

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸢 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价

王艳平^{1,2,3}, 徐伟伟², 韩超², 胡维平^{2*}

(1. 南通大学地理科学学院, 南通 226019; 2. 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以巢湖为研究对象, 分析了沉积物中氮磷等营养盐的分布特征及储量信息, 并对巢湖沉积物氮磷污染指数进行评价。结果表明, 巢湖表层沉积物总氮 (TN) 和总磷 (TP) 平均含量为 $1088 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $585 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 底层为 $666 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $509 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表层总氮含量显著高于底层 ($P < 0.01$); 总氮、总磷与沉积物厚度空间分布特征为: 西湖区 > 东湖区 > 中湖区, 中湖区表层沉积物总氮和总磷含量与东湖区存在差异显著 ($P < 0.05$, $P < 0.01$); 全湖沉积物总氮和总磷储量分别为 $1.58 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $0.98 \times 10^5 \text{ t}$ 。TN 与 TP 在西湖区和中湖区均表现出极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中中湖区表层沉积物 TN 与沉积物厚度也呈显著相关, 表明沉积物氮磷可能有相同的污染源, 沉积物厚度影响了 TN 含量。全湖总氮污染指数 (S_{TN})、总磷污染指数 (S_{TP}) 和综合污染指数 (FF) 值分别为 1.09、1.39 和 1.32, 为轻度-中度污染, 其中, 西湖区表层沉积物 TP 为重度污染, 东湖区为中度污染, 中湖区为轻度污染, 表明巢湖不同湖区污染差异较大, 西湖区沉积物存在较大的安全风险, 水体面临富营养化威胁。

关键词: 巢湖; 沉积物; 营养盐; 污染评价; 水体富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0699-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006216

Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation

WANG Yan-ping^{1,2,3}, XU Wei-wei², HAN Chao², HU Wei-ping^{2*}

(1. School of Geographical Science, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We investigated the spatial distribution and storage of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu sediments and evaluated the sediment nitrogen and phosphorus pollution index. Results show that the average total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) content in the surface-layer sediments of Lake Chaohu were $1088 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $585 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and $666 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $509 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the bottom-layer sediments, respectively. TN content in the surface layer was significantly higher than in the bottom layer ($P < 0.01$). Spatially, TN, TP, and sediment thickness were ranked in the order western lake area > eastern lake area > middle lake area, and the TN and TP contents were significantly different in the surface sediments from the middle and eastern areas of the lake ($P < 0.05$, $P < 0.01$). TN and TP storage in the lake sediments was $1.58 \times 10^5 \text{ t}$ and $0.98 \times 10^5 \text{ t}$, respectively. TN and TP were significantly correlated in both the western and middle parts of the lake ($P < 0.01$). In addition, TN was significantly correlated with sediment thickness in middle area of the lake, which indicated that TN may have the same pollution sources as TP and both were affected by sediment thickness. TN pollution index (S_{TN}), TP pollution index (S_{TP}), and comprehensive pollution index (FF) values were 1.09, 1.39, and 1.32, respectively, indicating light-to-moderate levels of pollution. Specifically, the western lake surface sediments were heavily polluted with respect to TP, the eastern lake surface sediments were moderately polluted, and the middle lake surface sediments were slightly polluted. Nutrient pollution varied widely between different areas of the lake, with sediments in the western part of the lake presenting a higher safety risk. Overall, these observations indicate that Lake Chaohu is threatened by internal nutrient loading.

Key words: Lake Chaohu; sediment; nutrient; pollution evaluation; water eutrophication

富营养化是全球淡水生态系统主要的环境问题^[1-3]。水体中的氮、磷等营养盐浓度过高被认为是富营养化的主要原因^[4], 其中, 磷是淡水生态系统生产力和蓝藻水华形成的限制因素^[5,6], 而氮的加入则有助于藻类大量繁殖^[2,7,8]。水体富营养化严重时会导致蓝藻“水华”, 形成“水华”的藻类可以产生多种有害物质, 如藻毒素等, 危及饮用水安全^[9,10]。

沉积物是湖泊生态系统氮、磷等营养元素的重要蓄积库。沉积物表面的磷主要来源于上覆水中颗

粒态磷的沉降, 多以有机态存在, 随后通过各种生物化学过程最终沉积到沉积物中或释放出溶解态磷到间隙水中并与上覆水磷发生交换^[11]。通常情况下, 沉积物间隙水溶解态磷与固相磷维持动态平衡, 当沉积物发生厌氧时, 弱吸附态磷和铁铝结合态磷等

收稿日期: 2020-06-22; 修订日期: 2020-08-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603); 南通市科技计划项目 (JC2020165); 江苏省双创博士项目

作者简介: 王艳平 (1991~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水环境修复与模拟, E-mail: wyp9107@163.com

* 通信作者, E-mail: wphu@niglas.ac.cn

会释放部分溶解态磷,并向上覆水梯度扩散,有助于蓝藻水华的暴发^[12,13];此外,当入湖营养盐负荷量减少或完全被截污以后,水体依然能够观察到富营养化现象,甚至出现“水华”^[14,15]。可见,由沉积物营养盐释放导致的二次污染不容忽视,沉积物及其间隙水中氮磷含量可以作为评价水体健康与否的重要指标^[16,17],明确其含量、形态及空间分布对湖泊内源控制具有重要意义。

巢湖是我国第五大淡水湖泊,在支撑当地发展方面发挥着重要作用。巢湖近年来一直处于较高的富营养水平,频发蓝藻水华^[18],沉积物内源污染可能是一个重要原因。目前,相关学者在主要入湖河流沉积物营养盐分布特征方面开展了大量研究^[17,19~27],对湖体沉积物的研究多集中在重金属^[28,29]和重污染汇流湾区的营养盐^[30,31]方面,对于整个湖体沉积物及间隙水营养盐含量也开展了部分研究^[32~37],但针对全湖沉积物氮磷含量长时间序列变化及污染评价相关研究较少^[38],加之近年来湖体部分点位及双桥河等重污染入湖河流采取了疏浚工

程,巢湖沉积物氮磷污染水平现状有待进一步探讨。本文对整个巢湖沉积物氮和磷的分布情况开展研究,通过揭示沉积物氮磷污染的时空分布特征,以期作为沉积物内源污染治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

巢湖(31°34'N, 117°26'E)位于长江水系中下游,安徽省境内(图1),每天为巢湖市提供150 000~200 000 m³ 饮用水和多种生态效益^[39],如娱乐、渔业和交通运输等。巢湖湖体面积约为770 km²,东西向长54.5 km,南北向长15.1 km,平均水深为3.06 m^[40]。巢湖属于亚热带季风气候,年平均气温为15~16℃,年平均降雨为1 100 mm^[41],主导风向为夏季东南风、冬季西北风。巢湖周边杭埠河、南淝河、白石天河、派河和柘皋河入湖流量占全年河流总入湖流量的90%以上^[41]。裕溪河是巢湖唯一的出湖河流(除兆河个别时间段的出湖流量),并与长江连通。

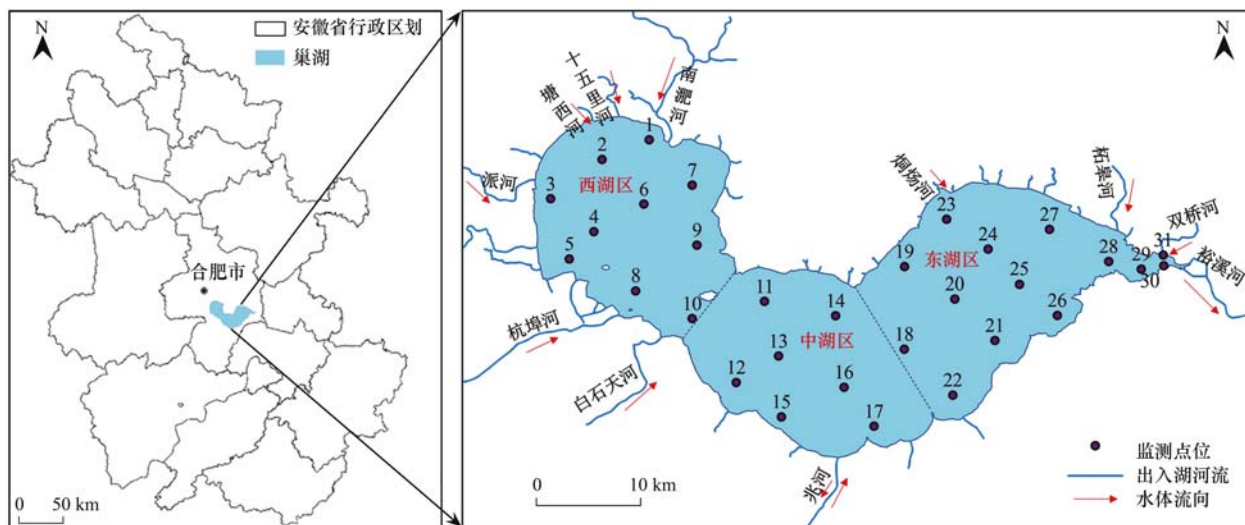


图1 巢湖沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of Lake Chaohu sediment sampling sites

自1963年裕溪河口的巢湖闸建立后,巢湖水体更替周期约为170 d^[42],巢湖与长江之间的年均水体交换量(通过裕溪河)由 13.6×10^8 m³ 降为 1.6×10^8 m³^[41],年平均水位由7.36 m (aMSL, 1956~1960年)增加为9.13 m (aMSL, 2014~2018年)^[43],aMSL定义为高于长江水系吴淞站平均海平面的高度,年平均水位波动由2.94 m降低为1.55 m(不包括2016年)^[44,45]。此外,巢湖流域常住人口由1950年的310万人增加至2013年的740万人^[46]。与此同时,城市用地面积由1985年的987.84 km²增加至2013年的1 886.37 km²^[47,48],巢湖流域的化

肥使用量从1950年的7.5 kg·hm⁻²增加到1990年的1 200 kg·hm⁻²^[45,49]。

以上人口增长、工业化快速发展等变化造成的生活污水、工业废水及农田氮素流失使排入湖体的氮磷含量逐渐增加,湖体水质受到严重污染,沉积物储存大量氮、磷污染物。从1986~2018年,巢湖水体年均氮磷浓度及氮磷比变化幅度分别为1.3~6.0 mg·L⁻¹、0.03~0.42 mg·L⁻¹和6.1~43.5^[50~53][图2(a)]。从2002~2018年,巢湖水体年平均叶绿素a(Chl-a)浓度变化范围为4~112 μg·L⁻¹^[52~55][图2(b)]。根据文献[12,32,34,35,

37, 40, 41, 49, 52, 56 ~ 65], 自 1980s 以来, 巢湖表层沉积物 TN [图 3 (a)] 和 TP [图 3 (b)] 平均含量变化范围分别为: $532 \sim 2\,080 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $358 \sim 1\,127 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 这些指标浓度变化表明巢湖近年来水质得到了一定的提升, 但湖体沉积物氮磷储量较高, 水体仍存在较高的富营养化风险.

本研究于 2015 年 12 月对巢湖进行现场沉积物样品采集, 利用全球卫星定位系统 (GPS) 在全湖布设 31 个沉积物采样点位 (图 1). 为了更好地研究巢湖氮磷分布的空间差异, 本研究将湖区分为 3 部

分^[66], 其中 1 ~ 10 位于姥山岛西部, 为西湖区样点, 11 ~ 17 为中湖区样点, 18 ~ 31 为东湖区样点. 使用沉积物柱状采样器 ($\Phi 90 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$) 采集无扰动柱状样品, 由于 3 号点位已清淤, 没有采集到沉积物样品. 考虑到沉积物活性层厚度约为 30 cm ^[67], 本研究依据上顶法将柱状沉积物分为表层 ($0 \sim 15 \text{ cm}$) 和底层 ($15 \sim 30 \text{ cm}$) 样品, 将分层样品混匀后置于低温保温箱内保存, 在 24 h 内带回实验室 4°C 下冷藏. 同时, 根据采集的柱状沉积物测定出沉积物厚度, 使用竹竿测定大于 50 cm 的沉积物厚度.

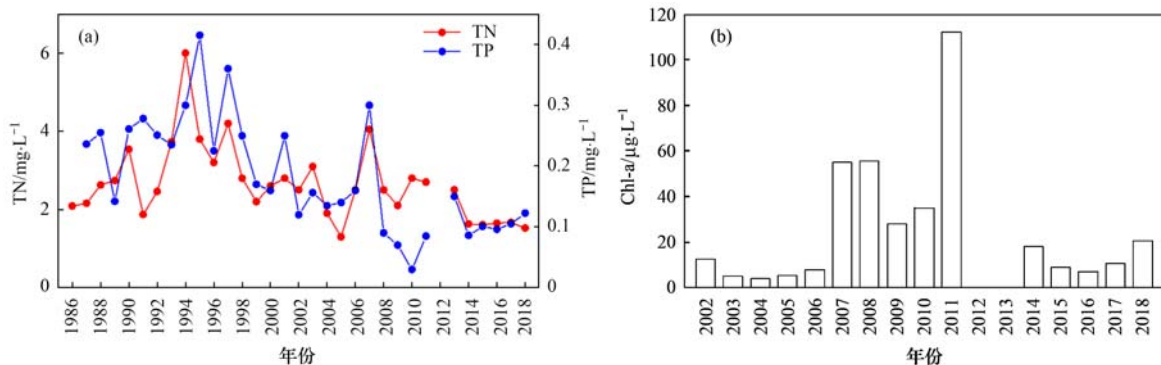
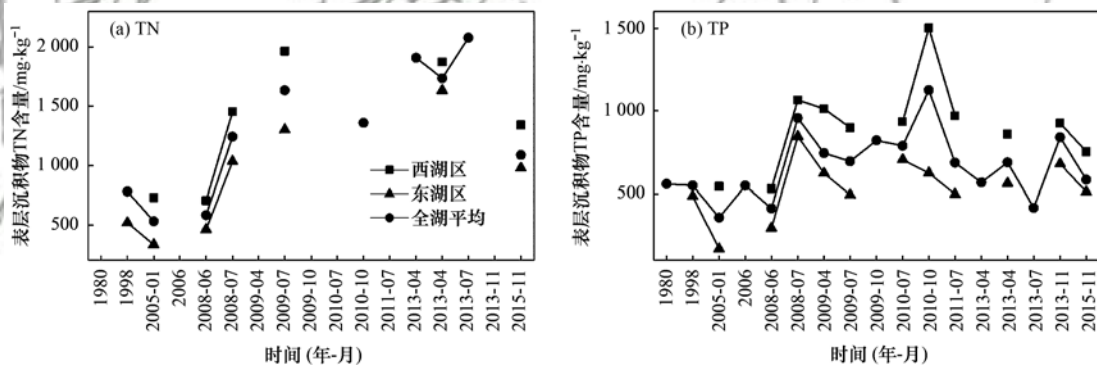


图 2 巢湖水体年平均总氮、总磷和叶绿素 a 浓度

Fig. 2 Annual average total nitrogen, total phosphorus, and chlorophyll a concentrations in Lake Chaohu water



2006 年数据为 4 ~ 6 月, 2013-04 分别引自文献 [12] 和文献 [38]

图 3 巢湖表层沉积物总氮和总磷年平均含量

Fig. 3 Annual average total nitrogen and total phosphorus content of surface sediments in Lake Chaohu

1.2 样品处理与分析

由于沉积物的内源释放主要受表层 ($0 \sim 15 \text{ cm}$) 营养盐浓度的影响, 且底层 ($15 \sim 30 \text{ cm}$) 沉积物间隙水量较少, 难以满足测试体积需求, 故本研究仅提取了表层沉积物 ($0 \sim 15 \text{ cm}$) 的间隙水样品. 去除沉积物样品中的沙石和动物残体, 将一部分表层沉积物样品离心并使用 $0.45 \mu\text{m}$ 的纤维素滤膜 (Whatman) 过滤, 获取间隙水, 进行溶解态总氮 (DTN)、溶解态总磷 (DTP) 和磷酸根 (PO_4^{3-}) 含量测定, 溶解态有机磷 (DOP) 为 DTP 与 PO_4^{3-} 的差值. 将其余沉积物样品风干、研磨, 过 100 目尼龙筛后装入样品袋冷藏保存, 用于沉积物总氮和总磷含量测定. 其中, 总氮含量使用元素分析仪 (EA3000) 测

定, 总磷含量使用电感耦合等离子体光谱仪 (ICP-AES) 测定, 间隙水中 DTN、DTP 和 PO_4^{3-} 含量的测定方法详见文献 [68], 所有比色过程使用紫外分光光度计 (TU-1810PC, China).

1.3 沉积物氮磷储量与污染指数评价

巢湖沉积物氮磷总储量计算公式^[57]为:

$$M = H \times A \times C \times (1 - \varphi) \times \rho / 100 \quad (1)$$

式中, M 为沉积物氮 (磷) 总储量 (t), H 为沉积物厚度 (cm), A 为巢湖面积 (770 km^2), C 为沉积物氮 (磷) 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), φ 为沉积物含水率 (47%)^[57], ρ 为沉积物密度 ($0.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)^[57].

综合污染指数可由单项污染指数公式 (2) 和公式 (3) 计算得到^[69]:

$$S_i = C_i / C_s \quad (2)$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (3)$$

式中, S_i 为单项评价指数(i 代表 TN 或 TP), S_i 大于 1 表示该指标含量超过评价标准值; C_i 为评价因子 i 的实测含量; C_s 为评价因子 i 的标准含量, 其中 TN 的 C_s 为 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, TP 的为 $420\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [70]; FF 为综合污染指数; F 为 2 项评价因子的评价指数平均值(S_{TN} 和 S_{TP} 的平均值); $F_{\max}$ 为最大单项评价指数(S_{TN} 和 S_{TP} 的最大值). 参照沉积物综合污染程度分级标准(表 1), 得到巢湖表层沉积物总氮和总磷的污染等级.

表 1 沉积物综合污染程度分级标准[71]

等级	S_{TN}	S_{TP}	FF	污染程度
1	<1.0	<0.5	≤1.0	清洁
2	1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	轻度污染
3	1.5~2.0	1.0~1.5	1.5~2.0	中度污染
4	>2.0	>1.5	>2.0	重度污染

1.4 数据处理

数据处理与分析采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件, 图表绘制使用 Origin 2018 和 ArcGIS 10.2 软件.

2 结果与讨论

2.1 沉积物总氮和总磷分布特征

巢湖沉积物总氮和总磷总体呈西部湖区最高、东部次之、中部最低且北部高、南部低的空间分布特征(图 4). 对于 TN, 表层沉积物 TN 含量在 $400 \sim 2\,127\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $1\,088\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 底层沉积物 TN 含量在 $280 \sim 1\,873\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $666\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全湖表层沉积物 TN 平均含量显著高于底层($P < 0.01$). 其中, 西湖区表层沉积物 TN 平均含量为 $1\,342\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于中湖区($797\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.01$) 和东湖区($1\,069\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.05$); 而西湖区底层 TN 平均含量为 $814\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与中湖区($551\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和东湖区($628\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 均没有显著差异. 对于 TP, 表层沉积物 TP 含量在 $263 \sim 1\,194\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $585\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 底层沉积物 TP 含量在 $190 \sim 1\,184\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $509\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 全湖表层沉积物 TP 平均含量与底层之间没有显著差异($P = 0.15$). 其中, 西湖区表层沉积物 TP 平均含量为 $754\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于中湖区($416\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.01$) 和东湖区($560\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.01$); 西湖区底层沉积物 TP 平均含量为 $607\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与中湖区

($359\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的差异显著($P < 0.05$), 但与东湖区($521\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的差异不显著.

巢湖沉积物氮磷的空间分布特征相似, 氮磷污染均自十五里河和派河入湖口处向中湖区和东湖区不断延伸(图 4). 十五里河和南淝河均位于合肥市境内, 其中十五里河流经包河工业园区(省级开发区), 大量工业废水、城镇生活污水及农业面源污染排放是导致西半湖沉积物氮磷含量较高的主要原因[72]. 西湖区表层沉积物氮磷高值分布区域在以往研究中存在一定差异[12,37,38], 这可能与监测点位的选择和西湖区沉积物氮磷含量变异系数较高有关[30]. 本研究中, 十五里河入湖口附近表层沉积物 TN 和 TP 含量最高, 分别为 $2\,127\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1\,194\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约为全湖表层平均值(TN, $1\,088\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 TP, $585\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 2 倍, 氮磷含量与 Zan 等[61] 于 2009 年的研究结果相似, 但略低于刘成等[30] 在 2013 年的观测值. 南淝河入湖口处的氮磷含量相比西湖区其它点位相对较低, 同时与温胜芳等[37] 在 2010 年的调查结果相比已明显降低, 此现象可能与该区域自 1999 年以来实施了多次的环保疏浚有关. 然而, 刘华丽等[73] 的研究认为疏浚只能去除少量沉积在湖底表层的有机碎屑, 而对内源污染的主要贡献者即长期悬浮在水体的有机碎屑没有改善. 东湖区表层沉积物氮磷含量高于中湖区, 且存在显著差异($P < 0.05$, $P < 0.01$), 表明东湖区沉积物氮磷污染程度相比中湖区较严重. 东湖区靠近巢湖县, 生活用水是该地区入湖水的主要来源. 尤其是北部柘皋河和双桥河入湖口附近的表层总磷含量相比南部较高, 双桥河长期劣 V 类水, 其入湖口位置距离巢湖市自来水厂取水口仅 500 m, 虽然在 2010 年当地政府对此河道实施了沉积物疏浚工程, 但在疏浚 15 个月后和 2 年后沉积物总氮和总磷含量均恢复甚至超过疏浚前水平[22,27], 因此双桥河仍然为东部湖区主要的氮磷污染源.

自 1980 年以来, 巢湖表层沉积物 TN 和 TP 含量呈先升高后保持相对稳定的变化趋势(2015 年除外, 表 2 和图 3). 对于 TP, 其含量由 1980 年的 $560\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 2010 年的 $1\,127\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随后有所下降, 并保持相对稳定; 其中西湖区 TP 含量增加明显, 在 2010 年西湖区 and 东湖区分别达到最高值, 分别为 $1\,502\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (10 月) 和 $706\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (7 月). 对于 TN, 自 2008 年 6 月($584\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 之后, 其含量呈显著增加, 在 2013 年 7 月达到最大值($2\,080\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 值得注意的是, 本研究(2015 年) 的监测结果显示, 沉积物总磷含量相比 2013 年有所下降, 造成此现象的原因可能为沉积物采样厚度与

前人有所差异. 2015 年采集的表层沉积物深度范围为 0 ~ 15 cm, 而以往学者采集的表层沉积物多为 0 ~ 1^[17,30,37,49,74]、0 ~ 2^[33,59,60,64,75,76]、0 ~ 5^[25,34,36,57] 和 0 ~ 10 cm^[31,35,38,58]. 有研究表明, 沉

积物深度在 0 ~ 20 cm 范围内, 随深度增加, TP 含量明显下降^[30,60]. 因此, 沉积物采集厚度差异可能是导致此次调查结果中表层沉积物 TP 平均含量低于 2013 年的原因.

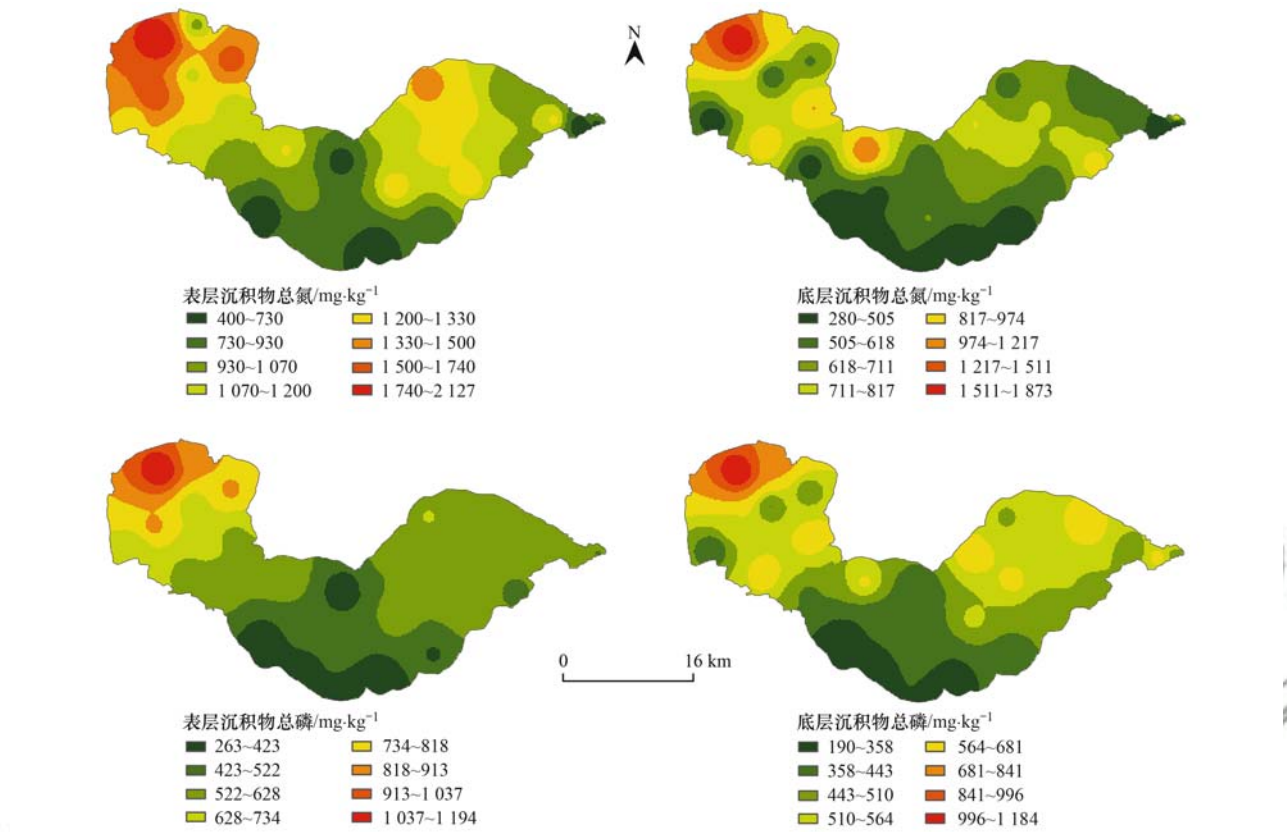


图 4 巢湖表层和底层沉积物总氮和总磷含量空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of total nitrogen and total phosphorus contents in the surface and bottom sediments of Lake Chaohu

表 2 巢湖表层沉积物总氮和总磷含量时间变化¹⁾

Table 2 Temporal variations in total nitrogen and total phosphorus contents in the surface sediments of Lake Chaohu

日期(年-月)	TN/mg·kg ⁻¹			TP/mg·kg ⁻¹			样点数/个	文献
	西湖区	东湖区	平均	西湖区	东湖区	平均		
1980	—	—	—	—	—	560.00	—	[41]
1998	—	520	780.00	—	487	551.00	33	[77]
2005-01	731.33	334.00	532.00	544.67	171.00	358.00	6	[56]
2006-04 ~ 2006-06	—	—	—	—	—	550.00	无	[65]
2008-06	705.00	462.50	583.75	532.50	295.00	413.75	12	[36,57]
2008-07	1 453.48	1 032.88	1 243.18	1 067.41	846.05	956.73	18	[58]
2009-04	—	—	—	1 013.46	624.27	745.89	32	[59,60]
2009-07	1 966.00	1 302.00	1 634.00	898.58	494.61	696.59	10	[32,49,61]
2009-10	—	—	—	—	—	821.80	62	[34]
2010-07	—	—	—	936.00	706.00	790.00	57	[37]
2010-10	—	—	1 360.00	1 502.15	625.94	1126.63	7	[63,78]
2011-07	—	—	—	970.63	497.80	686.93	10	[64]
2013-04	—	—	1 909.50	—	—	568.40	33	[12]
2013-04	1 875.19	1 635.46	1 737.16	860.06	564.00	689.60	33	[38]
2013-07	—	—	2 079.80	—	—	417.30	33	[12]
2013-11	—	—	—	926.96	681.38	841.54	23	[35]
2015-11	1 342.41	978.33	1 087.56	754.05	512.15	584.72	30	本研究

1) “—” 表示文献中没有数据

2.2 间隙水溶解态氮、磷分布特征

沉积物间隙水溶解态氮磷浓度可直接影响沉积

物与上覆水之间的营养盐交换, 有研究表明沉积物 DTP 释放速率与藻类生长速率呈同步变化趋势^[79].

本研究中,巢湖表层沉积物间隙水 DTN、DTP、DOP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度分别为 $1.85 \sim 7.54$ 、 $0.16 \sim 1.10$ 、 $0.15 \sim 1.08$ 和 $0.006 \sim 0.038 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,全湖平均值分别为 3.49 、 0.39 、 0.35 和 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中西湖区南淝河入湖口附近 DTN 浓度和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 $7.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.038 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均低于咎逢宇等^[32]在 2009 年的研究结果 ($8.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。张民等^[42]的研究也发现 2013 年巢湖污染程度较 2012 年有所降低,主要入湖污染河口的营养盐浓度均有降低,这些现象可能是“十二五”期间巢湖水污染治理投入加大的效果体现。龚莹等^[35]在 2013 年使用 DGT 获取的沉积物高分辨信息也表明南淝河口处 DGT-P 浓度较高,磷的生物有效性较强。此外,南淝河沉积物磷释放通量明显高于湖体,是湖体磷的重要输入源^[26]。

全湖 DTN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分布特征均为自西向东降

低的趋势,但与 DTP 和 DOP 的空间分布特征有所差异(图 5)。本研究中,沉积物间隙水中 DOP 含量占 DTP 含量的 80% 以上,因此二者分布特征相似,且与沉积物有机磷分布相关,巢湖沉积物有机磷含量分布特征为东湖区 > 西湖区 > 中湖区^[35],与本研究 DOP 分布(东、西、中湖区含量分别为 0.39 、 0.38 和 $0.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)较为一致。间隙水中部分 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 来源于 DOP 的矿化,东湖区高浓度的间隙水 DOP 具有增加 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量的潜力。西湖区沉积物活性磷(弱吸附态磷和铁铝结合态磷)含量较高^[12],该组分磷极易释放磷酸盐到间隙水中,并梯度扩散至上覆水,导致蓝藻水华的暴发;刘成等^[30]也观测到西部重污染汇流湾区存在较高的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放通量。因此,巢湖西湖区沉积物高溶解态氮磷为水体主要污染源,东湖区较高的 DOP 浓度对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量的增加有促进作用,增加沉积物内源磷释放的风险。

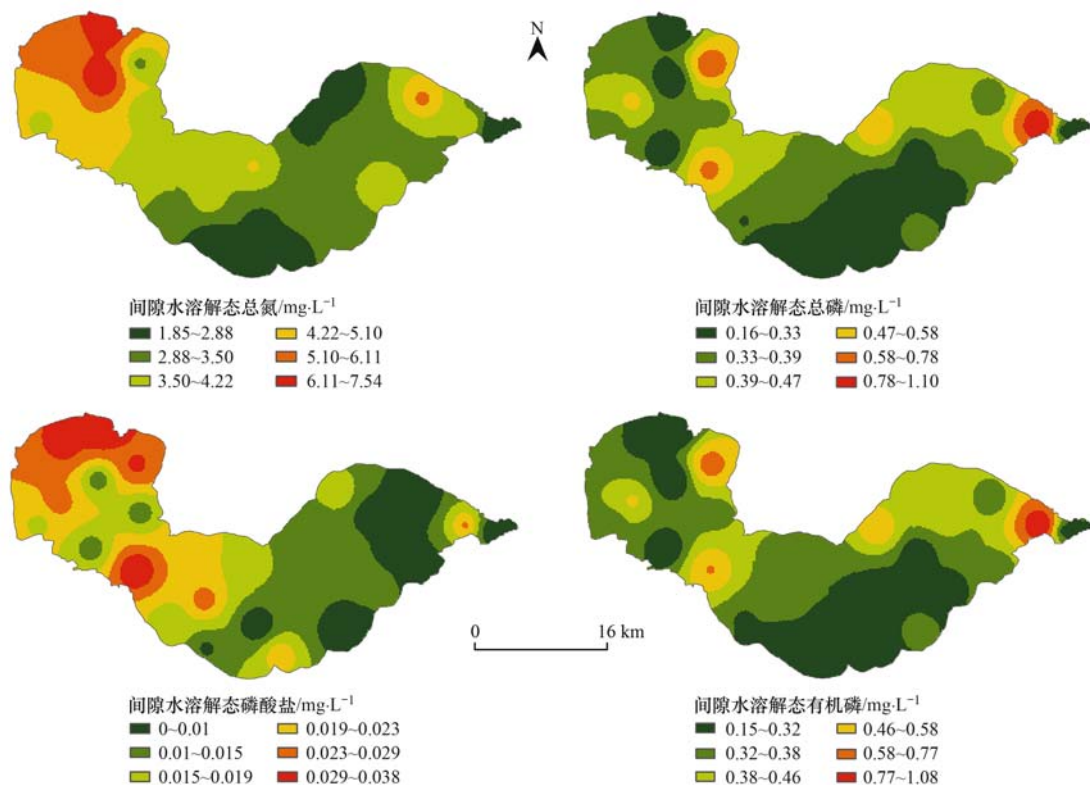


图 5 巢湖表层沉积物间隙水溶解态氮磷含量空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of dissolved nitrogen and dissolved phosphorus concentrations in the pore water of surface sediments in Lake Chaohu

2.3 沉积物氮、磷储量及相关性分析

根据巢湖沉积物总氮和总磷含量,结合沉积物厚度(图 6),可以估算出现状条件下沉积物总氮和总磷蓄积量。巢湖西湖区沉积物平均厚度为 $(80.89 \pm 29.8) \text{ cm}$,中湖区为 $(33.14 \pm 18.4) \text{ cm}$,东湖区为 $(64.00 \pm 18.4) \text{ cm}$,全湖平均为 $(56.65 \pm 29.9) \text{ cm}$ 。全湖平均 TN 和 TP 含量分别为 $(877 \pm 302) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

和 $(547 \pm 168) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,估算出现状条件下沉积物 TN 和 TP 储量分别为 $0.49 \times 10^5 \sim 3.2 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $0.32 \times 10^5 \sim 1.97 \times 10^5 \text{ t}$,平均氮磷储量分别为 $1.58 \times 10^5 \text{ t}$ 和 $0.98 \times 10^5 \text{ t}$ 。与 2008 年的研究结果^[57]相比,巢湖沉积物厚度增加了约 22 cm,氮磷含量和总储量也随之大幅度增加。由于近年来泥沙携带的污染物入湖后可能使湖盆形态改变,伴随着水文与水力学的一系

列变化,由风浪引起的扰动和湖水的混合作用,增加了沉积物磷的再悬浮风险,导致颗粒态的磷随之迁移到光合营养层,成为浮游藻类的磷源,使河口等污染严重的水域藻类生物量明显增高^[66,79,80].

对巢湖沉积物氮、磷含量进行相关性分析发现,西湖和中湖区的平均 TN 与 TP 之间具有极显著的正相关关系(图 7),表明西湖区和中湖区表层沉积物 TN 与 TP 可能存在相同的污染来源;同时也侧面验证了空间分布特征的一致性,即西部最高、东部次之、中部最低. 氮磷之间显著的相关关系与长荡湖表层沉积物规律相同^[81],但与太湖流域的研究结果有所差异^[82]. 此外,中湖区和东湖区的表层沉积物 TN 与沉积物厚度呈显著相关($P < 0.01$,文中未显示). 表明 TN 含量直接受沉积物输入的影响,沉积物作为氮磷的汇储存着大量营养盐,沉积物疏浚可能会对内源污染有一定的缓解作用.

2.4 沉积物氮、磷污染特征评价

沉积物单项和综合污染指数受氮磷评价基准值的影响,不同基准值下单项污染评价指数(S_{TN} 和 S_{TP})存在一定差异. 目前通常使用的沉积物氮磷评价基准值有 4 套(表 3). 其中,中国东部典型湖泊沉积物的 TN 基准评价值最高($1\,111\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),该值侧重沉积物营养盐对藻类的生物效应^[83],约为加拿大 TN 基准值($550\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 2 倍,和美国的 TN 基准值($1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相当,加拿大和美国的基准值侧重考虑沉积物对底栖类生物没有中毒效应时的安全值^[70,84]. 加拿大 TP 基准评价值最高($600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而其它 3 种方法的 TP 评价基准值相当. 以能引起最低级别生态风险效应的加拿大氮磷阈

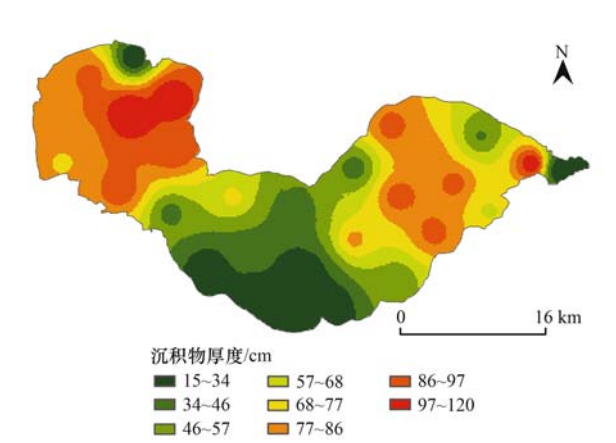


图 6 巢湖沉积物厚度空间分布特征
Fig. 6 Spatial distribution characteristics of sediment thickness in Lake Chaohu

值^[84]和太湖 1960 年沉积物氮磷背景值^[85]作为评价的两种评价方法的氮污染和综合污染程度均为中度,而磷的污染程度分别为轻度和中度. 以美国沉积物基准值^[70]和中国东部典型湖泊沉积物氮磷基准值^[83]作为评价的两种评价方法的磷污染和综合污染程度分别为中度和轻度,氮污染程度分别为轻度和清洁. 基于以上结果并结合巢湖流域位置,建议选择中国东部湖区的沉积物氮磷阈值或美国沉积物基准值作为巢湖沉积物污染程度评价,除 TN 外,两种评价方法对 TP 污染程度和综合污染程度的评价结果相同(表 3). 本文中选用了美国沉积物基准值进行不同湖区及全湖污染评价,旨在与以往研究结果^[38]进行对比.

巢湖表层沉积物氮磷单项污染指数空间差异较大,整体呈西湖区高、东湖区次之、中湖区较低,且北

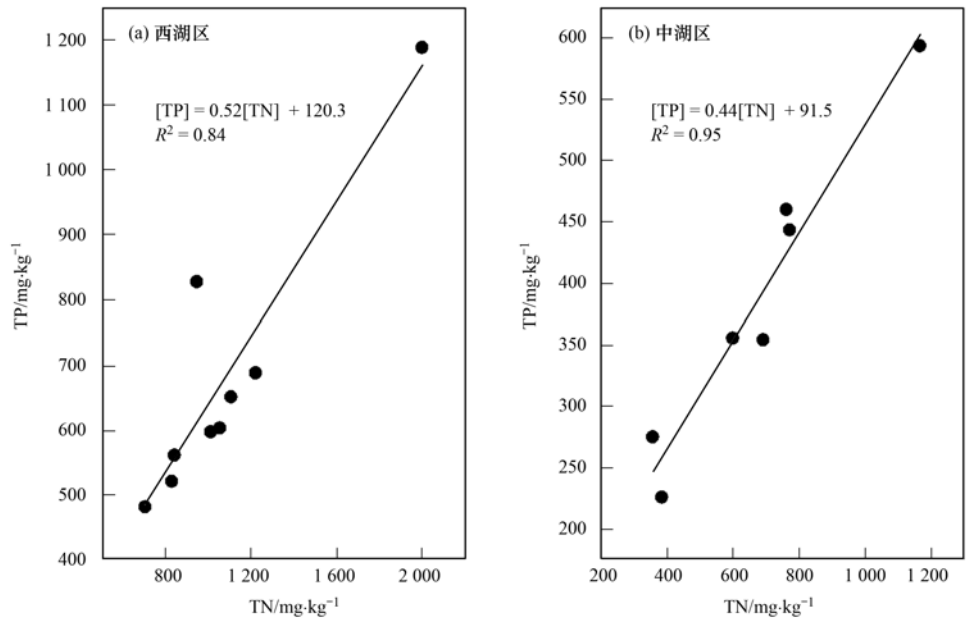


图 7 表层沉积物总氮与总磷相关性
Fig. 7 Correlations between total nitrogen and total phosphorus in surface lake sediments

表 3 不同标准体系下巢湖表层沉积物氮和磷污染综合评价指数

Table 3 Combined pollution assessment of nitrogen and phosphorus in the surface sediments of Lake Chaohu under different evaluation criteria							
评价基准值 ¹⁾		S_{TN}	污染程度	S_{TP}	污染程度	FF	污染程度
TN/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹						
550.00 ^a	600.00 ^a	1.94	中度	0.96	轻度	1.75	中度
670.00 ^b	440.00 ^b	1.60	中度	1.31	中度	1.57	中度
1 000.00 ^c	420.00 ^c	1.09	轻度	1.39	中度	1.32	轻度
1 111.00 ^d	457.00 ^d	0.96	清洁	1.26	中度	1.21	轻度

1) a 表示评价值采用加拿大安大略省环境和能源部 1992 年发布的指南中沉积物能引起最低级别生态风险效应的 TN 和 TP 阈值^[84]; b 表示评价值采用 1960 年太湖沉积物中的氮磷背景值^[85]; c 表示评价值采用美国沉积物基准值^[70]; d 表示评价值采用中国东部典型湖泊(多数位于安徽省)沉积物 TN 和 TP 基准值阈值^[83]

部高于南部的分布特征(表 4 和图 8). TN 和 TP 的单项污染指数范围分别为 0.40 ~ 2.13 和 0.63 ~ 2.84,全湖平均分别为 1.09(轻度污染)和 1.39(中度污染),表层沉积物磷污染程度高于氮;综合污染指数范围为 0.59 ~ 2.67,全湖平均为 1.32(轻度污染). 对于 TN,全湖约 53% 的点位 TN 为轻度污染;西湖区、中湖区和东湖区的表层沉积物污染分别为

轻度($S_{TN} = 1.34$)、清洁($S_{TN} = 0.80$)和轻度污染($S_{TN} = 1.07$),其中西湖区十五里河入湖口附近已达到重污染水平($S_{TN} > 2.0$). 对于 TP,全湖约 60% 的点位的 TP 属于中度污染;西湖区、中湖区和东湖区的表层沉积物污染分别为重度污染($S_{TP} = 1.80$)、轻度($S_{TP} = 0.99$)和中度污染($S_{TP} = 1.33$),西湖区 67% 的点位 TP 达到重污染水平($S_{TP} > 1.5$). 巢湖西、中和东湖区的综合污染指数分别为 1.69(中度)、0.94(清洁)和 1.27(轻度). 以上结果表明巢湖西湖区磷污染相对较严重,西湖区、中湖区和东湖区沉积物污染程度存在明显差异,侧面验证了本文将巢湖划分为 3 个部分研究的合理性.

表 4 巢湖表层沉积物氮和磷污染综合评价指数^[70]

Table 4 Combined pollution assessment of nitrogen and phosphorus in the surface sediments of Lake Chaohu						
研究区域	TN 评价指数		TP 评价指数		综合污染指数	
	S_{TN}	污染程度	S_{TP}	等级	FF	污染程度
西湖区	1.34	轻度	1.80	重度	1.69	中度
中湖区	0.80	清洁	0.99	轻度	0.94	清洁
东湖区	1.07	轻度	1.33	中度	1.27	轻度
全湖平均	1.09	轻度	1.39	中度	1.32	轻度

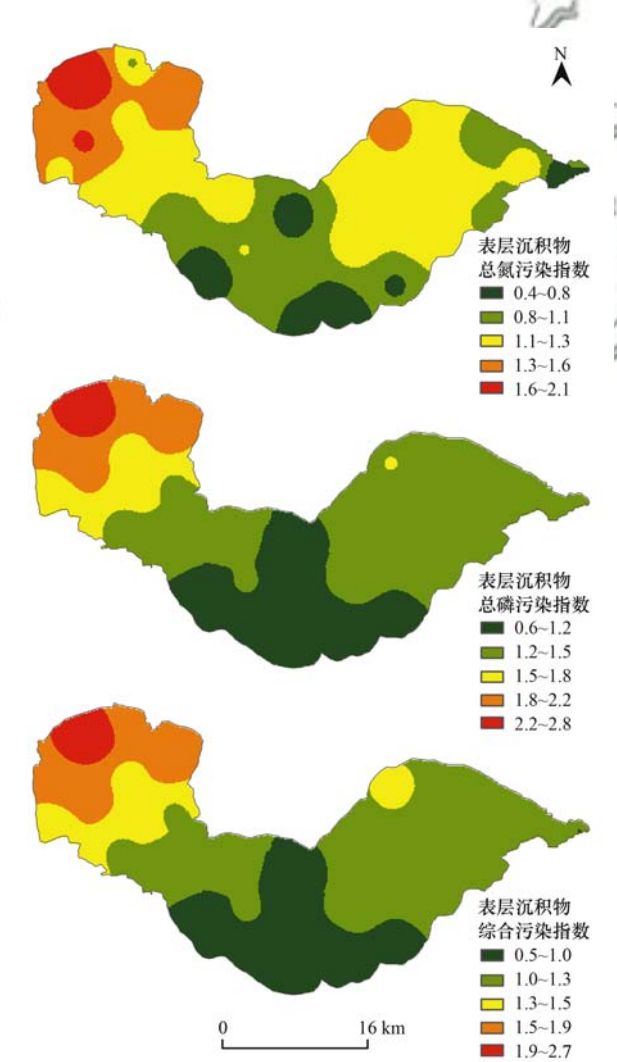


图 8 巢湖表层沉积物氮磷单项与综合污染指数分布

Fig. 8 Spatial distribution of individual and combined pollution indexes of nitrogen and phosphorus in the surface sediments of Lake Chaohu

目前关于巢湖沉积物氮磷污染评价的研究相对较少,且不同湖泊沉积物污染评价采用不同氮磷评价基准值. 本研究中巢湖表层沉积物氮磷评价基准值与 2013 年的研究相同^[38],然而单项污染指数和综合污染指数均低于前人结果,但污染指数空间分布特征与前人研究结果相似^[38],污染指数偏低可能由于采样深度不同引起的氮磷含量偏低造成的. 针对同属长江流域的太湖表层沉积物污染评价的基准值多选用 1962 年太湖沉积物背景值^[85],结果为太湖湖滨带除东太湖和竺山湾属重度污染外其它各区属轻中度污染^[71]. 针对同属长江流域且与太湖临近的阳澄湖表层沉积物污染评价选用的评价值与本文相同^[70],结果为全湖沉积物 TN 处于中度污染状态,综合污染基本处于中度污染状态. 针对洞庭湖沉积物氮磷污染使用加拿大安大略省基准值的评价研究得出,表层沉积物总磷为轻度污染水平^[86]. 与

以上研究中湖泊沉积物污染评价结果相比,巢湖沉积物氮磷污染水平相对较低。

巢湖表层沉积物氮磷污染空间分布特征与其外源污染输入有关。有研究表明^[87],沉积物氮磷一部分来源于水生生物残体,另一部分来源于外源营养盐输入后的沉降。巢湖水体污染物主要来源于农业面源污染和城市生活污水,两者占 80% 以上^[42],内源磷负荷约占外源负荷的 9%^[88]。巢湖西部重污染汇流湾区的表层沉积物污染水平相对较高,主要由于西部入湖河流中南淝河、十五里河和塘西河等流经合肥市,而此区域人口密集,流域内进行着较多的工农业活动,排放的大量氮磷营养盐随地表径流汇入巢湖^[55,72,89,90],进而沉降至沉积物中,导致沉积物污染水平高于中湖区和东湖区。东湖区相比中湖区氮磷污染水平相对偏高,原因一可能为巢湖闸的建立引起的一系列水文条件改变,使大量污染物不能及时顺闸排出,淤积在东部湖区造成的;原因二可能为巢湖东北部烔埭河流域土壤分布着富磷矿层^[91],且东湖区流域土壤氮磷含量显著高于西湖区流域^[21,92],磷矿石及土壤中的部分氮磷组分随着地表径流进入巢湖造成污染;原因三可能为巢湖北部入湖河流双桥河承纳了巢湖市生活污水、工业废水,是污染较为严重的城市污染控制型河流^[89,93],而柘皋河两岸主要为农田,农田氮素流失也是导致巢湖东湖区氮污染指数相对较高的主要原因。巢湖南部的主要入湖河流为兆河,兆河区域人口相对较少,农田相对较多,南部湖体主要污染来自于农业面源污染。

3 结论

(1) 巢湖西、中、东湖区表层沉积物 TN 含量分别为 1 342、797 和 1 069 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 含量分别为 754、416 和 560 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全湖表层沉积物 TN 含量显著高于底层 ($P < 0.01$)。全湖沉积物总氮、总磷、间隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 DTN 含量空间分布整体表现为西部高、东部次之、中部最低,西湖区间隙水高溶解态氮磷含量增加内源营养盐释放的风险。

(2) 全湖沉积物总氮和总磷储量分别为 $1.58 \times 10^5 \text{t}$ 和 $0.98 \times 10^5 \text{t}$; 表层沉积物 TN 与 TP 含量在西湖区和中湖区均呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 中湖区和东湖区表层沉积物 TN 与沉积物厚度显著相关。表明西湖区和中湖区沉积物氮磷可能存在相同的污染源,表层沉积物较高的 TN 水平与淤泥厚度有直接关系,东湖区沉积物的大量淤积值得关注。

(3) 依据污染指数评价标准,十五里河、南淝河等西部入湖区域表层沉积物总磷污染水平已达 4 级,为重度污染,中湖区为轻度污染,东湖区为中度

污染,全湖平均呈中度污染;全湖平均单项氮污染和综合污染等级均为 2 级,呈轻度污染。全湖氮磷污染空间分布不均,西湖区表层沉积物磷存在较大的安全风险。

参考文献:

- [1] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [2] Paerl H W, Gardner W S, McCarthy M J, *et al.* Algal blooms: noteworthy nitrogen [J]. *Science*, 2014, **346**(6206): 175.
- [3] Søndergaard M, Lauridsen T L, Johansson L S, *et al.* Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover [J]. *Hydrobiologia*, 2017, **795**(1): 35-48.
- [4] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: where do we go from here? [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, **24**(4): 201-207.
- [5] Schindler D W, Hecky R. Reply to Howarth and Paerl: is control of both nitrogen and phosphorus necessary? [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(49), doi: 10.1073/pnas.0809744105.
- [6] Scavia D, Allan J D, Arend K K, *et al.* Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie: central basin hypoxia [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(2): 226-246.
- [7] Lewis Jr W M, Wurtsbaugh W A, Paerl H W. Control of lacustrine phytoplankton by nutrients: erosion of the phosphorus paradigm [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2008, **93**(4-5): 446-465.
- [8] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy [J]. *Water Research*, 2011, **45**(5): 1973-1983.
- [9] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake [J]. *Science*, 2007, **317**(5842): 1166.
- [10] Schindler D W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(1): 356-363.
- [11] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 427-442.
- [12] 孔明, 张路, 尹洪斌, 等. 蓝藻暴发对巢湖表层沉积物氮磷及形态分布的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1285-1292.
- [13] Kong M, Zhang L, Yin H B, *et al.* Influence of algae bloom on distribution of total and speciation of nitrogen and phosphorus in the surface sediments from Lake Chaohu [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1285-1292.
- [14] Mohajeri L, Aziz H A, Isa M H, *et al.* A statistical experiment design approach for optimizing biodegradation of weathered crude oil in coastal sediments [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(3): 893-900.
- [15] Xu D, Chen Y F, Ding S M, *et al.* Diffusive gradients in thin films technique equipped with a mixed binding gel for simultaneous measurements of dissolved reactive phosphorus and dissolved iron [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(18): 10477-10484.
- [16] 高丽, 杨浩, 周健民. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展 [J].

- 土壤, 2004, **36**(1): 12-15.
- Gao L, Yang H, Zhou J M. Research progress on phosphorus release from lake sediments[J]. *Soils*, 2004, **36**(1): 12-15.
- [16] 杨丽原, 王晓军, 刘恩峰. 南四湖表层沉积物营养元素分布特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2007, (2): 40-44.
- Yang L Y, Wang X J, Liu E F. Characteristics of nutrient distribution in surface sediments of Nansihu Lake + [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007, (2): 40-44.
- [17] 李如忠, 洪齐齐, 罗月颖. 巢湖十五里河沉积物污染特征及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(2): 144-151.
- Li R Z, Hong Q Q, Luo Y Y. Pollution characteristics and source analysis of contaminants in bed sediments from Shiwuli River, Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(2): 144-151.
- [18] Yang L B, Yan W J, Ma P, *et al.* Seasonal and diurnal variations in N_2O concentrations and fluxes from three eutrophic rivers in Southeast China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, **21**(5): 820-832.
- [19] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- Li R Z, Li F, Zhou A J, *et al.* Distribution and bioavailability of nitrogen and phosphorus species in the sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [20] 李峰. 巢湖十五里河沉积物氮磷污染特征及间隙水营养盐浓度模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- Li F. Contamination characteristics of nitrogen and phosphorus in sediments and simulation of its profile concentration in pore water from Shiwuli River in Chaohu Lake[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [21] Fan R G, Wang C C, Chu Z S, *et al.* Study on spatial distribution of OM, N, P in surface soil around Lake Chaohu [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, **5**(6): 585-590.
- [22] 王广召, 方涛, 唐巍, 等. 疏浚对巢湖重污染入湖河流沉积物中污染物赋存及释放的影响[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(6): 837-843.
- Wang G Z, Fang T, Tang W, *et al.* Long-term effects of dredging on pollutant distribution in sediments of a heavily polluted inflow river [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(6): 837-843.
- [23] 李如忠, 张亮. 巢湖十五里河不同水力特性区沉积物及间隙水营养盐的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 2960-2968.
- Li R Z, Zhang L. Distribution characteristics of nutrients in core sediments and interstitial water from different hydraulic property zones in Shiwuli Stream, Chaohu Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 2960-2968.
- [24] 李如忠, 李峰, 周爱佳. 巢湖十五里河水花生长期沉积物及间隙水中营养盐的基本特性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3014-3023.
- Li R Z, Li F, Zhou A J. Sediment and pore water nutrient characteristics in growing zones of *Alternanthera philoxeroides* in the Shiwuli River, Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3014-3023.
- [25] 李慧, 曹秀云, 宋春雷, 等. 巢湖及其入湖河流(南淝河)沉积物磷形态与吸附行为的垂直变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(S2): 3-9.
- Li H, Cao X Y, Song C L, *et al.* Vertical variations in fractionations and sorption behaviors of phosphorus in sediments of Lake Chaohu and a river (the Nanfei River) entering it [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(S2): 3-9.
- [26] 王艳平, 关庆伟, 李超, 等. 巢湖沉积物有效态磷与硫的DGT原位同步分析研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(8): 2512-2518.
- Wang Y P, Guan Q W, Li C, *et al.* A study of *in situ* synchronous measurement of available phosphorus and sulfur in the sediments of Lake Chaohu by diffusive gradients in thin films (DGT) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2512-2518.
- [27] 李强, 尹俊华, 席北斗, 等. 巢湖入湖河流沉积物中有机磷的形态分级研究[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(2): 441-447.
- Li Q, Yin J H, Xi B D, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of inflow rivers of Lake Chaohu, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(2): 441-447.
- [28] 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 1031-1037.
- Liu C, Shao S G, Fan C X, *et al.* Pollution status and risk assessment of heavy metal in the sediment of the severe polluted confluence area of Lake Chaohu [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 1031-1037.
- [29] 余秀娟, 霍守亮, 咎逢宇, 等. 巢湖表层沉积物中重金属的分布特征及其污染评价[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(2): 439-450.
- Yu X J, Huo S L, Zan F Y, *et al.* Distribution characteristics and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(2): 439-450.
- [30] 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物营养盐分布与释放风险[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(11): 1258-1264.
- Liu C, Shao S G, Fan C X, *et al.* Distribution and release risk of nutrients in the sediments of heavily polluted Confluence Bay of Chaohu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(11): 1258-1264.
- [31] 刁晓君, 李一葳, 何彦芳, 等. 水华生消过程中巢湖水体和沉积物理化性质变化特征[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1124-1132.
- Diao X J, Li Y W, He Y F, *et al.* Change characteristics of physico-chemical properties of water and sediment during the processes of algal blooms formation, outbreak and extinction in Lake Chaohu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1124-1132.
- [32] 咎逢宇, 霍守亮, 席北斗, 等. 巢湖近代沉积物及其间隙水中营养物的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(10): 2088-2096.
- Zan F Y, Huo S L, Xi B D, *et al.* Characteristics of nutrient profiles in sediments and pore water of Lake Chaohu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(10): 2088-2096.
- [33] 汤宝靖, 陈雷, 姜霞, 等. 巢湖沉积物磷的形态及其与间隙水磷的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(9): 1867-1873.
- Tang B J, Chen L, Jiang X, *et al.* Phosphorus speciations in sediments and their relationships with soluble phosphorus concentrations in porewater in Lake Chaohu [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(9): 1867-1873.
- [34] 李国莲, 谢发之, 张瑾, 等. 巢湖水及沉积物中总磷的分布变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(5): 830-

836.
Li G L, Xie F Z, Zhang J, *et al.* Spatial and temporal variation of phosphorus in water and sediment from Chaohu Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(5): 830-836.
- [35] 龚莹, 王宁, 李玉成, 等. 巢湖水体-沉积物磷形态与有效性 [J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(3): 359-365.
Gong Y, Wang N, Li Y C, *et al.* Forms and bioavailability of phosphorus in water and sediments of Lake Chaohu [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(3): 359-365.
- [36] Yang L, Lei K, Yan W, *et al.* Internal loads of nutrients in Lake Chaohu of China; implications for lake eutrophication [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2013, **7**(4): 1021-1028.
- [37] 温胜芳, 单保庆, 张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2322-2329.
Wen S F, Shan B Q, Zhang H. Spatial distribution character of phosphorus fractions in surface sediment from Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2322-2329.
- [38] 苗慧, 沈峥, 蒋豫, 等. 巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价 [J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(12): 2120-2125.
Miao H, Shen Z, Jiang Y, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- [39] 陈航, 曹昕鑫, 秦汝, 等. 巢湖东部水源区及入湖河流水体磷形态特征和来源探讨 [J]. *上海环境科学*, 2012, **31**(6): 260-264.
Chen H, Cao X X, Qin R, *et al.* Speciations character and sources of phosphorus in the eastern water source areas and inflow rivers of Chaohu Lake [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2012, **31**(6): 260-264.
- [40] Xu F L. Exergy and structural exergy as ecological indicators for the development state of the Lake Chaohu ecosystem [J]. *Ecological Modelling*, 1997, **99**(1): 41-49.
- [41] 屠清瑛. 巢湖富营养化研究 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [42] 张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略 (1984-2013 年) [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 791-798.
Zhang M, Kong F X. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 791-798.
- [43] Zhang X K, Liu X Q, Wang H Z. Developing water level regulation strategies for macrophytes restoration of a large river-disconnected lake, China [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **68**: 25-31.
- [44] Kong X Z, Dong L, He W, *et al.* Estimation of the long-term nutrient budget and thresholds of regime shift for a large shallow lake in China [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **52**: 231-244.
- [45] Chen X, Yang X D, Dong X H, *et al.* Environmental changes in Chaohu Lake (southeast, China) since the mid 20th century: the interactive impacts of nutrients, hydrology and climate [J]. *Limnologia*, 2013, **43**(1): 10-17.
- [46] Kong X Z, He Q S, Yang B, *et al.* Hydrological regulation drives regime shifts: evidence from paleolimnology and ecosystem modeling of a large shallow Chinese lake [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(2): 737-754.
- [47] Zhang Z M, Gao J F, Gao Y N. The influences of land use changes on the value of ecosystem services in Chaohu Lake Basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(1): 385-395.
- [48] 黄木易, 何翔. 巢湖流域土地景观格局变化及生态风险驱动力研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(5): 743-750.
Huang M Y, He X. Study on landscape pattern changes and driving forces of ecological risk in chaohu lake basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(5): 743-750.
- [49] Zan F Y, Huo S L, Xi B D, *et al.* A 100-year sedimentary record of natural and anthropogenic impacts on a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(3): 804-816.
- [50] 张之源, 王培华, 张崇岱. 巢湖营养化状况评价及水质恢复探讨 [J]. *环境科学研究*, 1999, **12**(5): 45-48.
Zhang Z Y, Wang P H, Zhang Z D. Study on the eutrophication in Chaohu Lake and its remediation [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, **12**(5): 45-48.
- [51] 张海燕, 李簪. 巢湖水体富营养化成因分析及对策研究 [J]. *疾病控制杂志*, 2005, **9**(3): 271-272.
Zhang H Y, Li J. An analysis on the cause and preventive strategy of eutrophication in Chaohu Lake [J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2005, **9**(3): 271-272.
- [52] Yang L B, Lei K, Meng W, *et al.* Temporal and spatial changes in nutrients and chlorophyll- α in a shallow lake, Lake Chaohu, China: an 11-year investigation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(6): 1117-1123.
- [53] Authority bureau of Lake Chaohu [EB/OL]. <http://chglj.hefei.gov.cn/>, 2018-01-01.
- [54] Shang G P, Shang J C. Causes and control countermeasures of eutrophication in Chaohu Lake, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2005, **15**(4): 348-354.
- [55] 奚姗姗, 周春财, 刘桂建, 等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 542-547.
Xi S S, Zhou C C, Liu J J, *et al.* Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 542-547.
- [56] 潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(1): 43-47.
Pan C R, Wang J Q, Zheng Z X, *et al.* Forms of phosphorus and nitrogen existing in sediments in Chaohu Lake [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, **23**(1): 43-47.
- [57] 夏守先, 杨丽标, 张广萍, 等. 巢湖沉积物-水界面磷酸盐释放通量研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(2): 322-327.
Xia S X, Yang L B, Zhang G P, *et al.* Benthic flux of phosphate across sediment-water interface in Lake Chaohu [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(2): 322-327.
- [58] 徐康, 刘付程, 安宗胜, 等. 巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3255-3263.
Xu K, Liu F C, An Z S, *et al.* Spatial and temporal variations of phosphorus forms in surface sediments of Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(11): 3255-3263.
- [59] Liu E F, Shen J, Yang X D, *et al.* Spatial distribution and human contamination quantification of trace metals and phosphorus in the sediments of Chaohu Lake, a eutrophic shallow lake, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(4): 2105-2118.
- [60] 刘恩峰, 杜臣昌, 羊向东, 等. 巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3024-3030.
Liu E F, Du C C, Yang X D, *et al.* Enrichment characteristic of

- phosphorus in surface and core sediments of Chaohu Lake and the pollution quantification[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3024-3030.
- [61] Zan F Y, Huo S L, Xi B D, *et al.* Phosphorus distribution in the sediments of a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**(8): 1643-1653.
- [62] Ding S M, Han C, Wang Y P, *et al.* In situ, high-resolution imaging of labile phosphorus in sediments of a large eutrophic lake[J]. *Water Research*, 2015, **74**: 100-109.
- [63] Li H, Sun A H, Hou J, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics, and its release in sediments of a Chinese eutrophic river (Nanfei River) [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, **23**(5): 1222-1231.
- [64] Zhang W Q, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Characteristics of phosphorus compounds and their effects in sediments of an eutrophic Chaohu Lake, China[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2015, **43**(4): 544-550.
- [65] 王绪伟, 王心源, 封毅, 等. 巢湖沉积物总磷含量及无机磷形态的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(4): 56-59.
Wang X W, Wang X Y, Feng Y, *et al.* Study on content of total phosphorus and forms of inorganic phosphorus in sediments of Chaohu Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **21**(4): 56-59.
- [66] Zhang Y C, Ma R H, Zhang M, *et al.* Fourteen-Year record (2000-2013) of the spatial and temporal dynamics of floating algae blooms in Lake Chaohu, observed from time series of MODIS images[J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(8): 10523-10542.
- [67] Lewis G N, Auer M T, Xiang X Y, *et al.* Modeling phosphorus flux in the sediments of Onondaga Lake: insights on the timing of lake response and recovery [J]. *Ecological Modelling*, 2007, **209**(2-4): 121-135.
- [68] 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.
Jin X C, Tu Q Y. Specification for lake eutrophication investigation (2nd ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [69] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. *海洋与湖沼*, 2007, **38**(2): 111-117.
Yue W Z, Huang X P, Sun C C. Distribution and pollution of nitrogen and phosphorus in surface sediments from the Pearl River estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, **38**(2): 111-117.
- [70] 张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005.
Zhang M. The mechanisms of eutrophication and heavy metal pollution in shallow lakes along the Yangze River[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [71] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(4): 703-709.
Wang P, Lu S Y, Wang D W, *et al.* Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(4): 703-709.
- [72] 匡武, 吴蕾, 王翔宇. 巢湖小流域污染源解析及对策措施研究—以十五里河为例[J]. *环境保护科学*, 2015, **41**(5): 67-72.
Kuang W, Wu L, Wang X Y. Study of the pollution source apportionment and countermeasures of small river basin of Chaohu Lake- Taking Shiwulihe River as an example[J]. *Environmental Protection Science*, 2015, **41**(5): 67-72.
- [73] 刘华丽, 曹秀云, 宋春雷, 等. 沉积物疏浚技术在富营养化湖泊修复中的应用[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(2): 87-91, 101.
Liu H L, Cao X Y, Sun C L, *et al.* Application of sediment dredging technology for restoration of eutrophic lakes [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, **34**(2): 87-91, 101.
- [74] 李如忠, 李峰. 巢湖十五里河沉积物生物有效性氮磷分布及相关性[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(8): 873-881.
Li R Z, Li F. Distribution and correlation analysis of bio-available nitrogen and phosphorus in sediments of Shiwuli River, Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(8): 873-881.
- [75] 姜霞, 钟立香, 王书航, 等. 巢湖水华暴发期水-沉积物界面溶解性氮形态的变化[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(11): 1158-1163.
Jiang X, Zhong L X, Wang S H, *et al.* Dissolvable nitrogen variation at water-sediment interface during alga blooming process in Chaohu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(11): 1158-1163.
- [76] 王书航, 姜霞, 钟立香, 等. 巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 946-953.
Wang S H, Jiang X, Zhong L X, *et al.* Seasonal occurrence characteristics of different forms of nitrogen in the sediments of Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 946-953.
- [77] Xu F L, Tao S, Dawson R W, *et al.* The distributions and effects of nutrients in the sediments of a shallow eutrophic Chinese lake[J]. *Hydrobiologia*, 2003, **492**(1-3): 85-93.
- [78] Ding W, Zhu R B, Hou L J, *et al.* Matrix-bound phosphine, phosphorus fractions and phosphatase activity through sediment profiles in Lake Chaohu, China[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, **16**(5): 1135-1144.
- [79] Huang J, Xu Q J, Xi B D, *et al.* Impacts of hydrodynamic disturbance on sediment resuspension, phosphorus and phosphatase release, and cyanobacterial growth in Lake Tai[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3945-3954.
- [80] 金相灿, 屠清瑛. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [81] 朱林, 汪院生, 邓建才, 等. 长荡湖表层沉积物中营养盐空间分布与污染特征[J]. *水资源保护*, 2015, **31**(6): 135-140.
Zhu L, Wang Y S, Deng J C, *et al.* Spatial distribution and contamination characteristics of nutrients in surface sediment of Changdang Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(6): 135-140.
- [82] 杨洋, 刘其根, 胡忠军, 等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3057-3064.
Yang Y, Liu Q G, Hu Z J, *et al.* Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- [83] 王健, 张靖天, 咎逢宇, 等. 中国东部浅水湖泊沉积物总氮总磷基准阈值研究[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(6): 992-999.
- [84] Mudroch A, Azcue D J M. Manual of aquatic sediment sampling

- [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995.
- [85] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Wang S M, Dou H S. History of Chinese lake[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [86] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J]. 水生生态学杂志, 2015, **36**(2): 25-31.
Zhang G G. Characterization and ecological risk assessment of nutrients and heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2015, **36**(2): 25-31.
- [87] 王玲玲, 吴卫菊, 张斌, 等. 梁子湖沉积物中重金属及营养盐分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(6): 197-203.
Wang L L, Wu W J, Zhang B, *et al.* Distribution characteristic of heavy metals and nutrient in sediments of Liangzi Lake[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(6): 197-203.
- [88] Wang Y P, Kong X Z, Peng Z L, *et al.* Retention of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu, China: implications for eutrophication management [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-10024-7.
- [89] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2834-2839.
Wang S H, Jiang X, Jin X C. Classification and pollution characteristic analysis for inflow rivers of Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2011, **32**(10): 2834-2839.
- [90] 刘姝, 孔繁翔, 蔡元锋, 等. 巢湖四条入湖河流硝态氮污染来源的氮稳定同位素解析[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 952-956.
Liu S, Kong F X, Cai Y F, *et al.* Nitrogen stable isotope study on nitrate nitrogen pollution of four inflowing rivers of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(6): 952-956.
- [91] 刘恩峰, 杜臣昌, 羊向东. 巢湖典型小流域表土磷的空间分异特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(5): 1015-1020.
Liu E F, Du C C, Yang X D. Spatial variation of phosphorus in topsoil of a typical watershed in Chaohu Lake Basin and the main controlling factors analysis [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(5): 1015-1020.
- [92] 范荣桂, 王长春, 陈书琴, 等. 巢湖周边地区表层土壤总氮有机质空间分布特征[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(5): 117-120.
Fan R G, Wang C C, Chen S H, *et al.* Spatial distribution of total nitrogen and organic material in surface soil around Chaohu Lake[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(5): 117-120.
- [93] Zhang L, Shao S G, Liu C, *et al.* Forms of nutrients in rivers flowing into Lake Chaohu: a comparison between urban and rural rivers[J]. Water, 2015, **7**(8): 4523-4536.



CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)