氮浓度的空间分布.

第一类湖区(西北湖区)是唯一 CHL 与 TN 显著相关的湖区. 在 TP 与 CHL 的关系都很好情况下, 从另一个方面证明, 氮磷浓度都高的水域可以导致蓝藻更加严重地生长, 也部分说明水华期水华的严重程度及 TN 可能同时还受外源输入的影响, 外源补给加剧蓝藻水华. 第二区 CHL 只与颗粒氮显著相关, 与其它各形态氮都无显著相关, 由此表明该区域内发生水华很大一部分原因是由于受到气象条件的影响, 第三区 CHL 与 TDN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 甚至呈负相关, 藻类生物量并不随着溶解性氮的升高而增加, 说明湖心区及西南湖区本身不适合藻类生长, 蓝藻堆积受到水文与气象条件的影响比第二区更为明显. TDN 和 TPN 的浓度会随着蓝藻生长而发生变化, TDN/TN 平均值比较的结果为: 第四区 < 第三区 < 第二区 < 第一区. 由此表明蓝藻生物体内的氮积蓄是造成氮形态比例空间差异的一个重要因素, 这在梅梁湾和南太湖表现的尤为明显.

从表 5 还可以看出, TPN、TPP 在全湖与 CHL 呈极显著正相关, 而且在太湖四类湖区分别分析时也基本都与 CHL 呈极显著正相关, 水华期 TPN、TPP 浓度均随 CHL 含量的增加而增高, 从而进一步造成太湖水体潜在营养盐来源的空间差异. 从各湖区的营养盐与 CHL 的相关关系和全湖的对比来看, 4 个区分别都与整体湖区反映的情况有所不同, 再

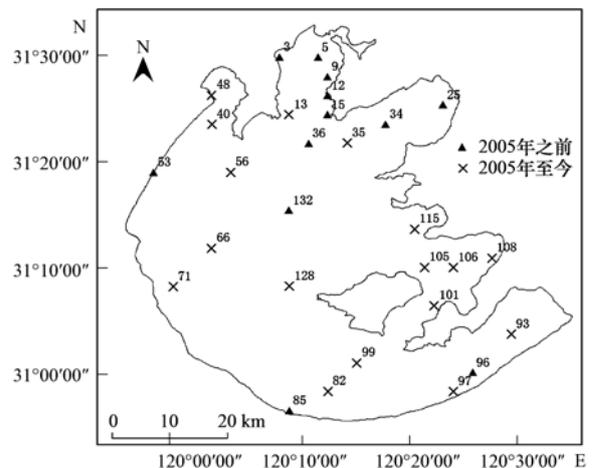
次表明太湖水体分异性高, 从而更加说明了太湖作为大型浅水湖泊进行合理分区分析的必要性.

根据表 6 中逐步回归方程可以得知, 全湖的主要影响因子并不能代表不同湖区的情况, 而且各湖区之间的人选因子也差异较大, 如不进行分区分析, 统计分析结果的信息提取可能会给出错误的解释. 因此, 对于太湖这种水质、污染源及生态系统类型都存在较大差异的浅水湖泊而言, 分区研究意义重大. 这与朱广伟^[37]提出水质空间分异的基础是湖泊形态差异等观点一致.

3.2 采样点布设对评价结果的影响

采样点的布设应尽可能完整准确地反映监测水体的水质状况^[38]. 太湖作为典型的大型浅水湖泊, 具有高度异质性, 采样点布设的数量越多、分布越平均, 代表性可能越好, 更能反映湖区真实的水环境情况. 然而, 考虑到监测成本与可行性, 监测布点数量不可能无限增多. 不同的评价, 选用的监测点情况可能不同. 为了解不同监测布点对评价结果的影响, 利用本次 138 个采样点结果, 与太湖湖泊生态系统研究站 2005 年以来实施的 29 个采样点(除去蠡湖梁溪河入口 3 个采样点)及 2005 年以前的 12 个采样点(除去蠡湖及梁溪河入口 2 个采样点)数据进行对比, 监测点如图 4, 对比结果如表 7.

从表 7 可以看出, 太湖 29 个采样点的 TN、TDN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TPN、TP、TDP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TPP 和 CHL 平均浓度与 138 个采样点平均浓度的相对差异分别为 4.87%、3.55%、8.24%、10.34%、4.17%、7.75%、11.83%、20.59%、



其中 2005 年之前采样点沿用至今

图 4 太湖 29 个采样点和 12 个采样点示意

Fig. 4 Schematic diagram of 29 sampling sites and 12 sampling sites in Lake Taihu

26.09%、5.08%、7.20%，12个采样点与138个采样点的平均浓度相对差异分别为5.65%、7.28%、9.41%、16.67%、8.33%、10.74%、15.38%、32.35%、39.13%、8.47%、7.60%。对于大多数氮、磷指标而言，采样点越少，所得平均值越低。这表明较少的采样点可能低估了太湖的氮、磷浓度。另外，采样点的布设密度对描述各形态磷的空间差异方面影响较大，可能是由于浅水湖泊中磷含量受水华、水动力的影响更大，波动性更高所致^[39]。这

也与 Banaszuk 等^[40]提出的磷被视为限制湖泊藻类生长的主要限制性营养因子相吻合。而且不同湖区沉积物磷释放的变化较复杂^[14]，因此导致磷营养盐空间差异较大。

通过29个采样点与12个采样点分别与全部采样点的相对偏差比较，表明12个采样点各水化指标均值的代表性更差，一定程度上说明对于高度分异的大型浅水湖泊适度增加采样点密度更有助于准确描述水体空间分异性。

表7 全湖不同采样点数的营养盐及 CHL 统计表

| 采样点数 | TN /mg·L ⁻¹ | TDN /mg·L ⁻¹ | NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹ | NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹ | NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹ | TPN /mg·L ⁻¹ | TP /mg·L ⁻¹ | TDP /mg·L ⁻¹ | PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹ | TPP /mg·L ⁻¹ | CHL /μg·L ⁻¹ |
|------|---------------------------|----------------------------|--|--|--|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|
| 138个 | 2.26 | 1.69 | 0.85 | 0.029 | 0.24 | 0.568 | 0.093 | 0.034 | 0.023 | 0.059 | 17.93 |
| 29个 | 2.15 | 1.63 | 0.78 | 0.026 | 0.23 | 0.524 | 0.082 | 0.027 | 0.017 | 0.056 | 16.64 |
| 12个 | 1.94 | 1.56 | 0.77 | 0.024 | 0.22 | 0.629 | 0.079 | 0.023 | 0.014 | 0.054 | 16.57 |

为了进一步说明问题，将29个采样点和12个采样点营养盐与CHL关系分别进行多元相关和逐步回归分析。结果表明，29个采样点与CHL呈显著相关的营养盐因子只有TP($r=0.508, P=0.003$)和NO₃⁻-N($r=0.368, P=0.038$)。多元回归分析揭示的主要影响藻类生长的因子有TP、TDN、NH₄⁺-N和NO₂⁻-N。而12个采样点与CHL呈显著相关的营养盐因子又变成NH₄⁺-N($r=-0.791, P=0.004$)和TDN($r=0.437, P=0.028$)。多元回归分析进入公式的则还是TP、TDN和NH₄⁺-N。两组结果有明显差异，又与138个点的分析结果差异很大，特别是相关分析。这表明，样点多少不但影响了水质指标的浓度值计算，还可能影响统计分析结果。因此，对于大型湖泊的藻类影响因素评估中，样点的代表性和分析方法影响都很大。采样点过少，对数据分析影响很大，评价结果的可信度就更低。

4 结论

(1) 太湖水华期营养盐及CHL都具有明显的空间分异，西北高而东南低，全湖水体TN、TDN、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、TPN、TP、TDP、PO₄³⁻-P、TPP和CHL平均浓度分别为2.26 mg·L⁻¹、1.69 mg·L⁻¹、0.85 mg·L⁻¹、0.03 mg·L⁻¹、0.24 mg·L⁻¹、0.57 mg·L⁻¹、0.093 mg·L⁻¹、0.034 mg·L⁻¹、0.023 mg·L⁻¹、0.059 mg·L⁻¹和17.93 μg·L⁻¹，水体总氮存量分别为12 800、9 800、5 300、125、881、3 000、445、150、79、295和85 t，水华期水体中氮主要以溶解态赋存，磷主要以颗粒态赋存。

(2) 基于主成分分析和K-means聚类分析，太湖营养盐含量在空间上可以分为差异显著的4个区：西北湖区为第一区，湖心区和西南湖区为第二区，梅梁湾以及南太湖南部为第三区，东部等其余湖区为第四区，4个区之间主要营养盐指标均具有显著性差异性。

(3) 不同湖区营养盐与CHL的统计相关关系差异显著：从全湖来看，CHL的主要相关因子有TP、TN、TDN、NO₃⁻-N，但第一区内部的CHL主要相关因子为TP和TDN，第二区为TP、PO₄³⁻-P和TDN，第三区为TN和TDN，而第四区变为PO₄³⁻-P、TDP和NO₂⁻-N。这表明，若不加以分区研究，评估藻类生物量的营养盐因素可能会出现较大的差异。建议对于类似太湖这种大型浅水湖泊，开展水质监测和评估时，加强对监测样点代表性的关注。

致谢：周健博士、向速林博士、庄榆佳同志参与了野外样品采集工作，在此表示感谢。

参考文献：

- [1] Duan H T, Ma R H, Xu X F, et al. Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43(10): 3522-3528.
- [2] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 641-648.
- [3] 周笑白, 张宁红, 张咏, 等. 太湖蓝藻的时空变化规律及治理方法[J]. 生态环境学报, 2013, 22(12): 1930-1935.
- [4] 赵秀侠. 太湖蓝藻水华形成过程中的浮游植物群落动态及其驱动因素研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2013. 1-92.
- [5] 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[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 63-71.

- [6] 陈永根, 刘伟龙, 韩红娟, 等. 太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(12): 2062-2068.
- [7] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海叶绿素 a 与理化因子的统计分析[J]. 环境化学, 2010, **29**(2): 315-319.
- [8] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1.
- [9] 胡开明, 王水, 逢勇. 太湖不同湖区底泥悬浮沉降规律研究及内源释放量估算[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 191-199.
- [10] 许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(12): 2230-2236.
- [11] 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.
- [12] 沈爱春, 徐兆安, 吴东浩. 太湖夏季不同类型湖区浮游植物群落结构及环境解释[J]. 水生生物学杂志, 2012, **33**(2): 43-47.
- [13] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 954-959.
- [14] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰. 太湖不同湖区沉积物磷形态变化分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(11): 1522-1528.
- [15] 庞兴红, 吕丽媛, 牛远, 等. 太湖夏季浮游细菌群落多样性的空间格局[J]. 水生生物学报, 2014, **38**(2): 335-340.
- [16] 晁建颖, 高光, 汤祥明, 等. 生态系统结构对太湖有机聚集体理化性质的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3196-3202.
- [17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 郭显光. 如何用 SPSS 软件进行主成分分析[J]. 统计与信息论坛, 1998, (2): 60-64.
- [19] 张毅. 主成分分析在综合评价中的应用[J]. 荆门职业技术学院学报, 2005, **20**(6): 62-65.
- [20] 杨善林, 李永森, 胡笑旋, 等. K-means 算法中的 k 值优化问题研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, **26**(2): 98-101.
- [21] 张文彤, 闫洁. SPSS 统计分析基础教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [22] 余辉, 燕姝雯, 徐军. 太湖出入湖河流水质多元统计分析[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 696-701.
- [23] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 129.
- [24] 龙胤慧, 廖梓龙. 基于泰森多边形的庆阳市面雨量计算[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2012, **29**(3): 64-67.
- [25] Zhu M Y, Zhu G W, Zhao L L, *et al.* Influence of algal bloom degradation on nutrient release at the sediment-water interface in Lake Taihu, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(3): 1803-1811.
- [26] Danilov R, Ekelund N G A. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden [J]. Science of the Total Environment, 1999, **234**(1-3): 15-23.
- [27] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009 年环太湖入出湖河流水质及污染负荷通量[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.
- [28] 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[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [29] Huang W J, Chen J F, Xu N, *et al.* Analysis of grey models {GM(1, n)} between lake water environmental essential factors and the incidence of chlorophyll a in Poyanghu Lake China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2001, **25**(4): 416-419.
- [30] 崔毅, 陈碧鹃, 马绍赛. 乳山湾浮游植物与环境因子的相关关系研究[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(6): 935-938.
- [31] 王丽卿, 张军毅, 王旭晨, 等. 淀山水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析[J]. 上海水产大学学报, 2008, **17**(1): 58-64.
- [32] 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[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(8): 1347-1350.
- [33] 朱梦圆. 蓝藻水华影响下太湖营养盐的再分配机制[D]. 南京: 南京地理与湖泊研究所, 2014.
- [34] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by Microcystis blooms-an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake [J]. Environmental Pollution, 2003, **122**(3): 391-399.
- [35] Chen Y W, Fan C X, Teubner K, *et al.* Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-a in a large shallow lake, Taihu, China: An 8-year investigation [J]. Hydrobiologia, 2003, **506-509**(1-3): 273-279.
- [36] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3382-3386.
- [37] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(5): 439-445.
- [38] 屈宜春, 关庆利. 水质监测优化布点的物元分析法[J]. 黑龙江水利科技, 1998, **26**(1): 50-51, 55.
- [39] Zhu G W, Wang F, Gao G, *et al.* Variability of phosphorus concentration in large, shallow and eutrophic Lake Taihu, China [J]. Water Environment Research, 2008, **80**(9): 832-839.
- [40] Banaszuk P, Wysocka-Czubaszek A. Phosphorus dynamics and fluxes in a lowland river: The Narew Anastomosing River System, NE Poland [J]. Ecological Engineering, 2005, **25**(4): 429-441.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing | WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759) |
| Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013 | YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768) |
| Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing | JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774) |
| Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China | ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780) |
| Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City | LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787) |
| Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China | XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794) |
| Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels | LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801) |
| Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing | QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809) |
| Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan | LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817) |
| Organic and Element Carbon in Foliar Smoke | CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824) |
| Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge | JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831) |
| Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas | MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839) |
| Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors | WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847) |
| Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River | LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855) |
| Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River | LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862) |
| Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River | YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869) |
| Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region | WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879) |
| Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season | LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888) |
| Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation | CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898) |
| Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors | YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905) |
| Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu | YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914) |
| Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake | WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922) |
| Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China | HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928) |
| Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu | JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936) |
| Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River | GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946) |
| Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus | SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955) |
| Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation | YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963) |
| Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material | WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969) |
| Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles | HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980) |
| Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst | SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989) |
| Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange | WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995) |
| Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System | LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000) |
| Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content | ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006) |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR | GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013) |
| Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell | TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021) |
| Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite | HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027) |
| Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China | LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037) |
| Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions | QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045) |
| Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province | ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053) |
| Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk | JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060) |
| Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i> | ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069) |
| Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow | LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075) |
| Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China | LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084) |
| Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts | YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092) |
| Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials | DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098) |
| Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing | SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105) |
| Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants | DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117) |
| Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi | CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123) |
| Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria | SHEN Li-dong (1133) |

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

| | | | | |
|---------|--|------------------|----|---|
| 主 管 | 中国科学院 | Superintended | by | Chinese Academy of Sciences |
| 主 办 | 中国科学院生态环境研究中心 | Sponsored | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences |
| 协 办 | (以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院 | Co-Sponsored | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University |
| 主 编 | 欧阳自远 | Editor-in -Chief | | OUYANG Zi-yuan |
| 编 辑 | 《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn | Edited | by | The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版 | 科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717 | Published | by | Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂 | Printed | by | Beijing Bei Lin Printing House |
| 发 行 | 科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com | Distributed | by | Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com |
| 订 购 处 | 全国各地邮电局 | Domestic | | All Local Post Offices in China |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱) | Foreign | | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行