

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估

张杰^{1,2}, 郭西亚^{1,2}, 曾野^{1,2}, 邓建才^{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: 为阐明经济发达地区河流表层沉积物重金属的污染特征, 本研究分析了太湖流域典型水系 94 个样点沉积物中 8 种重金属 (Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As、Cd 和 Hg) 含量, 评估了重金属的生态风险以及辨析了污染源。结果表明, 太湖流域河流表层沉积物中 Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As、Cd 和 Hg 的平均含量分别为 163.62、102.46、45.50、44.71、37.00、13.34、0.479 和 0.109 mg·kg⁻¹, 均高于其对应的背景值 (Hg 除外)。地累积指数评价中, Pb、Ni、Zn、Cu 和 Cd 整体上处于低污染状态; 在污染负荷指数评价中, Pb、Ni、Zn 和 Cu 整体上处于中度污染状态, Cd、Cr、As 处于低污染状态; 在潜在生态风险评价中, Cd 和 Hg 处于中等潜在生态风险, 其余重金属均处于低潜在生态风险。多元统计分析表明, Pb 主要来自于生活污水、农业废水排放; 除受自然因素影响外, Cr、Ni 和 Zn 还受到电镀及合金制造行业的影响; Cu 和 As 主要来自于农药、工业废水; Cd 主要来自于冶炼工业; Hg 主要来源于化石燃料和石油产品的燃烧。

关键词: 太湖流域; 表层沉积物; 重金属; 污染评估; 来源识别

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2202-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201809168

Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin

ZHANG Jie^{1,2}, GUO Xi-ya^{1,2}, ZENG Ye^{1,2}, DENG Jian-cai^{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 pollution characteristics of heavy metals in the surface sediments of rivers in economically developed areas, analysis of the contents of eight heavy metals, assessment of ecological risks, and identification of the source of heavy metals in surface sediments from typical rivers of Lake Taihu Basin were carried out in this study. The results showed that the average contents of Zn, Cr, Ni, Cu, Pb, As, Cd, and Hg in the surface sediments of Lake Taihu Basin were 163.62, 102.46, 45.50, 44.71, 37.00, 13.34, 0.479, and 0.109 mg·kg⁻¹, respectively. Except for Hg, the average contents of other 7 heavy metals were higher than their background values. The geo-accumulation index indicated that Pb, Ni, Zn, Cu, and Cd amount to a low pollution state. According to the pollution load index, Pb, Ni, Zn, and Cu represent a moderately polluted state, while Cd, Cr, and As a low degree pollution state. Based on the potential ecological risk index, Cd and Hg represent moderate potential ecological risk, and the others low potential ecological risk. Source identification of heavy metals by multivariate statistical analysis showed that Pb was largely from non-point pollutions; Cr, Ni, and Zn stemmed from electroplating, alloy manufacturing industries, and nature; Cu and As were mainly from pesticides and discharge of industrial wastewater; Cd was dominantly from smelting industry; and Hg was mainly derived from fossil fuel combustion and petroleum products.

Key words: Lake Taihu Basin; sediment; heavy metals; pollution assessment; source identification

沉积物是水生生态系统的重要组成部分, 为水生动植物生长提供了场所^[1]。重金属作为一类不易降解的外源污染物, 进入到水体后吸附在悬浮颗粒物表面, 并与后者共同沉降至水底, 最终蓄积于沉积物中; 当外界环境条件 (pH、氧化还原电位等) 发生改变时, 富积于沉积物中的重金属则再次释放到上覆水体, 造成二次污染^[2,3], 进而影响水质安全, 损害水体生态系统健康。

太湖流域是我国人口最为集中, 城镇化进程最快的地区之一, 在全国的经济发展中起到了举足轻重的作用; 同时水环境污染问题也日益凸显。当前, 针对流域重金属污染研究虽已起步, 但研究区域分散^[4,5], 对城镇化程度高、经济发展快以及河网水系发达的太湖流域水体沉积物重金属污染仍鲜

见报道, 本文将研究区域拓展为整个太湖流域的 6 条水系, 通过大范围、多样点的采样, 系统地分析了太湖流域各水系的重金属污染状况。通过采集太湖流域河网水系沉积物样品、测定其重金属含量, 阐明太湖流域河流沉积物重金属含量的空间分布特征; 采用地累积指数 (I_{geo})、潜在生态风险指数 (RI)、污染负荷指数 (PLI) 和沉积物质量基准 (SQG) 评价沉积物中重金属污染水平; 使用相关分析、主成分分析 (PCA) 和聚类分析 (CA) 统计手段,

收稿日期: 2018-09-20; 修订日期: 2018-12-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07205-02); 国家自然科学基金项目 (41271213)

作者简介: 张杰 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊生态环境与污染修复, E-mail: zhangjie175@mails.ucas.ac.cn

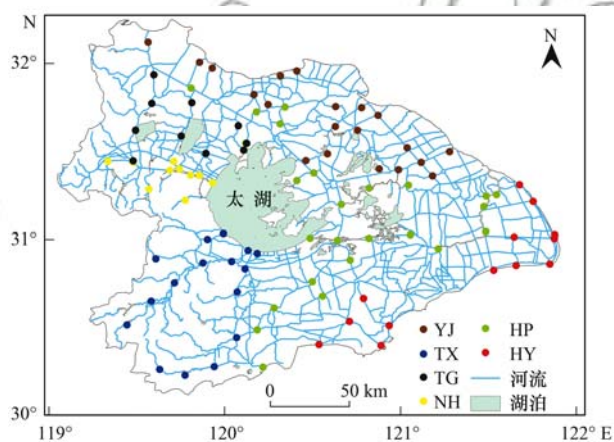
* 通信作者, E-mail: jcdeng@niglas.ac.cn

甄别沉积物中重金属来源,以期为太湖流域河网水系重金属污染的排放管理、控制和治理提供理论支撑依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖流域地处亚热带季风气候区,位于长江下游地区,流域总面积约为 3.68 万 km²,是我国经济、城镇化高度发达且人口最为稠密的地区之一。太湖流域内河流众多,可划分为洮漏水系(TG)、南河水系(NH)、苕溪水系(TX)、沿江水系(YJ)、黄浦江水系(HP)和杭州湾-长江口水系(HY)等 6 大水系(图 1)。苕溪、南河和洮漏水系是主要入太湖水系,分别约占入湖总量的 20%、25% 和 50%;苕溪水系、南河水系均发源于太湖流域西部丘陵地区;洮漏水系主要包括常州市、无锡市以及镇江的一部分^[6]。沿江水系、黄浦江水系和杭州湾-长江口水系则为主要的出太湖水系,且三条水系主要流经城市建筑区。



TG:洮漏水系; NH:南河水系; TX:苕溪水系;
YJ:沿江水系; HP:黄浦江水系; HY:杭州湾-长江口水系

图 1 太湖流域采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in Lake Taihu Basin

1.2 采样点和样品采集

2016 年 3 月,借助全球定位系统(GPS)在太湖流域布设 94 个采样点(图 1),其中洮漏水系 10 个,南河水系 10 个,苕溪水系 16 个,沿江水系 20 个,黄浦江水系 25 个,杭州湾-长江口水系 13 个。利用彼得森采泥器,采集表层沉积物样品(0~10cm),将混合后的样品放入干净的聚乙烯自封袋中冷冻保存运回实验室。

1.3 样品处理分析和质量控制

沉积物样品用冷冻干燥机冻干,经玛瑙研钵研磨处理后过 100 目(0.154 mm)尼龙筛保存待测,总氮(TN)和总磷(TP)采用过硫酸钾联合消解法测

定,有机质(OM)采用重铬酸钾容量法测定,Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As、Cd、Fe 和 Mn 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7700cx 型)测定,Hg 采用 Hydra-c 型全自动测汞仪测定。为保证测定结果的准确性和精度,对样品进行了重复分析(重复率为 10%)和标样分析(加标回收率在 85.00%~115.00%之间),所有样品分析误差均小于 10%,符合质量控制要求,所有分析结果均以沉积物干重计。

1.4 沉积物污染评估方法

1.4.1 地累积指数法(I_{geo})

1969 年 Miller 提出了地累积指数法,考虑人为污染因素、地球化学背景值和自然成岩作用引起背景值变动的因素^[7],定量评估沉积物中重金属的污染程度,沉积物重金属污染等级及其阈值见参考文献^[8]。 I_{geo} 计算表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)]$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为沉积物中元素 i 的含量; B_i 为元素 i 的地球化学背景值; k 为考虑到成岩作用可能会引起重金属背景值的变动而取的系数,一般取 1.5。

1.4.2 污染负荷指数法(PLI)

1980 年 Tomlinson 等提出了污染负荷指数法^[9],该方法能够体现重金属污染的空间变化趋势及各种重金属对污染的贡献,污染负荷指数与污染程度评价标准见文献^[10]。PLI 计算表达式为:

$$P_{ij} = C_{ij} / B_i$$

$$PLI_j = \sqrt[m]{P_{1j} \times P_{2j} \times \cdots \times P_{mj}}$$

$$PLI_{zone} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times \cdots \times PLI_n}$$

式中, P_{ij} 为重金属 i 在 j 点的污染系数; C_{ij} 为重金属 i 在 j 点的实测含量; B_i 为重金属 i 的地球化学背景值; PLI_j 为 j 点的污染负荷指数; PLI_{zone} 为某一区域(流域)的污染负荷指数; m 为参加评价的重金属总数目; n 为采样点个数。

1.4.3 潜在生态风险评价指数法(RI)

Hakanson 提出的潜在生态风险评价指数法是水体沉积物重金属污染风险评估最常用的方法之一^[11],该方法综合考虑了重金属区域背景值、毒性因子和评价区域对重金属污染的敏感性。计算表达式为:

$$C_r^i = C_0^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, C_r^i 为重金属 i 的污染指数; C_0^i 为重金属 i 的

实测值; C_n^i 为重金属 i 的地球化学背景值; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应因子; n 是样点重金属的种数; RI 为潜在生态风险指数. Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr 和 Zn 的毒性响应因子分别为 40、30、10、5、5、5、2 和 1. 沉积物中重金属的潜在生态风险等级及其阈值见参考文献[12].

1.4.4 沉积物质量基准法(SQG)

Macdonald 等^[13] 提出沉积物质量基准方法, 其核心涉及效应范围低值(ERL)和效应范围中值(ERM)以及临界效应含量(TEL)和可能效应含量(PEL)等关键阈值. 沉积物中重金属实测含量低于 ERL 和 TEL, 表示不对底栖生物产生影响; 重金属实测含量介于 ERL 和 ERM 以及 TEL 和 PEL 之间, 表示重金属对底栖生物施加的不利影响偶有发生; 重金属实测含量高于 ERM 和 PEL, 则表示重金属对底栖生物的毒性影响频繁发生^[14,15].

1.5 统计分析

本研究描述性统计参数包括平均值、最小值、最大值、标准差和变异系数(CV), 标准差和变异系数可反映不同重金属元素含量的离散程度^[16]. 利用 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和 Bartlett 球形测试检验了实验数据的适用性. KMO 值接近 1 表明开展主成分分析是有价值的, Bartlett 球形测试的概率值小于 0.05 表示参数之间的显著相关性^[17]. 在本研究中, KMO 值和 Bartlett 球形检验概率值分别为 0.77 和 0, 表明主成分分析可信. 本研究中采用重金属含量的标准化数据集进行主成分分析, 耦合相关矩阵最大值旋转, 计算获得 PCA^[16,18]. 聚类分析采用 War's 方法^[16], 以欧几里德距离作为群集之间的距离值, 与主成分分析耦合, 将距离值相近的个体参数或变量分组^[19].

利用 SPSS 22.0 软件进行非参数检验、主成分分析和聚类分析; 利用 ArcGIS 10.2 绘制重金属元素的空间分布图; 利用 Pearson 参数分析各元素之间的相关性.

2 结果与讨论

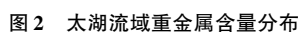
2.1 表层沉积物重金属含量及空间分布特征

太湖流域河流表层沉积物中重金属平均含量 $Zn(163.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Cr(102.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Ni(45.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Cu(44.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Pb(37.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > As(13.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Cd(0.479 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) > Hg(0.109 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1})$, 分别是各自背景值的 2.77、1.29、2.33、2.37、2.36、1.42、1.77 和 0.99 倍; 除 Hg 外, 均高于太湖流域重金属

背景值^[20]. Ni、Cu、Zn 和 Pb 在超过 95% 的采样点均高于其相应的背景值, As、Cd、Cr 和 Hg 超过其相应背景值的采样点比例分别为 81.91%、76.60%、63.83% 和 47.87%.

由图 2 可知, 河流沉积物中 Cr、Ni、Zn、Hg 和 Cu 的含量在空间分布上具有一致性, 整体呈现由北向南、由东向西逐渐减少的趋势, 这 5 种重金属含量的高值部分均出现在太湖流域北部地区的洮湖水系, Ni、Zn 和 Cu 的低值部分均出现在流域西南部的苕溪水系, Cr 和 Hg 的含量则是南河水系最小; Cd 在整个区域呈现由西北向东南递减的趋势, 污染最严重的区域出现在南河水系, 低值部分出现在杭州湾-长江口水系; As 和 Pb 则表现出北高南低、西高东低的趋势, As 的高值部分主要出现在苕溪水系, Pb 的高值部分主要出现在洮湖水系, As 和 Pb 的低值部分均出现在杭州湾-长江口水系. 6 条水系沉积物中 As、Cd 和 Cu 的含量差异显著($P < 0.05$), 其他重金属含量则不显著($P > 0.05$). 水系沉积物中 As 平均含量依次为: TX($16.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > TG($15.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > NH($14.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > YJ($13.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > HP($13.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > HY($10.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 水系沉积物中 Cd 平均含量依次为: NH($1.269 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > TG($0.719 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > TX($0.660 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > YJ($0.435 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > HP($0.355 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > HY($0.279 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 由此可见入湖水系的 As 和 Cd 含量明显高于出湖水系, 水系沉积物中 Cu 平均含量则为: TG($83.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > HP($68.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > YJ($60.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > NH($52.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > HY($50.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > TX($31.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Cr、Ni、Zn 和 As 的变异系数处于 30% ~ 90% 之间; Cu、Cd、Pb 和 Hg 的变异系数超过了 110%, 特别是 Cu、Pb 和 Hg 的变异系数分别为 378.14%、457.1% 和 291.7%, 表明这些重金属含量存在显著的空间异质性. 当 CV 超过 20% 时, 人类活动是导致重金属含量空间差异的主要驱动因子^[15,16,21]. 洮湖水系流经城市建筑群以及高度集约化的农业生产区, 水系沉积物中重金属含量与工业废水、城镇生活污水以及农业畜牧业污染排放直接相关^[6]; 黄浦江水系、杭州湾-长江口水系和沿江水系不仅流经城市建筑群, 且水上交通发达, 水系沉积物中重金属含量与城镇生活污水以及船只活动密切相关; 苕溪水系、南河水系主要流经林区, 但也受到生活污水点源以及农业面源污染影响. 因此, 在经济高度发达区域频繁的人类活动是河流沉积物重金属含量空间差异的主要驱动力^[22,23].



由描述性统计分析可知 Fe 的 CV 值低于 20%，且太湖流域河流表层沉积物 Fe 的平均含量与背景值相接近，表明 Fe 主要来自于自然来源。Hg 的 CV 值为 291.7%，但 Hg 的平均含量与背景

值接近, 这表明 Hg 在沉积物中的累积不仅与污染来源有关, 还会受到元素自身的物理化学性质、元素间的竞争吸附关系和 pH 等因素的影响^[4]. OM、TP、TN、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Mn

的 CV 值均高于 30%，且各元素的平均含量均大于其相应的背景值，表明这些元素受人类活动的影响较大。

2.2 水系沉积物中重金属污染评价

2.2.1 地累积指数法评价结果

根据重金属 I_{geo} 分级标准，Pb、Ni、Zn、Cu 和 Cd 整体上处于低污染状态(表 1)。在所有采样点中，Pb 处于轻度污染状态的占 53.19%，偏中度污染的占 25.53%，中度及以上污染水平共占 7.45%；Ni 处于轻度污染状态的占 57.45%，偏中度污染的占 26.60%，中度及以上污染水平共占 15.95%；Zn 处于轻度污染状态的占 44.68%，偏中度污染的占 31.91%，中度及以上污染水平共占 8.5%；Cu 处于轻度污染状态的占 37.23%，偏中度污染的占 25.53%，中度及以上污染水平共占 37.24%；Cd 处于轻度-偏重度污染的各占 30.85%、13.83%、8.51% 和 1.06%。Cr、As 和 Hg

的污染程度较轻，50% 以上的采样点均处于清洁状态。辽河保护区采样点沉积物重金属的 I_{geo} 顺序为 $As > Cd > Cr > Cu > Cd > Ni > Pb > Zn$ ^[24]；其他重金属(除 As 外)的 I_{geo} 均小于 0，污染状况显著低于太湖流域；但在华南地区典型河流沉积物重金属的 I_{geo} 顺序为 $Cd > Hg > As > Zn > Cu > Pb > Cr$ ^[25]，其他重金属(除 Pb 和 Cr 外)的 I_{geo} 均大于 1，处于偏中度污染及以上水平，显著高于太湖流域地区。Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 是南河水系、洮湖水系的主要污染物，在两条水系的绝大多数采样点(>70%)均处于有污染状态，特别是南河水系的 Pb 以及洮湖水系的 Ni 和 Cu 在所有的采样点均处于有污染状态。沿江水系(>60%)和杭州湾-长江口水系(>80%)中多数采样点的 Ni、Cu、Zn 和 Pb 处于有污染状态。Ni、Zn、As 和 Pb 是黄浦江水系、苕溪水系表层沉积物中的主要污染物，此外，Cu 和 Cd 分别是黄浦江水系、苕溪水系的污染重金属。

表 1 太湖流域河流表层沉积物重金属污染评价

Table 1 Pollution assessment of heavy metals in surface sediments of rivers in Lake Taihu Basin

项目	项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
I_{geo}	均值	-0.22	0.64	0.66	0.89	-0.08	0.24	0.65	-0.60
	最小值	-1.78	-0.74	-1.10	-1.25	-1.12	-1.79	-0.46	-2.56
	最大值	2.14	2.57	7.25	3.79	2.13	3.76	7.54	5.09
	标准差	0.79	0.65	1.26	0.88	0.55	1.16	1.08	1.21
P_{ij}	均值	1.29	2.33	2.37	2.77	1.42	1.77	2.36	1.00
	最小值	0.44	0.90	0.71	0.63	0.69	0.43	1.09	0.25
	最大值	6.60	8.92	228.66	20.76	6.56	20.31	279.74	50.94
	标准差	1.09	1.33	23.71	3.00	0.75	2.83	28.66	5.77
E_i^r	均值	2.58	11.67	11.83	2.77	14.19	53.18	11.78	39.53
	最小值	0.87	4.48	3.57	0.63	6.89	12.99	5.44	10.15
	最大值	13.20	44.62	1 143.31	20.76	65.64	609.21	1 398.70	2 037.60
	标准差	2.19	6.65	118.57	3.00	7.48	84.94	143.29	230.74

2.2.2 污染负荷指数法评价结果

根据沉积物重金属 PLI 分级标准，除 Hg 外，其他 7 种重金属均存在污染，其中 Pb、Ni、Zn 和 Cu 整体上处于中度污染状态且绝大多数采样点(>95%)均处于污染状态，Cd、Cr、As 处于低污染状态，有 60% 以上的采样点存在污染，整体上 Hg 污染程度较轻，52.13% 的采样点处于无污染状态(表 1)。整体来看，太湖流域北部沉积物重金属综合污染负荷最高(图 3)，采样点沉积物中重金属的 PLI 值变化幅度为 0.75~8.80，其中无污染的采样点为 8.51%，低污染的采样点为 51.06%，中度污染和强污染的采样点共占 40.43%，这表明太湖流域河流表层沉积物重金属总体污染负荷较重，尽管 6 条水系间沉积物中重金属 PLI 值差异性不显著($P > 0.05$)，但整体上

洮湖水系的沉积物重金属污染最为严重(图 4)。太湖流域河流表层沉积物中重金属总体 PLI 值为 1.91，表明重金属综合污染程度已达到中度污染水平。底格里斯河流域平均 PLI 值为 1.88^[17]，与太湖流域 PLI 值接近，均属于中度污染水平；孟加拉北部城市河流的所有采样点的 PLI 值均超过 1，总体处于极强污染水平^[26]，污染程度远高于太湖流域地区。太湖流域六条水系沉积物重金属 PLI 值为 TG(2.57) > HP(2.02) > YJ(1.97) > NH(1.85) > TX(1.71) > HY(1.52)，各水系均已达到中度污染水平，其中洮湖水系、黄浦江水系整体已达到强污染水平，Pb、Ni、Zn 和 Cu 均为主要污染重金属，且在 90% 以上采样点中均存在污染。此外，南河水系的 Cd 污染也较为明显，As 和 Cd 则是苕溪水系沉积物中主要污染重金属。

2.2.3 潜在生态风险指数法评价结果

太湖流域 6 条水系沉积物中 Cd 和 Hg 处于中等潜在生态风险，其他重金属均处于低潜在生态风险。Pb、Ni、Zn、Cu、Cr 和 As 均在 90% 以上的采样点沉积物中处于低潜在生态风险状态，其中 Cr 和 Zn 在所有采样点沉积物中均存在低潜在生态风险；Cd 和 Hg 处于中等-严重潜在生态风险的样点占比分别为 61.70% 和 47.87%（表 1）。整体来看，太湖流域北部沉积物重金属潜在生态风险最高（图 3），重金属潜在生态风险值变化幅度为 55.00 ~ 2128.42，平均值为 266.61。45.74% 采样点表层沉积物重金属潜在生态风险处于低水平，35.11% 的

处于中等水平，19.15% 的为重度 and 严重水平。6 条水系沉积物重金属 RI 值差异性不显著 ($P > 0.05$)，综合潜在生态风险程度均为中等。太湖流域北部的洮漏水系、南河水系潜在生态风险整体上高于其他四条水系（图 4），而杭州湾-长江口水系、苕溪水系 70% 以上采样点沉积物中重金属处于低-中等潜在生态风险，且无采样点处于严重潜在生态风险。青海湖流域河流 8 种重金属元素 RI 处于 22.11 ~ 352.55 之间，平均值为 150.55^[27]，与太湖流域同处中等危害等级，而辽河保护区综合潜在 RI (126.14 ~ 780.38)，处于重度潜在生态风险^[24]，显著高于太湖流域。

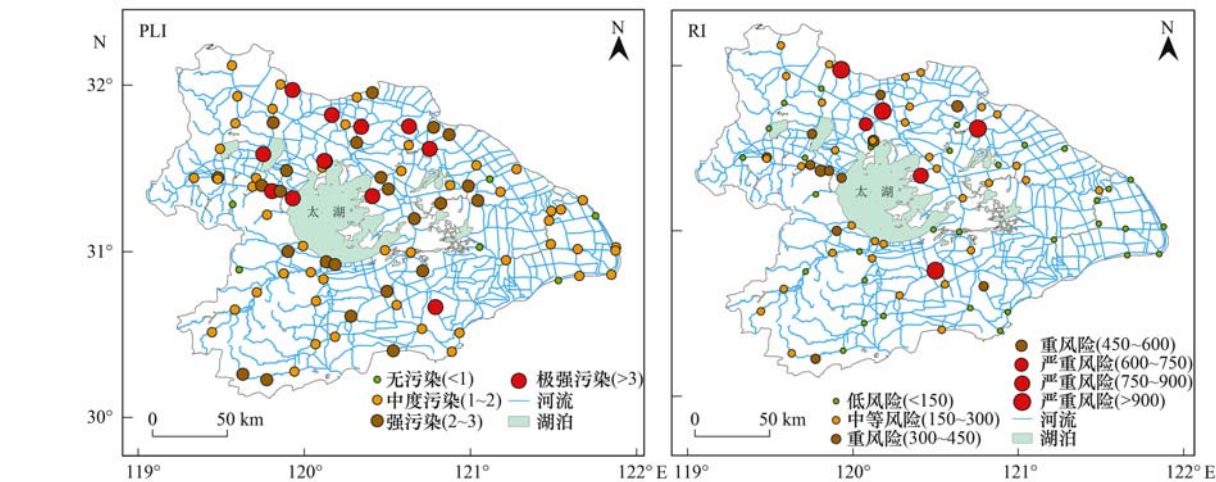


图 3 污染负荷指数和潜在生态风险指数空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of pollution load index and potential ecological risk index

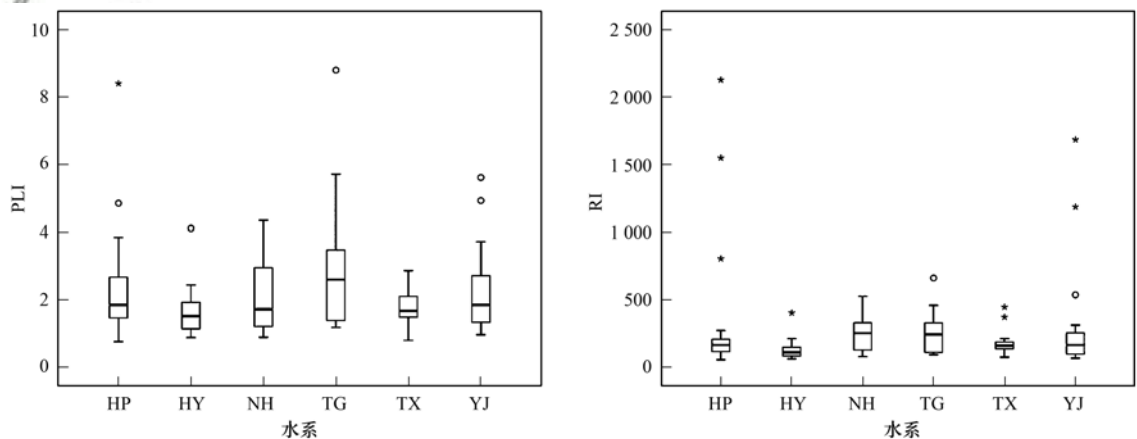


图 4 太湖流域不同水系的污染负荷指数和潜在生态风险指数

Fig. 4 Pollution load index and potential ecological risk index of different river systems in Lake Taihu Basin

2.2.4 沉积物质量基准法评价结果

SQG 反映沉积物中重金属对底栖生物影响的可能性，太湖流域河流表层沉积物中重金属对底栖生物影响可分为 3 类：①Cd 和 Hg 的平均含量均低于其相应的 ERL 和 TEL，且 98.94% 和 64.89% 的采样点中 Cd 平均含量分别低于 ERL 和 TEL，68.09%、78.72% 的采样点中 Hg 分别低于 ERL 和

TEL。因此，这两种金属在大多数样点几乎未产生负面生物效应。②As 和 Cu 的平均含量均低于 ERL，且介于 TEL ~ PEL 之间，As、Cu 的含量分别在 97.87%、71.28% 采样点中低于 ERL，但采样点中 As 的含量均高于 TEL，35% 的采样点中 Cu 的含量低于 TEL；Zn 和 Pb 平均含量均介于 TEL ~ PEL 和 ERL ~ ERM 之间，Zn 和 Pb 的含量低于各自 ERL

的采样点比例分别为 28.72% 和 42.55%，低于各自 TEL 的采样点比例分别为 30.85% 和 42.55%。因此，As、Cu、Zn 和 Pb 导致底栖生物的生物毒性效应偶有发生。③Cr 和 Ni 的平均含量均处于相应的 ERL~ERM 之间，且高于 PEL，Cr 和 Ni 的含量低于各自的 TEL 采样点比例分别为 2.13%、1.06%，低于各自 ERL 的比例分别为 37.23% 和 15.26%，这表明在大多数样点沉积物中 Cr 和 Ni 频繁对底栖生物产生生物毒性效应。

地累积指数、污染负荷指数和沉积物质量基准法的评价结果较为一致，Pb、Ni、Zn 和 Cu 是太湖流域河流沉积物中主要的重金属污染物。在地累积指数、污染负荷指数评价中 Cd、Cr 和 As 均处于低污染状态，而在沉积物质量基准评价中，Cr 在多数样点会频繁产生生物毒性效应，As 在多数样点对底栖生物的生物毒性效应偶有发

生。由于潜在生态风险指数考虑了重金属的毒性响应因子，且 Cd、Hg 的毒性响应因子较高，因此，Cd、Hg 处于中等潜在生态风险，其余的 6 种金属均处于低潜在生态风险，这也被于佳佳证实^[4]。

2.3 基于多元统计的重金属来源分析

2.3.1 相关矩阵

统计分析表明，OM、TP、TN、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 之间存在显著的正相关(表 2)，表明这些组分有共同的来源，且主要来自于人为源。OM、TP、TN、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 和 Mn 均与 Fe 具有显著的相关性($P < 0.01$)，表明这 12 种组分可能部分来自于自然源，同时也说明氧化铁或氢氧化铁是上述金属的主要结合形式^[28]。Mn 与其他组分相关性不显著(As 和 Fe 除外)，表明 Mn 与这些组分不具有同源性。

表 2 经对数转换后不同元素的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 2 Pearson's correlation coefficients among the different components after logarithmic transformation

	OM	TP	TN	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Fe	Mn
OM	1	0.69**	0.83**	0.51**	0.56**	0.57**	0.65**	0.39**	0.43**	0.53**	0.51**	0.55**	0.17
TP		1	0.72**	0.70**	0.75**	0.75**	0.78**	0.46**	0.40**	0.61**	0.55**	0.71**	0.18
TN			1	0.55**	0.64**	0.58**	0.65**	0.47**	0.49**	0.60**	0.53**	0.67**	0.27**
Cr				1	0.80**	0.75**	0.75**	0.50**	0.33**	0.50**	0.59**	0.60**	-0.02**
Ni					1	0.76**	0.72**	0.55**	0.40**	0.50**	0.52**	0.74**	0.05**
Cu						1	0.77**	0.58**	0.38**	0.49**	0.56**	0.57**	0.05**
Zn							1	0.64**	0.61**	0.62**	0.60**	0.60**	0.06**
As								1	0.59**	0.50**	0.42**	0.65**	0.44**
Cd									1	0.51**	0.35**	0.33**	0.27**
Pb										1	0.41**	0.44**	0.25*
Hg											1	0.39**	0.05
Fe												1	0.42**
Mn													1

1) * 表示相关系数在 0.05 水平上显著；** 表示相关系数在 0.01 水平上显著

2.3.2 主成分分析

主成分分析(PCA)能够得到一些有关污染源信息的因素组合。结果表明，PCA 将数据集的初始维数减少至 4 个部分，解释了 75.49% 的总方差(表 3)。第一主成分以 Cr、Ni、Zn、As、TP、Cu 和 Fe 为主，解释了 34.52% 的总方差。第二主成分以 Pb、OM、TN 和 TP 为主，解释了 19.99% 的总方差，TP (0.54) 的载荷低于组内其他组分的载荷。第三主成分以 As、Mn、Cd 和 Fe 为主，但 Mn 与 Cd 的相关程度较低，表明 Mn 和 Cd 具有不同的来源，其中 As 和 Fe 的载荷(0.46 和 0.45) 低于组内其他组分的载荷，解释了 12.94% 的总方差。第四主成分以 Hg 为主，解释了 8.04% 的总方差。

2.3.3 聚类分析

采用 War's 方法，按照欧几里德距离对太湖流

域河流表层底泥中的 13 种组分进行系统聚类，并使用 Z-score 对各变量进行标准化以降低不同金属的含量差异对聚类的影响，13 种组分大致可分为 5 类：第一类为 OM、TN 和 Pb；第二类为 Cr、Ni、Zn、Fe 和 TP；第三类为 Cu 和 As；第四类为 Cd 和 Mn；第五类为 Hg(图 5)。

2.3.4 溯源分析

尽管 Hg 与其余组分(Mn 除外)均存在相关性，但基于 PCA 和 CA 的分析，Hg 与其他组分明显不同，表明 Hg 的来源与其他组分不同，这与变异系数的分析具有一致性。Pb 与其余组分(Mn 除外)均存在相关性，但在 PCA 和 CA 分析中与其余组分(OM 和 TN 除外)相关性较差，表明 Pb 与其他金属元素来自于不同的污染源。在 PCA 和 CA 分析中 Cd 和 Mn 分在同一组内，但是两种元素的相关程度

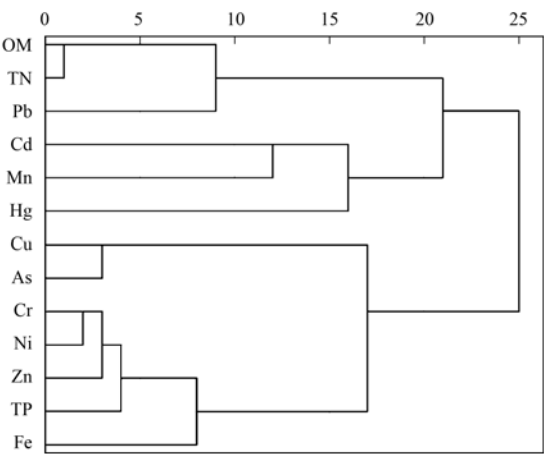


图5 基于 War's 的层次聚类法获得的 13 种组分的树形图

Fig. 5 Dendrogram for 13 components obtained by War's hierarchical clustering method

表3 太湖流域表层沉积物中组分的主成分分析
Table 3 Principle component analysis for components in the surface sediments of Lake Taihu Basin

变量	因子载荷				变量 共同度
	PC1	PC2	PC3	PC4	
Cr	0.84	0.21	-0.15	0.16	0.80
Ni	0.84	0.25	0.01	0.14	0.79
Cu	0.65	-0.09	0.17	-0.22	0.51
Zn	0.85	0.25	-0.03	0.01	0.78
As	-0.78	-0.03	0.46	-0.05	0.82
Cd	0.36	0.18	0.49	-0.19	0.44
Pb	-0.09	0.86	-0.04	-0.03	0.74
Hg	0.08	-0.02	0.05	0.93	0.87
Fe	0.62	0.25	0.45	0.17	0.68
Mn	-0.10	0.06	0.91	0.13	0.86
OM	0.36	0.83	0.10	-0.01	0.83
TP	0.71	0.54	0.13	0.07	0.82
TN	0.40	0.78	0.33	0.01	0.87
特征值	4.49	2.60	1.68	1.05	
方差贡献率/%	34.52	19.99	12.94	8.04	
累积贡献率/%	34.52	54.51	67.45	75.49	

较低,且在聚类分析中距离较远,表明两种元素来自于不同的人为源.统计分析表明 Cr、Ni 和 Zn,以及 Cu 和 As 均存在较强的相关性,具有共同的来源.基于上述分析可将 8 种元素的来源分为五类:第一类为 Pb, Pb 与 OM 以及 TN 存在较强的相关性,因此 Pb 主要来自于生活污水和农业污染排放,部分 Pb 还来自于汽油燃烧和工业排放;第二类为 Cr、Ni、Zn,这 3 种重金属在太湖流域北部电镀及制造行业较发达的地区较高,且与 TP、Fe 相关性较强,表明这 3 种元素属于混合源,除受到岩石风化、侵蚀等自然因素外,还受到电镀及合金制造行业等方面的影响;第三类为 Cu 和 As,As 在以农业面源污染为主的南河水系、苕溪水系含量较高,且两种重金属在工业较发达的太湖流域北部地区均存

在严重污染,表明两种重金属主要来自于农药和工业废水的排放^[29];第四类为 Cd,洮滂水系一带冶炼工业发达,是 Cd 的主要来源^[2];第五类为 Hg,其主要来源于化石燃料和石油产品的燃烧^[2].流域重金属污染与周边工业生产、农业活动、经济发展以及土地利用类型的改变有着密切的关系,太湖流域工业结构布局分散、污水排放处理达标难、农业面源污染控制难是该地区重金属污染的主要原因,应强化对太湖流域污染物质外源排入的监控,同时通过底泥疏浚等方式去除内源污染,降低太湖流域河流表层沉积物重金属含量及污染程度^[30,31].

3 结论

(1)太湖流域河流沉积物中 Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As 和 Cd 的平均含量均高于其背景值. Cr、Ni、Zn、Hg 和 Cu 的含量在空间分布上呈由北向南、由东向西逐渐减少的趋势;Cd 呈由西北向东南递减的趋势;As 和 Pb 则表现出北高南低、西高东低的趋势.

(2)地累积指数评价中 Pb、Ni、Zn、Cu 和 Cd 处于低污染状态,在污染负荷指数评价中 Pb、Ni、Zn 和 Cu 处于中度污染状态,Cd、Cr 和 As 处于低污染状态,在潜在生态风险评价中 Cd 和 Hg 处于中等潜在生态风险,其余重金属均处于低潜在生态风险.

(3)Pb 主要来自于生活污水和农业污染排放;Cr、Ni 和 Zn 受到自然分解以及电镀及合金制造行业的影响;Cu 和 As 主要来自于农药和工业废水排放;Cd 主要来自于冶炼工业;Hg 主要来源于化石燃料和石油产品的燃烧.

参考文献:

[1] 季斌,杭小帅,梁斌,等. 湖泊沉积物重金属污染研究进展[J]. 污染防治技术, 2013, 26(5): 33-40.
Ji B, Hang X S, Liang B, et al. Advances in heavy metals contamination of lake sediment [J]. Pollution Control Technology, 2013, 26(5): 33-40.
[2] 熊春晖,张瑞雷,吴晓东,等. 滂湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 925-934.
Xiong C H, Zhang R L, Wu X D, et al. Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Lake Gehu in southern Jiangsu Province, China [J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 925-934.
[3] 张家泉,田倩,许大毛,等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2355-2363.
Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2355-2363.
[4] 于佳佳,尹洪斌,高永年,等. 太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2287-

- 2294.
- Yu J J, Yin H B, Gao Y N, *et al.* Characteristics of nutrient and heavy metals pollution in sediments of Taihu watershed [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2287-2294.
- [5] 边博, 周燕, 张琴. 太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1442-1450.
- Bian B, Zhou Y, Zhang Q. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals from river network sediment in western area of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1442-1450.
- [6] Wu Z S, Wang X L, Chen Y W, *et al.* Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 914-922.
- [7] Muller G. Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geo Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [8] Bhuiyan M A H, Parvez L, Islam M A, *et al.* Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**(1-3): 384-392.
- [9] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgolander Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1-4): 566-575.
- [10] 张珍明, 林绍霞, 张清海, 等. 草海湖湿地重金属分布特征及污染负荷[J]. *水土保持研究*, 2014, **21**(2): 279-284. PH am
- Zhang Z M, Lin S X, Zhang Q H, *et al.* Distribution pattern of the heavy metals and its pollution load in Caohai wetland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(2): 279-284.
- [11] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [12] Zhang Y, Shi T R, Zhang Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from a hypertrophic plateau lake Dianchi, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(2): 1219-1234.
- [13] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**(1): 20-31.
- [14] Hahladakis J, Smaragdaki E, Vasilaki G, *et al.* Use of Sediment quality guidelines and pollution indicators for the assessment of heavy metal and PAH contamination in Greek surficial sea and lake sediments[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(3): 2843-2853.
- [15] Wang L F, Yang L Y, Kong L H, *et al.* Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **140**: 87-95.
- [16] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [17] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 355-364.
- [18] Lee C S L, Li X D, Shi W Z, *et al.* Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **356**(1-3): 45-61.
- [19] Li F, Huang J H, Zeng G M, *et al.* Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, **132**: 75-83.
- [20] Deng J C, Wang Y S, Liu X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals and As pollution in the sediments of a shallow lake [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(5): 296.
- [21] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **108**(1): 27-38.
- [22] Liu Y Z, Engel B A, Collingsworth P D, *et al.* Optimal implementation of green infrastructure practices to minimize influences of land use change and climate change on hydrology and water quality: Case study in Spy Run Creek watershed, Indiana[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 1400-1411.
- [23] Putro B, Kjeldsen T R, Hutchins M G, *et al.* An empirical investigation of climate and land-use effects on water quantity and quality in two urbanising catchments in the southern United Kingdom[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 164-172.
- [24] Ke X, Gui S F, Huang H, *et al.* Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China[J]. *Chemosphere*, 2017, **175**: 473-481.
- [25] Liao J B, Chen J, Ru X, *et al.* Heavy metals in river surface sediments affected with multiple pollution sources, South China: Distribution, enrichment and source apportionment[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **176**: 9-19.
- [26] Islam S, Ahmed K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 282-291.
- [27] 李少华, 王学全, 高琪, 等. 青海湖流域河流生态系统重金属污染特征与风险评价[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(9): 1288-1296.
- Li S H, Wang X Q, Gao Q, *et al.* Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in river ecosystems of Qinghai Lake Basin. [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(9): 1288-1296.
- [28] 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.
- [29] 魏大成. 环境中砷的来源[J]. *国外医学: 医学地理分册*, 2003, **24**(4): 173-175.
- [30] 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.
- [31] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 385-392.
- Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of eastern Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 385-392.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)