

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, 倪茂茂, 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, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策

杨盼^{1,2}, 杨春晖^{1,2}, 马鑫雨^{1,2}, 尹洪斌^{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: 为了解巢湖南淝河河口区域底泥污染特征, 为底泥疏浚提供决策依据, 对该区域底泥中营养物、重金属含量及释放特征进行分析, 并采用有机指数法、污染指数法及潜在生态风险评价对底泥的污染状况进行评估。结果表明, 调查区域总氮(TN)、总磷(TP)以及有机质(OM)的均值为 $1\,461\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $438\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.77% , 在表层(0~10 cm)富集明显, 随着底泥深度增加有逐渐降低的趋势。有机污染指数和污染指数结果表明, 表层底泥(0~10 cm)总氮、有机质处于中度污染状态, 而总磷处于重度污染状态, 且随着底泥深度的增加, 污染风险逐渐降低, 并在30 cm以下处于低风险。静态释放结果发现底泥氨氮(NH_4^+-N)和TP的平均释放通量分别为 $8.04\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.19\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 释放潜力较大, 且与底泥营养物污染区域一致。对于底泥重金属而言, 除Cr和Ni外的其它6种重金属含量均高于安徽省土壤背景值, 其中Hg和Cd的含量超标最为严重, 且重金属潜在生态风险结果表明, 表层(0~20 cm)底泥均处于重污染风险等级, 而30 cm以下底泥重金属降为低风险等级。底泥重金属浸出毒性实验结果表明, 该区域底泥疏浚后重金属释放风险较低, 不属于危险废物。根据以上结果, 综合确定了南淝河口区域的重点疏浚面积(3.93 km^2)和深度(30 cm), 为底泥疏浚提供了重要依据。

关键词: 营养物; 重金属; 底泥污染评价; 疏浚; 南淝河河口; 巢湖

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0712-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202005320

Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake

YANG Pan^{1,2}, YANG Chun-hui^{1,2}, MA Xin-yu^{1,2}, YIN Hong-bin^{1*}

(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: To clarify the endogenous pollution characteristics of sediments in the Nanfei River estuary, Chaohu Lake, and provide a theoretical basis for the dredging works, the organic index, pollution index, and potential ecological risk were determined. The results show that the average total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and organic matter (OM) content of the sediment was $1\,461\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $438\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 1.77% , respectively, showing enrichment in the surface layer (0-10 cm). The nutrient pollution status and TP pollution index show that the organic pollution level was moderate and the TP pollution was severe. Furthermore, the pollution risk gradually reduced with sediment depth, representing a low risk at depths below 30 cm. Static release results showed that the average release fluxes of NH_4^+-N and TP in the sediment were $8.04\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ and $0.19\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, respectively, and showed highest release potentials consistent with areas of sediment nutrient pollution. Except for Cr and Ni, the concentrations of six heavy metals were higher than the soil background values for Anhui Province, and the concentrations of Hg and Cd far exceeded the standards. According to the assessment of potential ecological risk from heavy metals, the 0-20 cm sediments present a high level of risk and sediments below 30 cm have a low level of risk. Heavy metal leaching toxicity indicated that the risk of heavy metal release after dredging is low and non-hazardous. These results were used to determine the key dredging area (3.93 km^2) and depth (30 cm) for the Nanfei River estuary, providing an important basis for future dredging activities.

Key words: nutrients; heavy metals; sediment pollution assessment; dredging; Nanfei River estuary; Chaohu Lake

底泥是湖泊生态系统中氮、磷、有机质及重金属等污染物重要的蓄积库, 在外源污染物进入水体初期时, 通过吸附、转化和沉降过程发挥汇作用, 对于湖泊水体具有净化作用^[1,2]。但随着污染物不断排入, 底泥中污染负荷增加最终成为湖泊内源污染源, 通过再悬浮等过程向上覆水体释放污染, 从而对湖泊水体造成长期持续的污染影响^[3,4]。目前治理湖泊内源污染主要有物理、化学和生物这3种手段, 生态清淤疏浚是其中一种重要的物理手段, 指通过工程技术将污染底泥去除, 达到减少湖泊内源污染负荷和生态风险的目的, 具有增加库容, 能彻底治理多种污染

的优势^[5~7]。

巢湖位于我国东部地区的安徽省, 是我国五大淡水湖之一, 除了为周边城市提供重要的饮用水源外, 同时在渔业、工农业灌溉、防洪等方面发挥着重要作用^[8]。巢湖多年来受人类活动和自然环境影响, 水质不断恶化, 1995年以来一直处于严重富营养化状态,

收稿日期: 2020-05-30; 修订日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977363); 中国科学院交叉团队项目(JCTD-2018-16); 中国科学院重点部署项目(ZDBS-LY-DQC018)

作者简介: 杨盼(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊生态环境工程, E-mail: ypan1995@126.com

* 通信作者, E-mail: hbyin@niglas.ac.cn

成为中国污染最严重的 3 个淡水湖之一,其中西半湖的污染状况更为严重^[3,8~10]。南淝河作为巢湖西半湖污染最为突出的入湖河流,流经合肥市向东南注入巢湖,沿途汇入多条支流,吸纳大量生活污水及工、农业废水,导致其入湖河口长期处于富营养状态,底泥污染物种类多且污染程度严重,并且污染物有随水流向湖心方向蔓延的趋势^[11,12],引起了相关部门的重视并拟采取生态清淤工程进行治理。

生态清淤疏浚工程可以同时快速消除底泥内源的多种污染物,提升水质,在过去的数十年被广泛应用于世界各地多个受污染湖泊底泥的治理过程,如美国的 Lake Erie 与 Lake Ontario^[13]、瑞典的 Lake Trummen^[14]、以及我国的太湖^[15]、滇池^[16]和玄武湖^[17]等湖泊均开展过不同规模的疏浚工程。生态清淤疏浚需要去除污染的底泥层,适当的疏浚深度可以形成环境良好的新生表层,减少底泥内源污染释放。疏浚工程的实施通常需要耗费大量的人力和物力,疏浚不当还可能损害湖泊生态系统,因此在底泥疏浚前需开展大量前期工作调查污染物类型及污染程度,以避免资源的过度使用及底泥污染的快速回复^[18]。本研究对南淝河河口拟疏浚区域进行了底泥淤积分布和污染状况调查,掌握其底泥中总氮(TN)、总磷(TP)、有机质(OM)及重金属污染物的平面和垂直分布规律,评估营养盐污染状况,分析重金属生态风险指数及浸出毒性状况,并对底泥中氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和 TP 的静态释放特征进行研究,以期确定疏浚面积、开挖深度及淤泥后续处理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究区域为巢湖西半湖南淝河入湖河口航道以东、巢环路侧的汇流湾区,疏浚水域面积约 10 km²。2019 年 11 月,在该河口大于拟疏浚区域范围,使用手持 GPS 定位设置 41 个采样点(采样点分布情况见图 1),用柱状采样器($\Phi 85 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$)采集无扰动柱状样品并在现场记录各点位的泥深。柱状样品采集后根据实际底泥深度按照 0~10、10~20、20~30、30~50 和 50~100 cm 使用上顶法对其进行垂向分层分割处理,每层样品取其具有代表性的混合样品带回实验室分析,并另在 S5、S13、S16、S21 和 S24 点位采集柱状样品进行静态释放分析。

1.2 样品处理及测定

取混合均匀底泥分层样品放入坩埚中,60℃烘干至恒重,前后称量测其含水率;另取部分样品放入 -20℃ 冰箱冷冻后进行冷冻干燥处理,去除样品中的沙石和动植物残体,研磨后过 100 目(0.154

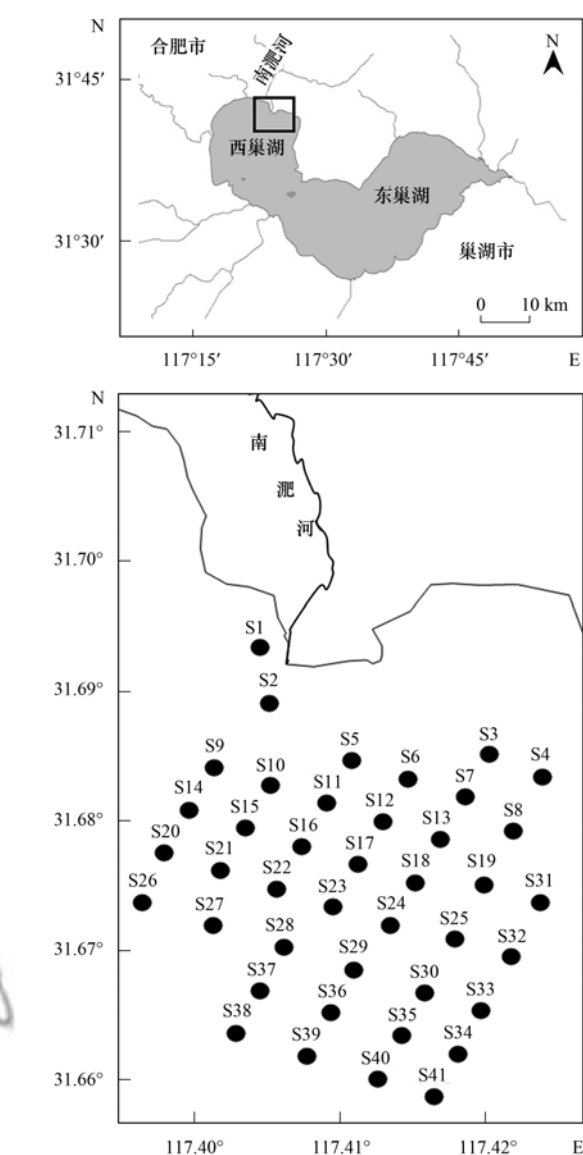


图 1 研究区域采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the studied bay

mm)尼龙分样筛装入密封袋中,贮存于 -20℃ 冰箱中备用。所有底泥样品均需测定 TN、TP 及 OM 含量;另选取 8 个典型采样点(S5、S13、S14、S16、S21、S24、S27、S30)的分层底泥样品测试 pH 和重金属含量、浸出毒性(Cd、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、As、Hg)。

底泥中 pH、总氮、总磷及有机质的测定采用文献[19]中的方法;重金属的测定参考文献[20];底泥浸出毒性的测试采用文献[21]中的浸提方法进行浸出后测定浸出液中重金属含量,其中 Cd、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb 和 As 的测定使用 7700X 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),Hg 的测定使用 Hydra-c 型全自动测汞仪。

1.3 沉积物静态释放通量的测定

使用虹吸法去除原位柱状样品的上覆水,再用虹吸法沿采样管侧壁无扰动缓慢加入滤去颗粒物的

原位巢湖水样 1 L,标注水面刻度,并将同采样点采集的不同柱状样品稳定 24 h 后开始 7 次取样,取样时间分别为 0、6、12、24、36、48 和 72 h,每次在沉积物水界面处取样 100 mL,取样后加入原位巢湖水样 100 mL 并确认水面恢复至相同标注刻度. 采用文献[19]中的方法测试取出水样中 TP 和NH₄⁺-N浓度并采用文献[12]中的公式计算水-沉积物界面的释放通量. 底泥中NH₄⁺-N、TP 释放通量的计算公式如下:

$$r = \frac{\left[V(C_n - C_0) + \sum_{n=1}^n V_{n-1}(C_{n-1} - C_a) \right]}{A \cdot t}$$

式中,*r* 为释放通量,mg·(m²·d)⁻¹; *V* 为上覆水体积,L; *C_n*、*C₀* 和 *C_{n-1}* 分别为第 *n* 次、初始和第 *n* - 1 次采样时某物质的质量浓度,mg·L⁻¹; *C_a* 为水样中所添加物质的质量浓度,mg·L⁻¹; *V_{n-1}* 为第 *n* - 1 次采样体积,L; *A* 为水-沉积物界面面积,m²; *t* 为释放天数,d.

1.4 营养盐状况评价

有机污染指数法是目前采用最多的底泥营养盐评价方法,但缺乏对底泥中磷的评价,而污染指数法可以反映单个因子的污染状况. 本研究采用有机污染指数法对底泥中 C、N 污染进行评价,污染指数法对 TP 的污染状况进行评价,计算方法和评价标准如下^[22]:

$$\begin{aligned} \text{OC} &= \text{OM}/1.724 \\ \text{ON} &= \text{TN} \times 95\% \\ \text{OI} &= \text{OC} \times \text{ON} \\ \text{PI} &= C_i/C_{is} \end{aligned}$$

式中,OC 为有机碳质量分数,% ; OM 为有机质质量分数,% ; ON 为有机氮质量分数,% ; OI 为有机污

染指数; PI 为污染指数; *C_i* 为污染因子(TP)的含量,mg·kg⁻¹; *C_{is}* 为 TP 在底泥中的标准值,本研究根据之前的报道采用 420 mg·kg⁻¹^[23]. OI 和 PI 的评价标准见表 1.

表 1 有机污染指数(OI)及污染指数(PI)评价标准

Table 1 Assessment standards for the sediment organic pollution index (OI) and pollution index (PI)

OI	类型	污染等级	PI	污染程度
<0.05	清洁	I	<0.5	清洁
0.05~0.2	较清洁	II	0.5~1.0	轻度污染
0.2~0.5	尚清洁	III	1.0~1.5	中度污染
≥0.5	有机污染	IV	>1.5	重度污染

1.5 潜在生态风险状况评价

瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法^[24]能综合反映采样区域沉积物中 8 种重金属的污染程度及潜在生态影响^[25,26],计算公式如下:

单项重金属污染指数:

$$C_i = C/C_n$$

式中,*C_i* 为重金属 *i* 的污染指数,*C* 为重金属 *i* 的实测含量,*C_n* 为重金属 *i* 的评价参比值,采用安徽省土壤重金属环境背景值(表 2).

单项重金属 *i* 的潜在生态风险指数:

$$E_i = T_i \cdot C_i$$

式中,*E_i* 为单项重金属 *i* 的潜在生态风险指数; *T_i* 为重金属毒性系数(表 2).

多种重金属的综合潜在生态风险指数为各单项重金属潜在生态风险指数的和:

$$\text{RI} = \sum E_i$$

E_i 和 RI 的潜在生态风险等级如表 3 所示.

表 2 重金属元素背景值及其毒性系数(*T_i*)⁽¹⁾

Table 2 Background content and toxicity coefficients (*T_i*) of heavy metals

重金属	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	Ni
背景值 1/mg·kg ⁻¹	20.4	62.0	26.6	66.5	0.097	9.00	0.033	29.8
背景值 2/mg·kg ⁻¹	35.0	100	35.0	90.0	0.20	15.0	0.15	40.0
毒性系数 (<i>T_i</i>)	5	1	5	2	30	10	40	5

1) 背景值 1 参考文献[27]; 背景值 2 参考文献[28]

表 3 单项(*E_i*)及综合潜在生态风险评价指数(RI)与分级标准

Table 3 Individual (*E_i*) and general (RI) indices and grades of potential ecological risk assessment

<i>E_i</i>	单项潜在生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
<i>E_i</i> < 40	低	RI < 150	低
40 ≤ <i>E_i</i> < 80	中等	150 ≤ RI < 300	中等
80 ≤ <i>E_i</i> < 160	较重	300 ≤ RI < 600	重
160 ≤ <i>E_i</i> < 320	重	RI ≥ 600	严重
<i>E_i</i> ≥ 320	严重		

1.6 数据分析

文中采样点的绘制使用 Surfer 12.0 软件完成;

折线图及柱状图的绘制使用 Origin 8.5 软件完成;相关性分析使用 SPSS 23.0 软件完成;疏浚面积确定使用 Google Earth 定位测量.

2 结果与讨论

2.1 底泥中氮、磷及有机质的分布特征

2.1.1 底泥氮、磷及有机质空间分布特征

研究区域底泥中 TN、TP 和 OM 含量见图 2,所有沉积物样品中 TN 含量为 719 ~ 2 788 mg·kg⁻¹,平均值 1 461 mg·kg⁻¹. 根据美国环保署(EPA)制定的

沉积物 TN 污染评价标准^[29],此调查湾区底泥 TN 平均值在 1 000 ~ 2 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,属于中度污染.各采样点表层底泥中 TN 含量相差较大,TN 含量较高的采样点 (S29、S30) 含量超过 2 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于重度污染,且与南淝河入湖水方向一致,表明南淝河入湖对其河口区底泥总氮污染贡献较大;TN 含量最低值为河口右侧近岸处的 S6,可能是由于该区域经历过多次环保疏浚.

研究湾区底泥中 TP 含量为 200 ~ 890 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 438 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根据美国环保署 (EPA) 制定的沉积物 TP 污染评价标准^[29],属于中度污染.如图 2 所示,各采样点表层沉积物的 TP 含量在空间分布上差异较大,表层沉积物 TP 含量最高区域为中心区域处的 S25 和 S28 采样点,均超过 800

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于重度污染区域.该湾区右侧近岸区域的 TP 含量相对较低,而远离河口区域的 TP 含量升高,可能是此处水流趋于平缓,底泥开始淤积导致.

湖泊底泥中的有机质是内源污染的重要指标之一,也是反映湖泊有机营养程度的重要标志,在氮、磷的迁移释放过程起着重要作用^[30,31].调查湾区沉积物中 OM 如图 2 所示,占底泥的质量分数整体在 0.11% ~ 4.86%,均值为 1.77%,空间分布上表现为中心区域含量较高,河口与湖区区域较低.有研究表明,湖泊底泥中 OM 一般来自城市生活污水和死亡生物有机残体的沉积^[30,31],南淝河流经合肥市区且属于蓝藻暴发严重区域,因此该入湖河口区域的 OM 含量可能与合肥市生活污水及冬季死亡蓝藻分解有关,需及时治理避免引起湖泛现象.

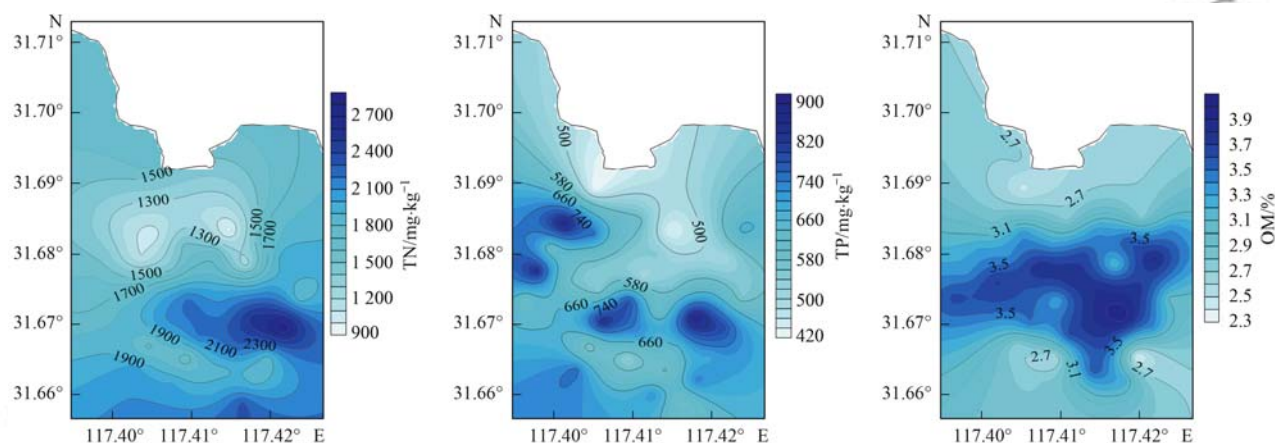


图2 表层底泥中 TN、TP 和 OM 含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of TN, TP, and OM in surface sediments

2.1.2 底泥氮、磷及有机质垂直分布特征

对拟疏浚区域内底泥中 TN、TP 和 OM 含量进行了垂向分析,因为研究湾区各点位的垂向变化相似,以 S24 点位的为例,如图 3 所示.其中各点位 0 ~ 10 cm 底泥 TN 含量为 948 ~ 2 559 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 1 771 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,10 ~ 20 cm 底泥平均值为 1 629 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 底泥 TN 的平均含量差异较小,超过 30 cm 的底泥含量趋于稳定,总体呈现随深度增加而降低的趋势.表层底泥中 TP 含量最高,在 424 ~ 890 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间波动,平均值为 628 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于中度污染,10 ~ 20 cm 底泥处平均值为 430 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相比表层下降较多,30 ~ 100 cm 深度 TP 平均含量较表层样品降低 50% 左右,总体呈现随深度增加而降低的趋势.在相对空间变化而言,OM 的垂向变化较明显,表层沉积物 OM 质量分数介于 1.46% 和 2.98% 之间,平均值 2.40%,具有较高的释放风险,0 ~ 10 cm 与 10 ~ 20 cm 的有机质质量分数较高,10 ~ 20 cm 处开始出现明显下降,超过 30 cm 部分沉积物中有机质质量分数均值为

0.55%,远低于表层沉积物中 OM 的质量分数.

2.1.3 底泥营养盐污染状况

通过有机污染指数法和污染指数法对调查区域底泥的营养盐状况进行评价,表层底泥 (0 ~ 10 cm) 有机污染指数范围为 0.11 ~ 0.53,平均为 0.26,由图 4 可以看出,有机污染的空间分布差异较大,虽整体处于尚清洁等级,但调查区域东部近湖心区域处于有机污染等级.10 ~ 20 cm 有机污染指数均值为 0.2,与表层底泥等级一致,而超过 30 cm 处底泥降为较清洁等级.表层底泥 (0 ~ 10 cm) TP 的单项污染指数为 1.01 ~ 2.11,平均为 1.5,其中 39% 样点属于严重污染等级,如图 4 所示分布在调查区域中心位置和西北部样点. TP 的污染指数与有机污染指数在垂向变化上保持一致,30 cm 以下的底泥降为轻度污染等级.

2.2 重金属含量及潜在生态风险评估

2.2.1 底泥中重金属空间分布特征

调查区域沉积物中重金属含量如图 5 所示,8 种重金属的平均含量从大到小依次为 Zn (167

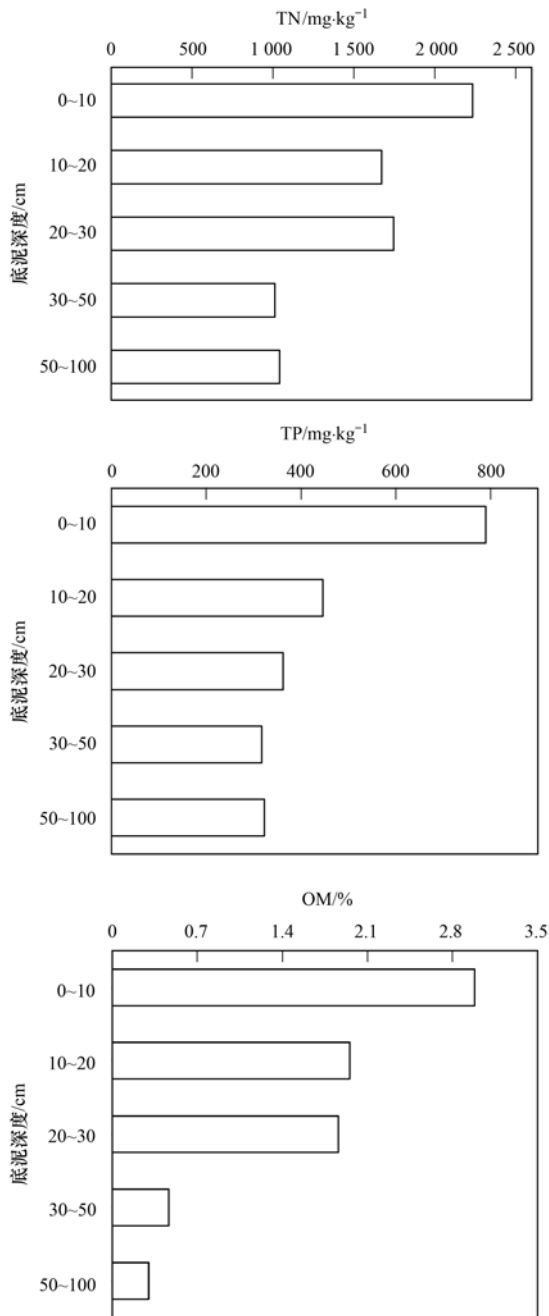


图3 底泥中 TN、TP 和 OM 含量垂向分布

Fig. 3 Vertical distributions of TN, TP, and OM in sediments

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cr ($62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Pb ($36.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Ni ($26.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cu ($26.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > As ($9.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cd ($0.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Hg ($0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 除 Cr 和 Ni 外, 其余 6 种重金属的平均含量均超过安徽省土壤背景值, 其中 Zn、Cd、Pb 和 Hg 平均含量超过中国土壤背景值. 其中 Cu、As、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的均值分别是安徽省土壤背景值的 1.28、1.05、2.69、4.54、1.39 和 5.17 倍; Zn、Cd、Pb 和 Hg 的均值分别是中国土壤背景值的 1.67、2.20、1.05 和 1.14 倍. 从底泥样品中重金属的最大含量来看, 所有重金属含量的最大值都超过

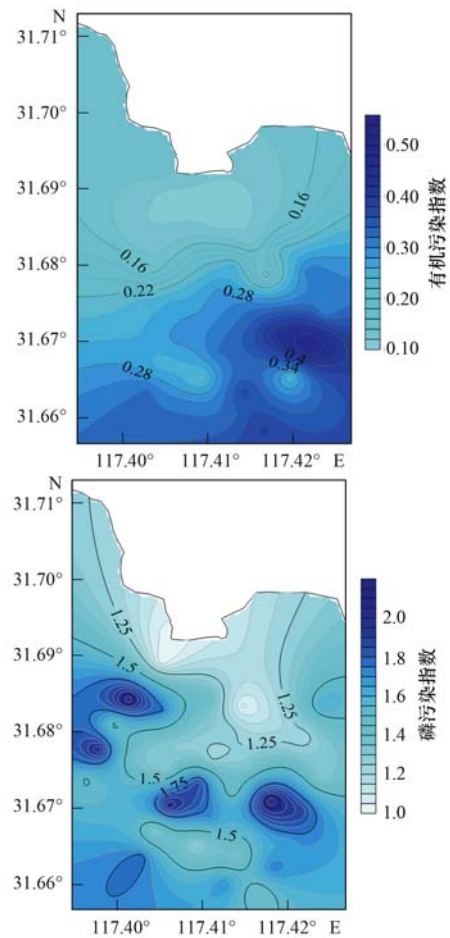


图4 底泥中 OI 和 TP 的 PI 指数

Fig. 4 OI and PI of TP in sediments

了安徽省土壤背景值和中国土壤背景值. 其中 Cd 和 Hg 的最大值分别为安徽省土壤背景值的 14.1 和 14.0 倍, 分别为中国土壤背景值的 6.85 和 3.10 倍. 调查区域的重金属具有一定空间差异, 如 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Hg 的最大值均出现在 S27, Cr、As 和 Ni 的最大值出现在 S30, 均为调查区域靠近湖心的采样点, 与南淝河河流入湖水方向一致. 以上结果表明巢湖南淝河入湖河口汇流湾区底泥中有不同程度的重金属污染, 其中 Cd 和 Hg 的超标最严重, 各种重金属均在南淝河入湖水方向上逐渐积累, 这之前巢湖和南淝河流域的重金属污染调查结果相似^[26,32,33], 说明调查区域 Cd 和 Hg 导致的重金属内源污染长期存在.

2.2.2 底泥中重金属垂直分布特征

8 种重金属含量的垂向变化大致相同, 体现在 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 含量较高, 随深度增加含量减少, 图 6 以 S24 采样点中各种重金属元素含量的垂向分布为代表. 各种重金属含量在 20 ~ 30 cm 处开始明显降低, 其中污染最严重的 Cd 和 Hg 在 20 ~ 30 cm 处急剧下降, 下降比例最大时分别为 10 ~ 20 cm 含量的 26% 和 24%. 根据之前的研究, 底泥重

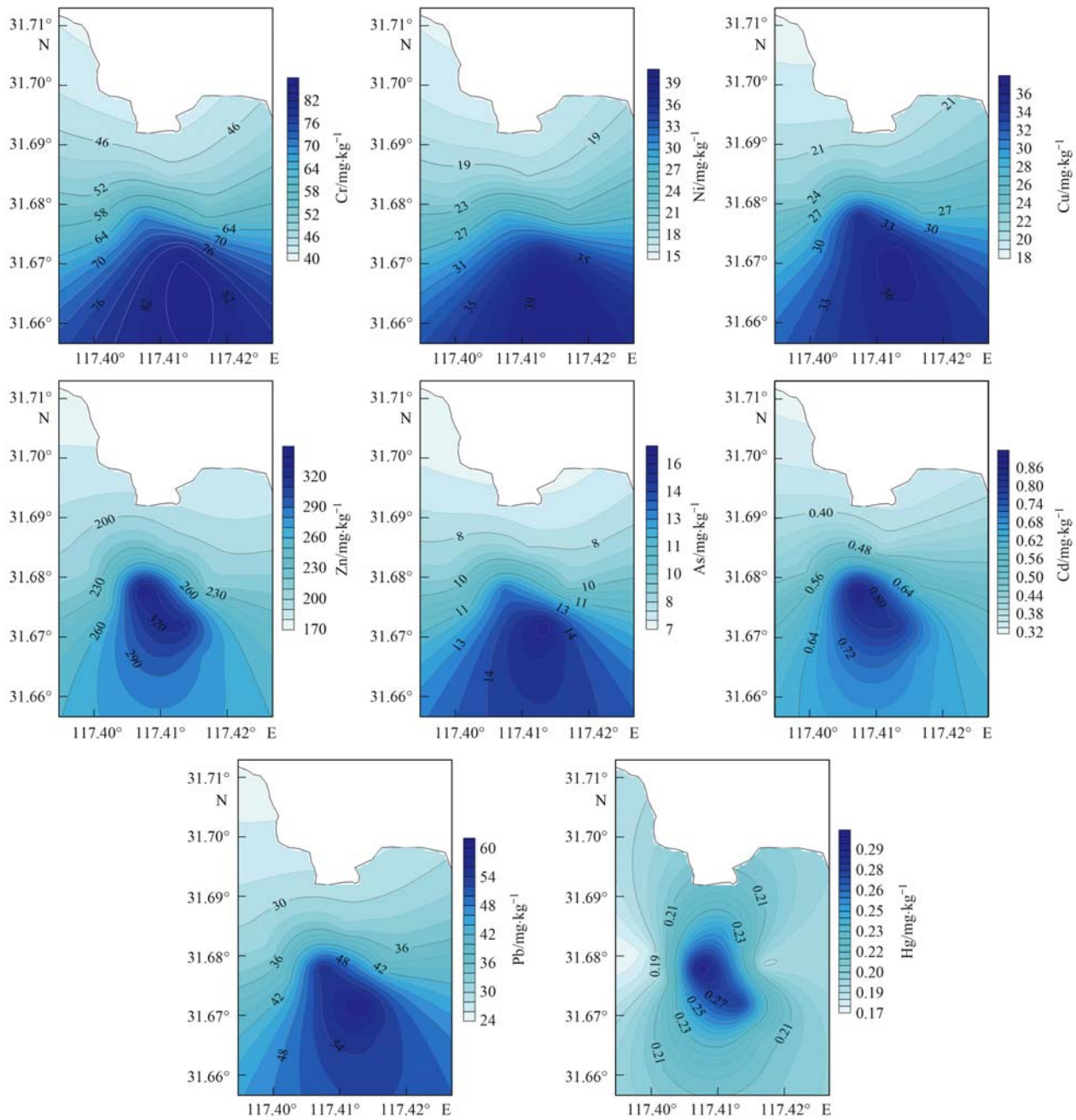


图5 表层底泥中重金属含量

Fig. 5 Contents of heavy metals in the surface sediment

金属含量峰值一般出现在 0 ~ 8 cm 段,这种积累情况与底泥扰动导致的再悬浮及沉降等过程相关^[34,35],表层重金属在此过程向上覆水体释放造成水体污染需引起重视。

为探究南淝河入湖河口底泥中重金属的来源,对 8 种重金属和 TN、TP 和 OM 进行相关性分析,结果见表 4。从中可知,8 种重金属均与其它重金属元素呈现显著相关性,说明这 8 种重金属可能来自于相同的污染源或者存在相似的地球化学过程^[36]。TN 与除 Cd 外的 7 种重金属呈现出显著相关性,TP 与所有重金属呈现显著相关性,有机质与除 Ni 外的重金属元素呈现显著相关性,这是因为有机质与重

金属存在较强的络合作用,产生吸附、络合和沉淀等一系列化学反应。

2.2.3 重金属潜在生态风险评价

采用目前应用广泛的潜在生态危害指数法作为调查区域的评价方法,以安徽省土壤重金属背景值作为参比,计算了不同深度底泥中 8 种重金属单因子生态风险指数(E_r)和综合生态风险指数(RI),结果如图 7 所示。8 种重金属 E_r 的平均值从大到小为: Hg(206) > Cd(136) > As(10.5) > Pb(6.93) > Cu(6.38) > Ni(4.40) > Zn(2.69) > Cr(1.87)。由均值来看,单因子潜在生态风险指数最高的是 Hg,达到了重污染等级,其次是 Cd,达到了较重污染等

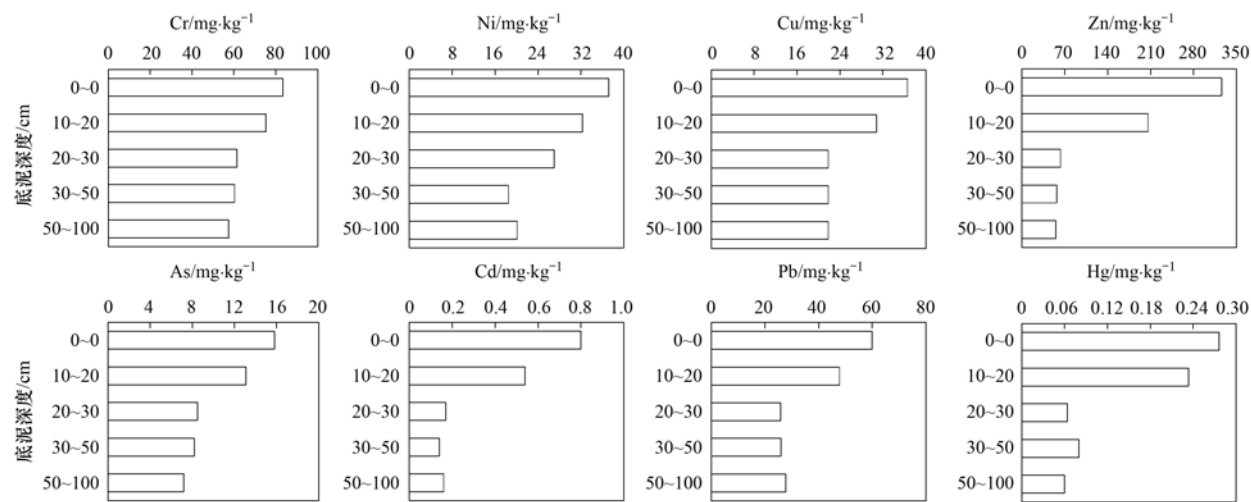


图 6 底泥中重金属含量的垂向分布

Fig. 6 Vertical distributions of heavy metals in sediment

表 4 沉积物中重金属含量与 TN、TP、OM 间的相关关系¹⁾

Table 4 Correlations between heavy metals, total nitrogen, total phosphorus, and organic matters in sediments

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	TN	TP	OM
Cr	1										
Ni	0.972 **	1									
Cu	0.887 **	0.789 **	1								
Zn	0.680 **	0.555 **	0.909 **	1							
As	0.942 **	0.893 **	0.932 **	0.838 **	1						
Cd	0.657 **	0.518 **	0.906 **	0.987 **	0.805 **	1					
Pb	0.820 **	0.714 **	0.953 **	0.959 **	0.918 **	0.955 **	1				
Hg	0.654 **	0.498 **	0.903 **	0.940 **	0.795 **	0.945 **	0.905 **	1			
TN	0.834 **	0.898 **	0.647 **	0.495 **	0.817 **	0.423 *	0.622 **	0.370 *	1		
TP	0.648 **	0.651 **	0.678 **	0.708 **	0.776 **	0.612 **	0.671 **	0.594 **	0.779 **	1	
OM	0.472 **	0.318	0.780 **	0.798 **	0.578 **	0.828 **	0.724 **	0.854 **	0.342 **	0.401 **	1

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

级,所以 Hg 和 Cd 是主要的生态风险贡献因子. 除 Hg 和 Cd 之外的 6 种重金属的单因子生态风险指数均在低污染水平范围内,可认为在短时间内没有潜在生态风险. 各重金属单因子潜在生态风险在垂向分布上基本一致,0 ~ 10 与 10 ~ 20 cm 的风险指数相对较高且相差不大,20 ~ 30 cm 的风险指数略低于前两层,超过 30 cm 的部分最低,由此可见 0 ~ 30 cm 底泥中的重金属是生态风险指数的主要贡献部分.

南淝河入湖河口区域的 RI 值在 104 ~ 876 范围内,平均值为 371,处于重风险等级,其中 24.2% 处于低风险,18.2% 处于中风险,42.4% 处于重风险,15.1% 处于严重风险等级. 从生态风险的垂向分布来看,处于 0 ~ 20 cm 的表层样品的潜在生态风险指数全部处于重风险等级以上,其中 S16、S24 的 0 ~ 10 cm 样品以及 S14、S27、S30 的 10 ~ 20 cm 样品处于严重风险等级,20 ~ 30 cm 样品都处于中风险

等级以上,而 30 cm 更深的底泥重金属潜在生态风险整体为低风险等级. 南淝河入湖河流存在多种来源的复合污染,由此导致了以 Hg 和 Cd 为主要污染贡献因子的重金属潜在生态风险偏高,且积累于表层底泥中,应引起重视并采取污染控制措施,避免引

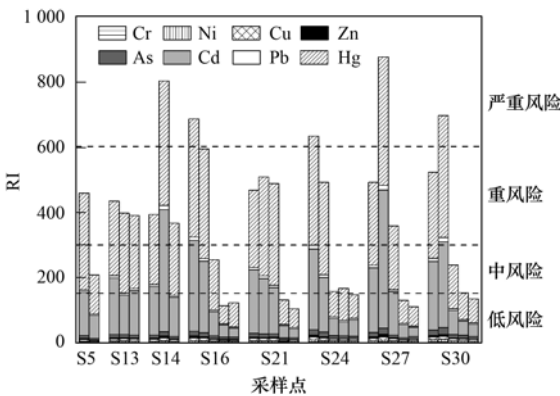


图 7 底泥中重金属综合潜在生态风险指数及等级

Fig. 7 General (RI) indices and grades of potential ecological risk

起扩大至巢湖湖心的更大范围污染。

2.2.4 浸出毒性特征

对重金属含量测定样点表层底泥的重金属浸出毒性进行了分析,结果见表 5。采用文献[37]中的浸出毒性鉴别标准值 Cr (15 mg·L⁻¹)、Ni (5 mg·L⁻¹)、Cu (100 mg·L⁻¹)、Zn (100 mg·L⁻¹)、As (5 mg·L⁻¹)、Cd (1 mg·L⁻¹)、Hg (0.1 mg·L⁻¹)

和 Ni (5 mg·L⁻¹) 对底泥中重金属的浸出状况进行判别。鉴别结果表明,8 个采样点的表层底泥的 8 种重金属的浸出浓度均未超标且远小于标准值,未达到危险废物的标准,因此虽然表层底泥重金属生态风险指数超标,但巢湖南淝河河口汇流湾区的底泥不属于危险废物,可作为一般废物进行处理^[38]。

表 5 表层沉积物重金属浸出浓度/μg·L⁻¹
Table 5 Leaching concentrations of heavy metals of the surface sediments/μg·L⁻¹

采样点	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
S5	0.19	3.66	0.50	76.1	1.93	0.15	0.11	0.14
S13	0.18	3.81	1.43	29.9	0.84	0.18	0.33	0.87
S14	0.28	1.93	0.48	20.7	1.16	0.08	0.06	0.11
S16	0.21	2.62	0.44	29.3	5.45	0.14	0.10	0.33
S21	0.21	2.48	0.51	21.4	2.62	0.08	0.09	0.49
S24	0.11	10.8	0.47	52.6	2.35	0.07	0.09	0.71
S27	0.73	1.90	0.86	16.9	1.67	0.08	0.07	0.31
S30	0.16	5.92	0.52	31.9	2.00	0.10	0.17	0.26
平均值	0.26	4.14	0.65	34.8	2.25	0.11	0.13	0.40

2.3 NH₄⁺-N和 TP 静态释放特征

沉积物-水界面的物质交换过程是确认沉积物中污染物与湖泊污染关系的关键,底泥“释放”还是“吸收”表明底泥是污染物质的“源”还是“汇”。研究湾区内 5 个典型点位在短时间内的静态释放速率如图 8 所示,实验结果发现 NH₄⁺-N 和 TP 的释放速率在 36 h 后保持稳定,这与之前的研究结果相似^[12,39],因此图 8 中及讨论部分所示为各点位 36 ~ 72 h 释放速率均值。

调查区域沉积物中 NH₄⁺-N 释放速率为 2.83 ~ 16.6 mg·(m²·d)⁻¹,平均值为 8.04 mg·(m²·d)⁻¹,最大释放速率出现在 S16 采样点,最小释放强度为 S24,释放风险存在于汇流湾区的中心区域。调查湾区沉积物中 TP 释放速率为 0.02 ~ 0.38

mg·(m²·d)⁻¹,平均值为 0.19 mg·(m²·d)⁻¹,最大释放速率同样为中心区域的 S16 采样点,最小释放强度为 S5 采样点,与 TN 释放风险的空间分布一致。综合底泥柱状样 NH₄⁺-N 和 TP 释放通量可以看出,调查区域底泥表现为氨氮、总磷整体存在释放风险,且释放风险均集中在调查范围的中心区域。因此在调查范围的中心区域进行生态清淤疏浚会减少内源释放风险,使该区域底泥重新成为污染物的汇,从而改善水质并减少污染物进一步向巢湖湖心方向扩散,最终避免更大面积的污染。

2.4 疏浚面积及深度建议

根据 TN、TP、OM 和重金属含量插值分析后的空间分布,以及有机污染指数、TP 污染指数及重金属生态风险评价的结果,为去除调查区域内现有营

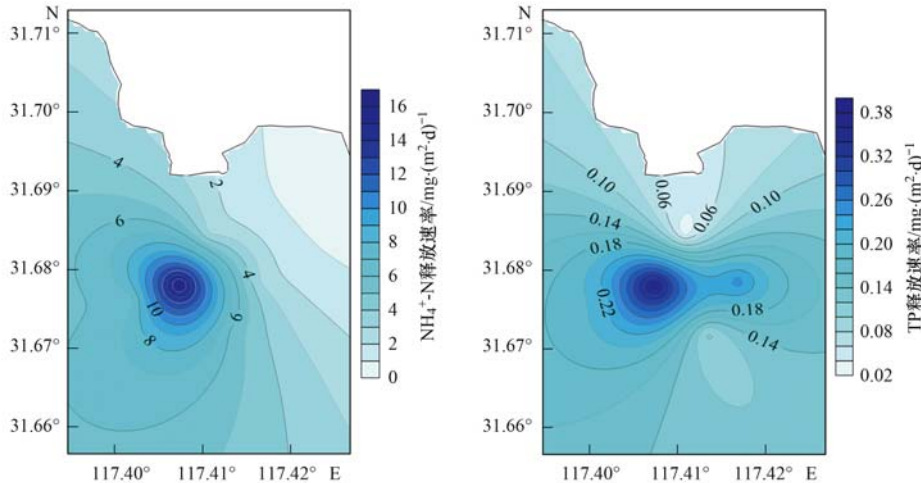


图 8 底泥 NH₄⁺-N 和 TP 的释放速率

Fig. 8 Release rates of NH₄⁺-N and TP of sediments

养盐及重金属的污染威胁,建议疏浚去除 TN、TP 和 OM 重度污染与重金属中风险等级以上点位的底泥,范围如图 9 所示,经计算总面积为 3.93 km²,建议疏浚深度为 30 cm. 调查区域所处南淝河口,污染物随入湖河流持续输入,疏浚后应采取措施控制南淝河带来的外源污染并继续监测河口区域的底泥现状,有效避免污染向巢湖湖心扩散.

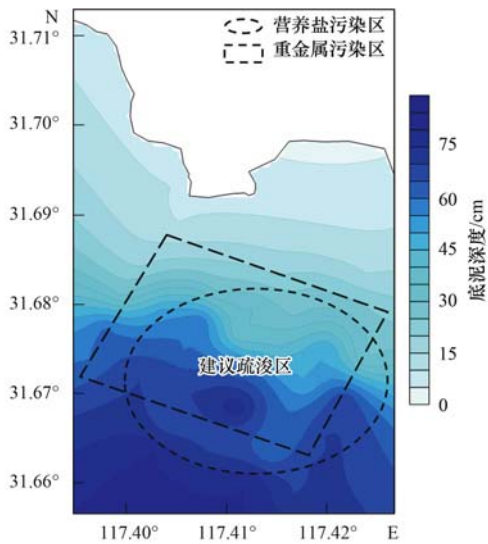


图 9 建议疏浚区域

Fig. 9 Suggested dredging area

3 结论

(1) 巢湖南淝河入湖河口底泥 TN、TP 和 OM 的平均含量分别为 1 461 mg·kg⁻¹、438 mg·kg⁻¹ 和 1.77%; 表层底泥的平均含量分别为 1 692 mg·kg⁻¹、628 mg·kg⁻¹ 和 2.40%, 根据 EPA 标准, 表层底泥 TN 和 TP 含量均处于中度污染. 有机污染指数和 TP 的污染指数评价结果分别为尚清洁等级和严重污染等级.

(2) 调查区域底泥均表现为 NH₄⁺-N 和 TP 释放源, 静态释放通量均值分别为 8.04 mg·(m²·d)⁻¹ 和 0.19 mg·(m²·d)⁻¹, 释放风险较大点位均出现在调查范围的中心区域, 与底泥营养盐污染区域基本一致.

(3) 巢湖南淝河入湖河口汇流湾区底泥中 Zn、Pb、Cu、As、Cd 及 Hg 的平均含量均超过安徽省土壤背景, 其中 Cd 和 Hg 含量超标最严重. 潜在生态风险评估表明 Hg 和 Cd 的单因子风险等级分别达到了重污染和较重污染等级, 是主要污染贡献因子. 0~20 cm 的表层样品的综合潜在生态风险指数全部处于重风险等级以上. 浸出毒性结果表明调查区域的底泥在疏浚后不属于危险废物.

(4) 综上所述, 巢湖南淝河入湖河口汇流湾区

底泥 TN、TP、OM 及重金属存在不同程度污染, 具有向上覆水释放的风险, 且主要集中在 0~30 cm 的底泥中, 有向巢湖湖心方向蔓延的趋势. 结合调查结果, 为避免巢湖进一步受到南淝河入湖污染物的影响, 建议该区域进行生态清淤疏浚工程, 重点疏浚面积为 3.93 km², 疏浚深度为 30 cm, 疏浚产生淤泥可做一般废物处理.

参考文献:

- [1] Zhong J C, You B S, Fan C X, *et al.* Influence of sediment dredging on chemical forms and release of phosphorus [J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(1): 34-44.
- [2] 王金瑾, 鲍建国, 李立青. 东湖沉积物重金属来源与人类活动相关性分析[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(4): 84-90.
Wang J J, Bao J G, Li L Q. Sources of heavy metal pollutions in sediments of lake Donghu and their relationship with anthropogenic activities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(4): 84-90.
- [3] Yang C H, Yang P, Geng J, *et al.* Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114292.
- [4] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 135-145.
- [5] 余亮华. 河湖底泥疏浚对水生态的影响分析与对策[A]. 见: 2015 第七届全国河湖治理与生态文明发展论坛论文集[C]. 广州: 中国水利技术信息中心, 2015. 153-157.
- [6] Zhang S Y, Zhou Q H, Xu D, *et al.* Effects of sediment dredging on water quality and zooplankton community structure in a shallow of eutrophic lake [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(2): 218-224.
- [7] 郭楠楠, 齐延凯, 孟顺龙, 等. 富营养化湖泊修复技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2019, **35**(36): 72-79.
Guo N N, Qi Y K, Meng S L, *et al.* Research progress of eutrophic lake restoration technology [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, **35**(36): 72-79.
- [8] Fang T, Lu W X, Cui K, *et al.* Distribution, bioaccumulation and trophic transfer of trace metals in the food web of Chaohu Lake, Anhui, China [J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 1122-1130.
- [9] Shang G P, Shang J C. Spatial and temporal variations of eutrophication in western Chaohu Lake, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **130**(1-3): 99-109.
- [10] 李强, 霍守亮, 王晓伟, 等. 巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究[J]. *环境工程技术学报*, 2013, **3**(2): 147-155.
Li Q, Huo S L, Wang X W, *et al.* Distribution and correlation of nutrients and particle size in surface sediments of Lake Chaohu and its inflow rivers [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, **3**(2): 147-155.
- [11] 丁云霄. 巢湖主要入湖河流(南淝河、柘皋河、丰乐河、杭埠河)生态系统健康诊断[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [13] Schummer M L, Palframan J, McNaughton E, *et al.* Comparisons of bird, aquatic macroinvertebrate, and plant communities among dredged ponds and natural wetland habitats at Long Point, Lake Erie, Ontario[J]. Wetlands, 2012, **32**(5): 945-953.
- [14] Cronberg G. Changes in the phytoplankton of Lake Trummen induced by restoration[J]. Hydrobiologia, 1982, **86**(1-2): 185-193.
- [15] 王栋, 孔繁翔, 刘爱菊, 等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 263-268.
Wang D, Kong F X, Liu A J, *et al.* Analysis of the influence of the ecological dredging to ecosystem of Lake Wuli, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2005, **17**(3): 263-268.
- [16] 胡小贞, 金相灿, 刘倩, 等. 滇池污染底泥环保疏浚一期工程实施后环境效益评估[J]. 环境监控与预警, 2010, **2**(4): 46-49.
Hu X Z, Jin X C, Liu Q, *et al.* Study on environmental benefits of environmental dredging the first phase project in Lake Dianchi[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2010, **2**(4): 46-49.
- [17] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理[J]. 科学通报, 2004, **49**(15): 1523-1528.
Fan C X, Zhang L, Wang J J, *et al.* Processes and mechanism of effects of sludge dredging on internal source release in lakes[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(17): 1853-1859.
- [18] 龙佳, 张宁, 崔佳. 黑臭水体底泥污染源调查及污染特性评价方法研究[J]. 市政技术, 2018, **36**(6): 171-173.
Long J, Zhang N, Cui J. Study on pollutant investigation and characteristics evaluation of black and odorous water substrate sludge[J]. Municipal Engineering Technology, 2018, **36**(6): 171-173.
- [19] 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. 30-35.
- [20] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [21] HJ/T 299-2007, 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法[S].
- [22] 郭西亚, 凌虹, 周旭, 等. 阳澄湖沉积物氮磷与有机质分布及污染评价[J]. 环境科技, 2020, **33**(2): 59-64.
Guo X Y, Ling H, Zhou X, *et al.* Pollution evaluation and distribution characteristics of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Yangcheng Lake[J]. Environmental Science and Technology, 2020, **33**(2): 59-64.
- [23] 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 Environment Sciences, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China[J]. CATENA, 2016, **145**: 193-203.
- [26] 孔明, 彭福全, 张毅敏, 等. 环巢湖流域表层沉积物重金属赋存特征及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1863-1871.
Kong M, Peng F Q, Zhang Y M, *et al.* Occurrence characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediments of Circum-Chaohu Basin[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(6): 1863-1871.
- [27] 刘新, 蒋豫, 高俊峰, 等. 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 502-512.
Liu X, Jiang Y, Gao J F, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(3): 502-512.
- [28] 王中波, 陆凯, 温珍河, 等. 中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素[J]. 地球科学, **45**(7): 2709-2721.
- [29] USEPA. A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems[M]. Chicago: US Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, 2002.
- [30] 王书锦, 刘云根, 张超, 等. 洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 69-77.
Wang S J, Liu Y G, Zhang C, *et al.* Distribution and pollution risk assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in inlet rivers of Erhai Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(1): 69-77.
- [31] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 393-398.
Lu S Y, Xu M S, Jin X C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, **33**(2): 393-398.
- [32] 王秀, 王振祥, 潘宝, 等. 南淝河水-沉积物中重金属的分布规律、环境评价与溯源研究[J]. 环境工程, 2017, **35**(4): 134-138.
Wang X, Wang Z X, Pan B, *et al.* Distribution, environmental implication and source characteristics of heavy metals in water and sediment in Nanfei River[J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(4): 134-138.
- [33] 孔明, 董增林, 晁建颖, 等. 巢湖表层沉积物重金属生物有效性生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1223-1229.
Kong M, Dong Z L, Chao J Y, *et al.* Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(4): 1223-1229.
- [34] Yin H B, Deng J C, Shao S G, *et al.* Distribution characteristics and toxicity assessment of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **179**(1-4): 431-442.
- [35] 程杰, 李学德, 花日茂, 等. 巢湖水体沉积物重金属的分布及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1403-1408.
Cheng J, Li X D, Hua R M, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Chaohu Lake[J]. Journal of Agro-environment Science, 2008, **27**(4): 1403-1408.
- [36] 李照全, 方平, 黄博, 等. 洞庭湖区典型内湖表层沉积物中氮、磷和重金属空间分布与污染风险评价[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(6): 1409-1420.

- Li Z Q, Fang P, Huang B, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of typical internal lakes in Dongting Lake area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33** (6): 1409-1420.
- [37] GB 5085.3-2007, 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别[S].
- [38] 包建平, 朱伟, 汪顺才, 等. 固化对淤泥中重金属的稳定化效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, **39** (1): 24-28.
- Bao J P, Zhu W, Wang S C, *et al.* Stabilization effect of heavy metals in solidified sludge [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, **39** (1): 24-28.
- [39] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化-2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. 湖泊科学, 2006, **18** (3): 207-217.
- Fan C X, Zhang L, Bao X M, *et al.* Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18** (3): 207-217.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论.重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjks@rcees.ac.cn;网址: www.hjks.ac.cn

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)