

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM_{2.5}浓度调控模拟 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM_{2.5}碳质组分特征 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM₁中金属元素污染特征及健康风险评估 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM_{2.5}中多环芳烃污染特征及来源分析 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH₄、CO₂和N₂O浓度的时空变化特征及影响因素 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险

许梦雅^{1,2}, 张超², 单保庆^{2,3}, 刘操^{4*}

(1. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 选取白洋淀中水道、沟壕、淀面和鱼塘这4种水体类型, 采用改进的BCR提取法分析沉积物中Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的形态特征, 运用潜在生态风险指数、次生相与原生相(RSP)和风险评估编码(RAC)等方法对白洋淀沉积物重金属含量进行系统性的污染评估和生态风险评价。结果表明: ① 沉积物中重金属 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 均值分别为0.37、28.49和83.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别有94.91%、73.91%和46.39%的点位超过土壤背景值。② Cd以非残渣态(F1 + F2 + F3)为主, 质量分数范围为54%~97%, Cr以残渣态(F4)为主, 质量分数为87%~99%。Cu、Ni、Pb和Zn主要以残渣态存在, 但在非残渣态中Cu和Ni以可氧化态(F3)为主, Pb和Zn以可还原态(F2)为主。③ 基于RAC评价结果: Cd在水道、沟壕、开阔淀面和鱼塘分别有68.97%、39.89%、54.84%和49.78%的点位存在风险, 而Cu、Ni和Pb等重金属风险较低。总体而言, 白洋淀重金属总体污染水平较低, 但在南刘庄片区的府河和白沟引河入河口等部分水道区域Cd存在生态风险和较高的生物可利用性。

关键词: 白洋淀; 沉积物; 重金属; 赋存形态; 生物可利用性

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4532-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110151

Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake

XU Meng-ya^{1,2}, ZHANG Chao², SHAN Bao-qing^{2,3}, LIU Cao^{4*}

(1. College of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The morphological characteristics of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in sediments were analyzed using an improved BCR extraction method in four water types of Baiyangdian Lake: watercourse, trench, lake surface, and fish pond. The potential ecological risk index, secondary and primary phases, and risk assessment codes were used to systematically assess the pollution level and ecological risk of heavy metals in surface sediments. The results showed that: ① the mean contents of heavy metals Cd, Cu, and Zn in the sediments were 0.37, 28.49, and 83.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, 94.91%, 73.91%, and 46.39% of which exceeded the soil background value. ② Cd was dominated by the non-residual fraction (F1 + F2 + F3) with a fraction ranging from 54% to 97%, whereas Cr was dominated by the residual fraction (F4) with a mass fraction ranging from 87% to 99%. Cu, Ni, Pb, and Zn were mainly in the fraction of residual fraction. In the non-residual fraction, Cu and Ni were mainly in the oxidizable fraction (F3) state, whereas Pb and Zn were mainly in the reducible fraction (F2) state. ③ The RAC risk assessment results showed that there were 68.97%, 39.89%, 54.84%, and 49.78% points in channel, trench, open water, and fish pond samples, respectively, of Cd at high risk. The Cu, Ni, and Pb were at low risk. In general, the overall heavy metal pollution level in Baiyangdian Lake was low, but Cd had ecological risk and high bioavailability in the Fuhe River of the Nanliuzhuang area and the Baigouyin River.

Key words: Baiyangdian Lake; sediment; heavy metals; chemical speciation; bioavailability

重金属具有分布广泛、难降解、生物积累性大和毒性高等典型特征, 直接或间接地对水生生物产生致毒致害作用, 超过一定程度时直接对底栖生境造成破坏^[1,2]。重金属的生物利用度和生物毒性不仅受到重金属总浓度的影响, 还受到赋存形态的影响, 即重金属的不同化学形式具有不同的化学稳定性和生物利用性, 构成不同的生态风险^[3], 国内外学者研究结果表明, 对沉积物中重金属进行形态分析能更好地评价其潜在生态危害性和可迁移性^[4,5]。目前, 对于沉积物重金属的赋存形态分析常用BCR分步提取法, 由于其步骤简便, 精确度高, 稳定性好, 现已广泛应用于重金属形态的分析^[6]。

白洋淀是中国北方最大的天然淡水湖, 在调节气候、维持生态平衡和控制区域生态系统洪水方面发挥着不可替代的作用^[7]。近年来, 白洋淀生态环境受到了严重的污染, 主要问题是河流污染输入、工农业废水排放、底泥及生物源内源性污染等造成的氮磷营养盐和重金属的累积, 潜在生态风险系数较高^[8]。目前白洋淀基于沉积物重金属研究较多, 杨卓等^[9]对白洋淀开阔水域21个样点的重金属总

收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2022-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907267)

作者简介: 许梦雅(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域沉积物风险诊断与修复, E-mail: 844989413@qq.com

* 通信作者, E-mail: lc@bwsiti.com

量进行潜在生态危害指数评价,得出白洋淀普遍受 Cd 污染的结论,向语兮等^[10]采用连续提取法对白洋淀开阔水域 40 个样点的重金属赋存特征进行研究,得出白洋淀重金属含量的差异更多是由次生相含量变化引起的,Cd 具有较高的污染风险,其生物可利用性较大;张杨等^[11]研究白洋淀村落水域重金属分布特征,得出白洋淀淀中村周边水域沉积物会为淀泊带来潜在风险,影响白洋淀水生态健康.以上研究均基于白洋淀的某一水体类型,但白洋淀与其他湖泊不同,淀区土地利用类型以苇地、水塘、开阔水域和村落为主^[12],不同的水体沉积物会造成生态风险阈值的波动^[13],因此对白洋淀不同水体类型开展沉积物重金属研究,为加强对白洋淀沉积物的污染治理与降低生态风险提供依据,以支撑白洋淀全面生态清淤和内源污染治理,对于雄安新区的生态环境建设十分必要.

本文通过对白洋淀不同水体类型表层沉积物进行采样调查研究,旨在:①评估白洋淀不同水体类型表层沉积物重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)总量和赋存形态,比较不同水体类型中重金属的分布差异;②评估各水体类型中重金属的污染程度及风险等级,以期对白洋淀区域沉积物重金属的污染现状及其环境质量的改善提供基础依据,进而为白洋淀的底栖生境恢复提供理论和科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

白洋淀(38°43'~39°02'N, 115°38'~116°07'E)属海河流域大清河南支水系湖泊,位于河北省中部,是华北平原最大的草型浅水湖泊.属温带季风型大陆性半湿润半干旱气候,年内降水量分配极不均匀,70%~80%集中在6~8月^[14].白洋淀湖由143个小湖泊组成,由数千条沟壕相连,主要水体类型分为水道(用于进出淀中村的航道水域)、沟壕(位于芦苇台田之间的水域)、开阔淀泊水面(淀面,下同)和鱼塘(人工利用围堤围埝建立的封闭鱼塘)这4种^[11],随着经济的发展,白洋淀已成为雄安新区的核心水域,其绿色发展及生态修复备受关注,因此在其生态恢复之前,应进行详细的污染风险评估.

1.2 沉积物样品的采集与前处理

根据地理位置白洋淀分成14个片区,每个区域按照淀面、水道、沟壕和鱼塘这4种不同的水体类型进行采样,共计102个点位,如图1所示.本研究于2020年9月使用彼得森采泥器采集表层(深度0~10 cm)沉积物,装入自封袋密封保存,带回实验室于-20℃低温保存.沉积物样品采用真空冷冻干

燥机(型号FD-1A-50,厂家:北京博医康实验仪器有限公司)进行预处理,除去冷干样品中的砾石和动植物残体等,采用玛瑙研钵研磨后过100目尼龙筛,将筛后的样品置于4℃冰箱备用.

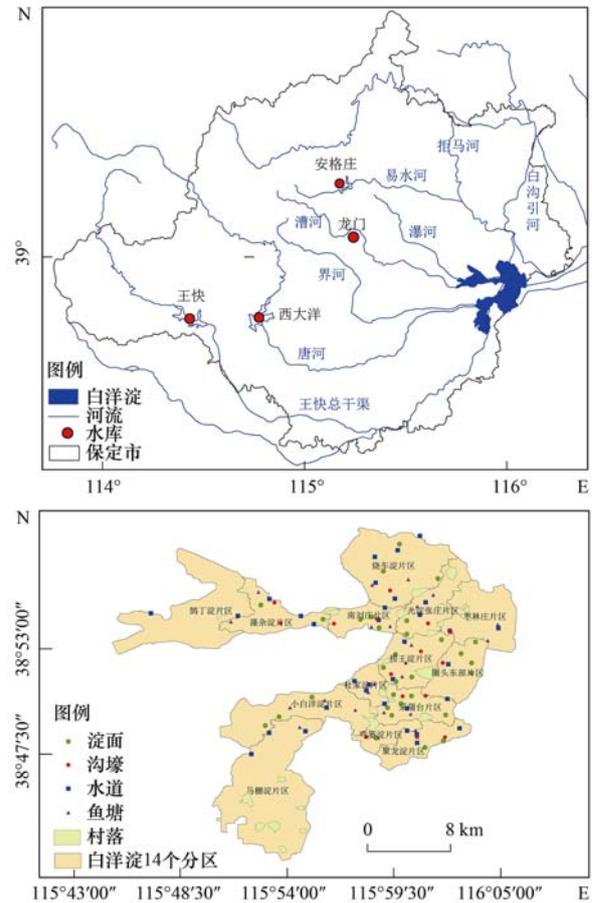


图1 白洋淀沉积物采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of the sediments in Baiyangdian Lake

1.3 沉积物样品实验分析

沉积物重金属总量采用硝酸-盐酸-氢氟酸微波消解法提取^[15],称取筛后的沉积物样品0.2 g(精确至0.0001 g),加入12 mL王水和4 mL氢氟酸,拧紧盖子按顺序放入消解盘,接着放入微波消解仪(型号:907511,厂家:培安有限公司)进行消解.其后进行赶酸,将赶酸器温度调至150℃,向消解管中加入1~2滴高氯酸,直至剩余液体为黄豆粒大小即为赶酸结束.之后经0.45 μm的滤膜过滤至离心管,放入4℃冰箱内冷藏备用.

重金属赋存形态测定:称取0.5000 g(精确到0.0001 g)沉积物样品,采用改进的BCR三步提取法,得到4种赋存形态(可交换态及碳酸盐结合态F1、铁锰氧化物结合态F2、有机物及硫化物结合态F3和残渣态F4)^[16].铁元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪ICP-OES(OPTIMA 2000 DV, Perkin Elmer, USA)测定^[17];Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn元素采用电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS(7500 a,

Agilent, USA) 测定^[18]. 实验所用药品均为优级纯. 为了保证实验质量和回收率, 实验中采用沉积物标准物质(GBW07427)和重金属顺序提取形态标准物质(GBW07436), 各形态回收率均在 85%~120% 之间, 将 BCR 提取的 4 种重金属形态含量之和与沉积物中重金属总量相比, 其回收率在 80%~130%, 空白样和平行样也均符合质量控制和质量保证的要求.

1.4 重金属污染评价方法

1.4.1 富集系数

富集系数(EF)用于评价沉积物中重金属的污染程度和确定其来源^[19]. 本文用 Fe 作为标准化元素, 采用河北省的土壤背景值作为背景值^[20], 公式如下:

$$EF = [C_i/Fe]_s / [C_i/Fe]_b \quad (1)$$

式中, $[C_i/Fe]_s$ 为沉积物中重金属 i 与沉积物中 Fe 含量的比值; $[C_i/Fe]_b$ 为环境中该金属元素背景值与 Fe 背景值的比值. 当 EF 值 < 1.5 时, 表明重金属主要来源于地壳和岩石圈的自然风化过程; > 1.5 则认为重金属主要来源为人为输入.

1.4.2 次生相与原生相比值法(RSP)

次生相与原生相比值法(ratios of secondary phase and primary phase, RSP)是基于重金属分布形态来判断元素污染程度的一种评估方法^[21], 公式为:

$$RSP = M_{sec} / M_{prim} \quad (2)$$

式中, RSP 为污染程度, M_{sec} 为沉积物重金属次生相(F1 + F2 + F3)提取态的含量, M_{prim} 为沉积物重金属原生相(F4)残渣态的含量. 次生相与原生相比值法分级标准见表 1.

表 1 次生相与原生相比值法分级标准

Table 1 Ratios of secondary phase and primary phase grading standards

风险等级	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
阈值区间	0 < RSP < 1	1 < RSP < 2	2 < RSP < 3	RSP > 3

1.5 重金属生态风险评价方法

1.5.1 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数法(comprehensive potential ecological risk index, RI)是基于重金属实测值与背景值比较及重金属的毒性系数的评价指标, 综合考虑各种重金属毒性、评价区域对重金属污染的敏感度和区域背景值差异^[22]. 计算公式如下.

单个重金属潜在生态风险指数(E_r^i):

$$E_r^i = T_r^i \times (C^i / C_n^i) \quad (3)$$

式中, C^i 为悬浮颗粒物中重金属 i 的浓度, C_n^i 是重

金属 i 的背景值, T_r^i 是重金属 i 的毒性值. Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的毒性值分别为 2、5、5、1、30 和 5.

多种重金属综合潜在生态风险指数(RI):

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (4)$$

式中, RI 为沉积物中各个重金属 E_r^i 的加和, 重金属综合潜在生态风险指数 RI 和潜在生态风险等级见表 2.

表 2 潜在生态风险指数分级标准

Table 2 Potential ecological risk assessment index grading standards

单因子潜在生态风险指数		综合潜在生态风险指数	
阈值区间	风险程度	阈值区间	风险程度
$E_r^i < 40$	轻微风险	RI < 150	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中等风险	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_r^i < 160$	较强风险	$300 \leq RI < 600$	高
$160 \leq E_r^i < 320$	强风险	RI ≥ 600	极高
$E_r^i \geq 320$	极强风险		

1.5.2 风险评估编码法(RAC)

风险评估编码法(risk assessment code, RAC)根据酸可提取态在总量所占的比例来评价其重金属的生态风险^[23], 公式为:

$$RAC = \left[\frac{C_{F1}}{C_{F1} + C_{F2} + C_{F3} + C_{F4}} \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中, RAC 为沉积物中重金属风险指数; C_{F1} 为酸可提取态含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_{F2} 为可还原态含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_{F3} 为可氧化态含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_{F4} 为残渣态含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 评估等级见表 3.

表 3 风险评估编码法分级标准

Table 3 Risk assessment code grading standards

范围	生物可利用度	风险等级划分
RAC < 1%	极低	无风险
1% < RAC < 10%	低	低风险
11% < RAC < 30%	中等	中等风险
31% < RAC < 50%	高	高等风险
RAC > 50%	极高	极高风险

1.5.3 毒性单元(TU)

毒性单元(toxic units, TU)是基于测量的金属含量与可能影响水平(probable effect level, PEL)的比值之和, 用于评估沉积物中重金属的潜在急性毒性^[24], 公式如下:

$$\sum TU = \sum_{i=1}^n C_T^i / C_{PEL}^i \quad (6)$$

式中, C_T^i 为重金属的总量, C_{PEL}^i 为重金属的 PEL 值. Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的 PEL 值分别为 4.2、160.4、108.2、42.8、112.2 和 271.

1.5.4 生物有效金属指数(BMI)

基于 BCR 分部提取法的酸可提取部分被作为

最具生物可利用的金属部分^[25]. 生物有效金属指数 (bioavailable metal index, BMI) 用于评估表层沉积物重金属的生物有效性^[26]. 其计算公式如下:

$$BMI = \sqrt[n]{T_{iE}/T_{iR} \times \cdots \times T_{iE}/T_{iR} \times \cdots \times T_{nE}/T_{nR}} \quad (7)$$

式中, T_{iE} 为 E 点重金属 i 的生物有效浓度, 在本研究中, 生物有效浓度是基于 BCR 分级中的 F1 态, T_{iR} 为相对应的土壤背景值 (取各个元素 F1 态的最小值).

1.6 数据处理

本研究使用 ArcGIS 10.3 制作采样图, 采用 Origin 2018 制作数据分析图表, 数据统计分析利用 Excel 2019 和 IBM SPSS Statistics 26 完成.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属含量空间分布特征

白洋淀表层沉积物中重金属含量不同程度地超过土壤背景值 (图 2 中黄色色块为河北省土壤背景

值). 6 种重金属元素含量均值分别为 0.37 (Cd)、58.31 (Cr)、28.49 (Cu)、29.40 (Ni)、22.14 (Pb) 和 83.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Zn).

$\omega(\text{Cd})$ 的变化范围为 0.08 ~ 1.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 所测样品中有 94.90% 的沉积物超过土壤背景值含量, 且均值高于背景值 3.94 倍; Cu、Pb 和 Zn 的含量均值分别是背景值的 1.31、1.03 和 1.05 倍, 表明白洋淀受到不同程度的人为污染^[27]; Cr 和 Ni 均值未超出土壤背景值. 从重金属含量空间分布上来看, 其空间差异性较大, 鹤丁淀、藻杂淀、南刘庄和烧车淀片区含量明显高于其他片区, 呈现北高南低的特征. Cd 和 Cu 在 4 种水体沉积物中由高到低的顺序为: 水道 > 淀面 > 沟壕 > 鱼塘; $\omega(\text{Pb})$ (45.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 $\omega(\text{Zn})$ (223.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的最高值的点位均位于水道. 总体来说, 白洋淀不同类型水体沉积物重金属含量分布特征相似, 呈现出北部淀区重金属含量高于其他淀区特点, 主要原因为白洋淀北部淀区受府河水质及淀区沼泽化、周边居民生活养

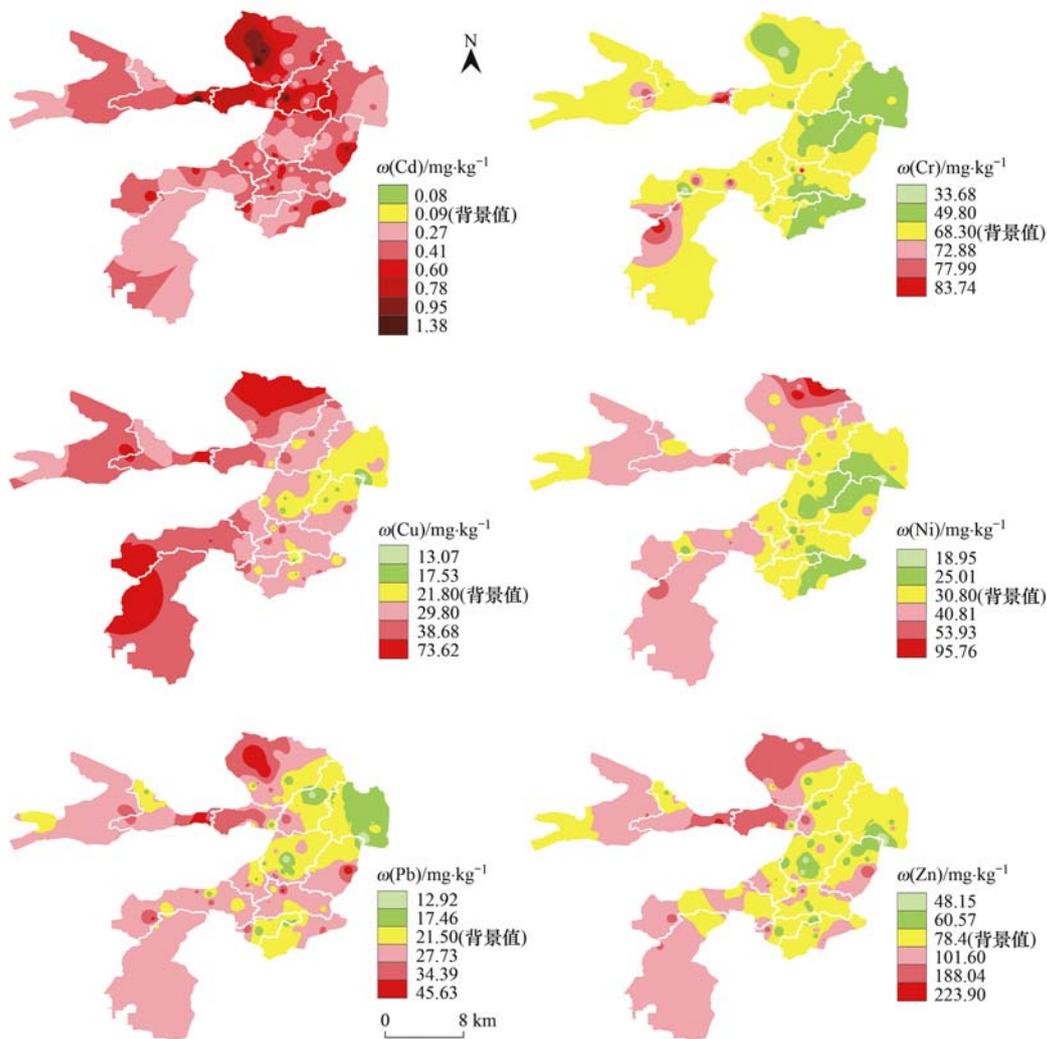


图 2 白洋淀表层沉积物重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in surface sediments of Baiyangdian Lake

殖和工业废水等严重影响^[28].

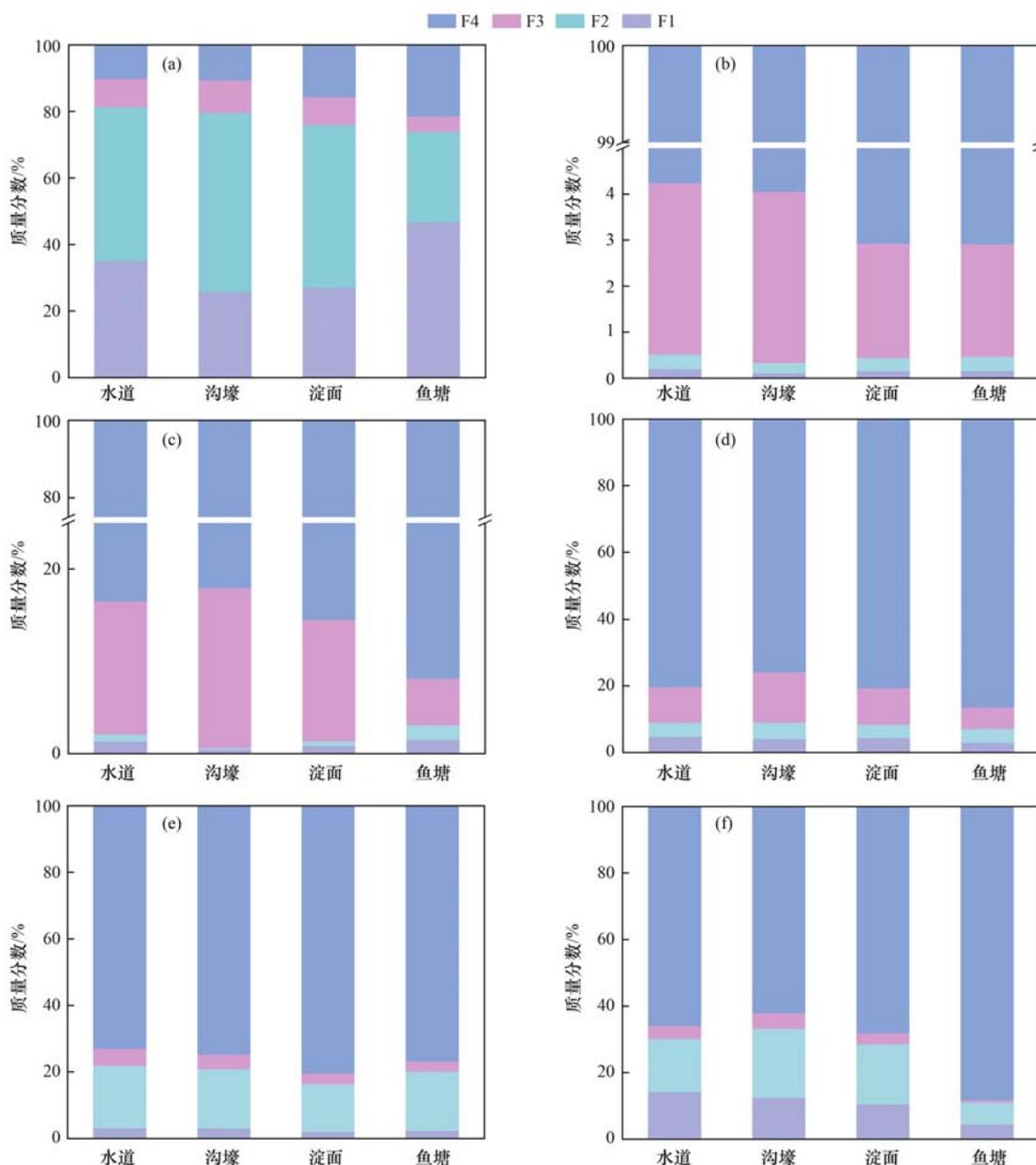
2.2 表层沉积物重金属赋存形态分布特征

沉积物的重金属赋存形态不仅揭示了重金属元素的迁移能力,也反映了重金属的潜在生物毒性^[29],即随着赋存形态的增加,生物毒性和迁移能力逐渐降低.本文采用改进的BCR提取法对白洋淀表层沉积物重金属进行分步提取,各形态含量如图3所示. Cd以非残渣态(F1 + F2 + F3)为主,所占质量分数和含量的均值分别为85%和 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.非残渣态在酸性条件下容易释放,进而易对环境和底栖生物产生毒性^[30],因此Cd在环境中可能容易释放潜在毒性. Cr、Cu、Ni、Pb和Zn残渣态(F4)含量较高,质量分数范围在73%~96%,残渣态主要赋

存在原生矿物和次生硅酸盐矿物晶格中,一般情况下难以释放,其迁移能力和生物有效性贡献小^[31],因此Cr、Cu、Ni、Pb和Zn对环境产生危害较小.

Cd非残渣态质量分数范围为54%~97%,主要以F2态为主,在4种水体类型中所占质量分数平均值分别为41%(水道)、51%(沟壕)、44%(淀面)和24%(鱼塘). Cd残渣态质量分数较低,分别为11%(沟壕) < 12%(水道) < 16%(淀面) < 25%(鱼塘). Cd的非残渣态质量分数高于残渣态,表明Cd在水道、沟壕和淀面的不稳定组分比重大,生物可利用性和迁移能力强,容易对水生生物产生毒性作用^[32].

Cu、Ni、Pb和Zn主要以残渣态(F4)存在,含



(a)Cd, (b)Cr, (c)Cu, (d)Ni, (e)Pb, (f)Zn

图3 白洋淀不同水体沉积物重金属形态分布

Fig. 3 Speciation distribution of heavy metals in surface sediments of different regions in Baiyangdian Lake

量分别为 27.92、27.24、12.09 和 64.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 质量分数范围为 73%~86%。其中, Cu 非残渣态中主要以 F3 态为主, 空间分布分别为 13% (水道)、17% (沟壕)、12% (淀面) 和 5% (鱼塘)。F3 结合态为硫化物和有机质, 一般只有在强氧化环境下才能被释放出来, 相对稳定性较高^[33]。而 Pb 以 F2 态为主, 大小分布为: 20% (水道) > 19% (沟壕) > 18% (鱼塘) > 16% (淀面), F2 为铁锰氧化物结合态, 当氧化还原电位降低时或水体缺氧时, 这种结合形态的重金属键被还原, 成为生物可利用态, 可能造成对水体的二次污染^[34]。

Cr 以残渣态 (F4) 为主, 含量和质量分数范围分别为 40.93~97.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 87%~99%, 其水体类型分布分别为 96% (水道)、95% (沟壕)、97% (淀面) 和 97% (鱼塘)。以 F4 态存在的重金属性质非常稳定, 不易对环境造成次生伤害, 极难被底栖生物利用^[31]。

水道和沟壕是白洋淀淀中村对外通道, 淀内交通、旅游多采用船运等方式, 沉积物重金属受人为输入的影响较大, 从而引起非残渣态含量较高, 鱼塘属于封闭水体, 沉积物主要受淀区土壤和自然风化

过程的影响。

2.3 沉积物重金属污染风险评价

2.3.1 潜在生态风险指数分析

如图 4(a) 所示, 白洋淀表层沉积物重金属潜在生态风险指数 (E_i^i) 均值顺序为: 115 (Cd) > 6 (Cu) > 5 (Pb) > 4 (Ni) > 2 (Cr) > 1 (Zn), 除 Cd 呈现中-较强风险, 其他 5 种重金属均呈现低风险水平。根据水体类型分析, 水道、沟壕和淀面这 3 种类型的 E_i^i -Cd 均值分别达到 133、137 和 141, 均呈现较强风险, 鱼塘均值为 51, 呈中等风险等级。从综合潜在生态风险指数来看, 如图 4(b), 白洋淀表层沉积物重金属呈现低风险 ($RI = 137 < 150$)。烧车淀片区和府河河口的沉积物重金属 RI 值较大, 最大值分别达到 469 和 441, 属于高风险等级。烧车淀位于白洋淀静水蓄积区, 目前已发生严重的沼泽化, 淀区有白洋淀景区, 其人类生活污水、渔业、养殖业及淀区周边工业废水等污染源造成重金属污染^[28]。府河主要接纳保定市生活污水和工业废水, 流经南刘庄后进入白洋淀淀区, 由于接纳污水量较大而且长期积累, 使得表层沉积物中重金属潜在生态危害比较严重^[35]。

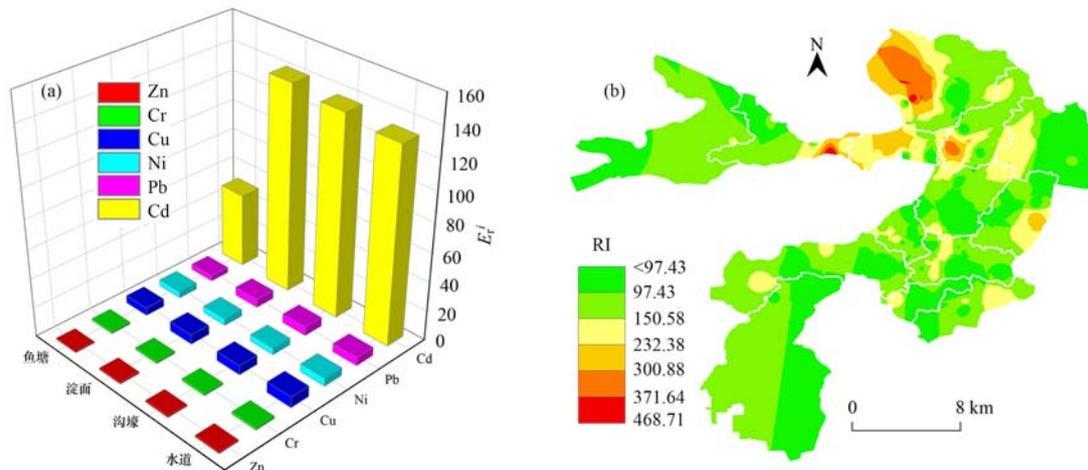


图 4 重金属潜在生态风险指数评价

Fig. 4 Evaluation of potential ecological risk index of heavy metals

2.3.2 次生相与原生相比值法评价 (RSP)

如表 4 所示, Cd 是白洋淀沉积物污染最重的重金属 ($RSP = 6.75$), 所有点位均存在污染, 其中 84% 的点位处于重度污染水平。在 4 种水体类型中 RSP 平均值分布情况为: 9.89 (水道) > 8.04 (沟壕) > 7.35 (淀面) > 3.71 (鱼塘), 其中水道的污染最为严重, 92% 的点位处于重度污染, 最大值位于府河入淀口 (31.77), 其原因是府河是接纳生活及工业废水的入淀河流, 重金属含量较高^[35]; 沟壕所有点位均处于重度污染; 31 个淀面中仅有 3 个处于轻度污染, 其余点位均为重度污染; 鱼塘处于轻度、中

度和重度污染状态的点位分别占 65%、22% 和 13%。Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的 RSP 平均值分别为 0.04、0.17、0.24、0.35 和 0.42, 均处于无污染水平。总体来看, Cd 的 RSP 值较高, 在水道、沟壕和淀面中容易造成二次释放, 生物可利用性和迁移能力较强, 与 2.2 节和前人的研究结果一致^[10]。

2.3.3 风险评估编码法评价 (RAC)

根据表 4 结果显示, 所采点位的 6 种重金属的 RAC 平均值排序为: 38.76% (Cd) > 10.75% (Zn) > 4.67% (Ni) > 1.99% (Pb) > 1.23% (Cu) > 0.21% (Cr)。Cd 是污染风险级别最高的元素, 有

33%的点位处于极高风险级别,33%的点位处于高风险级别.在水道(9.47%~57.91%)、沟壕(5.30%~47.22%)、淀面(2.92%~69.56%)和鱼塘(18.05%~62.05%)这4种水体类型中,水道、淀面和鱼塘呈现高风险级别,沟壕呈现中风险级别.RAC呈现出F1形态含量的贡献,Cd因F1态占比较高,RAC值较大,从而具有较高的潜在毒性和生物可利用性,极易对生态环境造成严重的威胁^[36],是造成白洋淀沉积物重金属生态风险的关键金属;Zn的风险级别仅次于Cd,处于中等风险级别,其中

水道(13.10%)、沟壕(13.98%)和淀面(11.31%)这3种水体类型呈现中等风险级别,鱼塘(5.07%)呈现低风险级别;Cu、Ni和Pb整体呈现低风险级别,对水体环境的潜在危害较小;Cr呈现无风险级别,表明Cr的生物可利用性低,属于“无风险”类别.

综合RI、RSP和RAC污染风险评价结果显示,白洋淀表层沉积物中重金属Cd潜在生态风险较大,易对生态环境释放毒性,尤其是水道底泥中Cd风险级别较高.

表4 白洋淀表层沉积物中重金属分级提取数据汇总

Table 4 Chemical fraction of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian Lake

重金属元素	项目	B1	B2	B3	B4	RSP	RSP 污染级别	RAC/%	RAC 风险级别
Cd	平均值	0.13	0.18	0.03	0.06	6.75		38.76	
	最大值	0.72	0.86	0.18	0.39	31.77	重度污染	69.56	高风险
	最小值	0.01	0.001	0.001	0.004	1.18		2.92	
Cr	平均值	0.12	0.20	2.10	65.67	0.04		0.21	
	最大值	0.33	0.58	9.48	101.46	0.15	无污染	0.56	无风险
	最小值	0.02	0.07	0.25	27.25	0.01		0.04	
Cu	平均值	0.35	0.23	4.33	27.92	0.17		1.23	
	最大值	3.80	1.40	35.02	61.11	0.75	无污染	5.54	低风险
	最小值	0.07	0.02	0.22	10.65	0.05		0.25	
Ni	平均值	1.43	1.43	3.61	27.24	0.24		4.67	
	最大值	4.92	3.57	14.30	43.40	0.93	无污染	16.29	低风险
	最小值	0.28	0.34	0.84	13.74	0.07		1.56	
Pb	平均值	0.43	2.70	0.62	12.09	0.35		1.99	
	最大值	1.06	6.59	2.84	45.28	0.85	无污染	4.22	低风险
	最小值	0.03	0.45	0.06	5.55	0.03		0.18	
Zn	平均值	10.60	14.91	3.18	64.76	0.42		10.75	
	最大值	71.05	50.70	20.19	111.67	1.42	无污染	32.8	中等风险
	最小值	0.49	0.95	0.07	31.76	0.03		0.85	

2.3.4 毒性单元(TU)

根据已有研究表明,当 $\sum TU$ 大于4时,会检测到显著的毒性^[24].白洋淀6种重金属的毒性单元如图5(a)所示,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的

$\sum TU$ 值在0.88~4.05之间. $\sum TU$ 在4种水体类型中的大小分布为:2.11(水道)>1.95(沟壕)>1.92(淀面)>1.59(鱼塘),表明白洋淀表层沉积物重金属的毒性较轻.TU值较高的3个点位均位于水

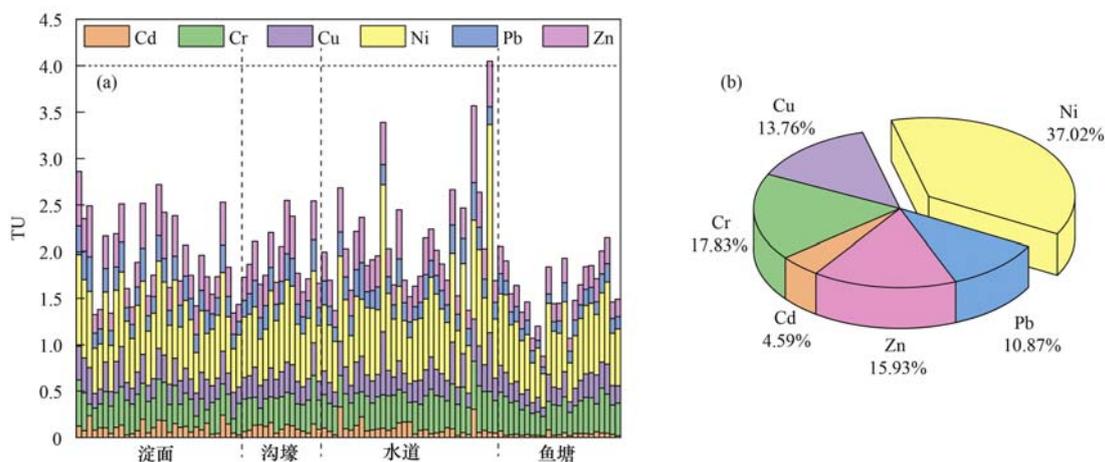


图5 毒性单元及其占比

Fig. 5 Toxic unit and its proportion

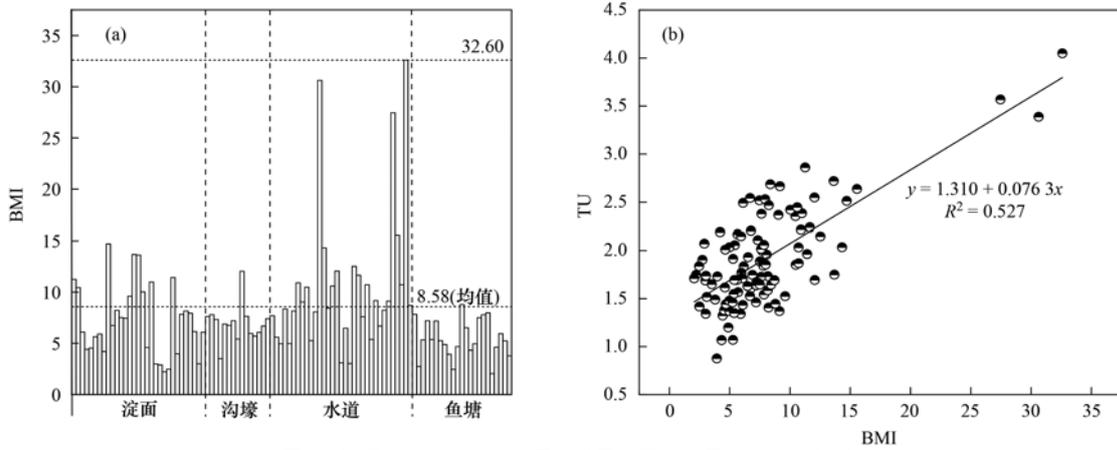


图 6 沉积物的生物有效金属指数及与毒性单元的相关性分析

Fig. 6 Bioavailable metal index of sediments and its correlation with toxic units

道,分别为白沟引河(4.05)、府河(3.57)和白沟引河入淀水道(3.39),白沟引河入淀口点位的毒性因

子超过 4,表明此点位的生物毒性风险较高.白沟引河是白洋淀上游的入淀河流,主要将上游的工业与

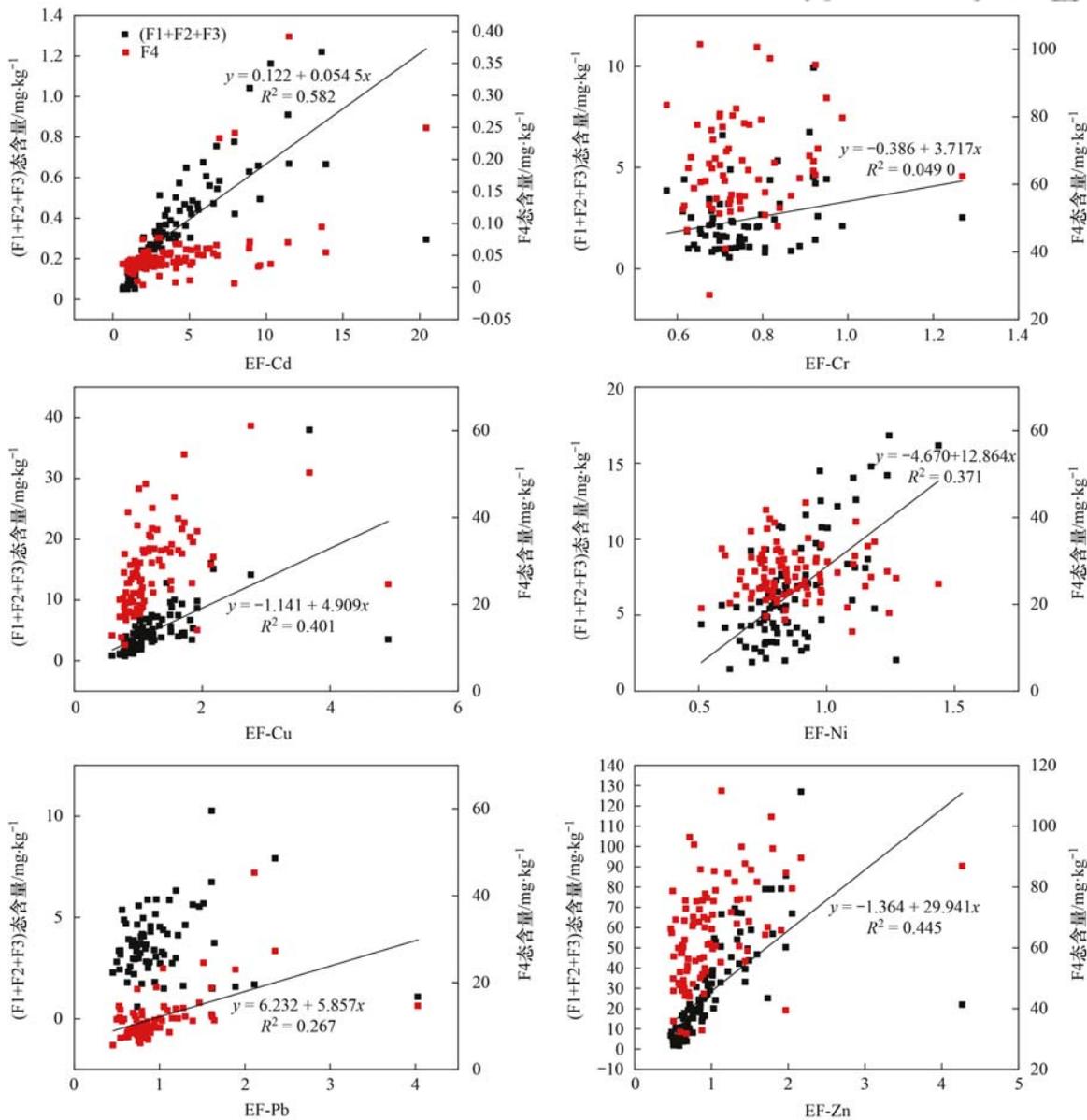


图 7 白洋淀沉积物重金属次/原生相与富集系数的相关性

Fig. 7 Correlation between secondary/primary phases and enrichment coefficient of heavy metals in Baiyangdian Lake sediments

生活污水、雨水与地表径流淋滤的农药肥料中的重金属排入白洋淀,可能是造成毒性高的原因^[37]. 府河毒性高是保定生活污水和工业废水的排放及人为活动对周边环境造成的^[35]. 由图 5(b)可以得出,白洋淀表层沉积物中 6 种重金属的毒性单元占比大小依次为: 37.02% (Ni) > 17.83% (Cr) > 15.93% (Zn) > 13.76% (Cu) > 10.87% (Pb) > 4.59% (Cd), Ni 的毒性因子的占比最高,对水生生物具有较高的潜在毒性. Cd 在毒性单元中的百分数最低,但 RI 与 RAC 结果显示 Cd 易对环境释放毒性,评价结果不同,分析其可能的原因是 Cd 的 PEL 值较高,导致毒性结果存在差异^[8]. 因此,应考虑沉积物毒性的综合测定方法,以提供更准确和全面的沉积物毒性评估^[32].

2.3.5 生物有效金属指数(BMI)

图 6(a)展示了白洋淀沉积物重金属的生物有效金属指数分布, BMI 值的范围为 2.06 ~ 32.60, 空间分布为 10.56(水道)、7.26(淀面)、6.94(沟壕)和 5.50(鱼塘), BMI 值较高的 3 个点位于白沟引河、府河和白沟引河入淀水道,表明沉积物重金属在水道水域类型中显示出较高的迁移性和生物有效性. 如图 6(b)所示, BMI 值与 \sum TU 的相关性系数 R^2 为 0.527, 两者之间具有较高的相关性,表明重金属的生物有效部分与估计的毒性效应密切相关. 有研究表明^[32,38], 生物有效金属是白洋淀沉积物急性毒性的主要来源,会引起沉积物毒性,并对底栖生物的生存和生长产生巨大影响.

2.4 重金属来源解析

沉积物中重金属 F1、F2 和 F3 赋存形态被视为生物有效态,人为因素影响较大,而 F4 态主要存在于矿物晶格中,更多的受到自然因素的影响^[13],有研究表明,将各元素的富集系数与(F1 + F2 + F3)态及 F4 态含量作相关性分析可以推断污染源类型^[39,40]. 6 种重金属中 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的富集系数值超过 1.5 的点占比分别为 76.47%、21.57%、10.78% 和 11.76%,当 EF 值大于 1.5 时,重金属来源主要为人为输入^[19]. 将 EF 值与次/原生相含量作相关性分析,如图 7 所示, Cd、Cu 和 Zn 的次生相(F1 + F2 + F3)含量与富集系数呈明显相关性, R^2 分别为 0.582、0.401 和 0.445,说明这 3 种重金属主要来源可能是周边工业排放经水道输入和淀区村落人为活动等外源输入. 根据历史资料,村落曾有无纺布、制鞋等小型作坊,排放污水中含有 Cd、Cu 和 Zn 等,从而造成沉积物中重金属的积累^[41,42].

3 结论

(1) 白洋淀沉积物重金属含量空间分布存在差异性,北部淀区重金属含量较高. 其中 Cd 均值含量是背景值的 3.94 倍,空间分布呈现水道 > 淀面 > 沟壕 > 鱼塘.

(2) 不同重金属种类赋存形态存在差异性: Cd 主要以非残渣态(F1 + F2 + F3)存在,生物可利用性较大,迁移能力较强,有较高的二次释放风险; Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 主要以残渣态(F4)存在,生物可利用性和可迁移性较低.

(3) 污染程度与风险评价结果表明,白洋淀表层沉积物重金属整体呈低生态风险. 但是, Cd 元素在水道、沟壕和淀面的部分水域呈中-高风险,是造成潜在生态风险的关键金属元素,可能会引起沉积物水生毒性.

(4) 通过 EF 值与次生相/原生相相关性分析显示,白洋淀重金属 Cd、Cu 和 Zn 主要为周边工业废水排放和淀区村落的人为源输入; 由 EF 值和重金属赋存形态分析显示, Cr、Ni 和 Pb 来源主要为土壤和岩石圈自然风化过程的自然源为主.

参考文献:

- [1] Goretti E., Pallottini M., Ricciarini M I., *et al.* Heavy metals bioaccumulation in selected tissues of red swamp crayfish: an easy tool for monitoring environmental contamination levels[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **559**: 339-346.
- [2] 王文才, 唐春燕, 张恒军, 等. 不确定背景值下浅水湖泊沉积物重金属生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(9): 3982-3988.
Wang W C., Tang C Y., Zhang H J., *et al.* Potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment with uncertain background impact in a shallow lake[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 3982-3988.
- [3] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
Wang S H., Wang W W., Jiang X., *et al.* Heavy metal speciation and stability in the sediment of Lihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3562-3571.
- [4] Gao Q., Li Y., Cheng Q Y., *et al.* Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013 [J]. *Water Research*, 2016, **92**: 262-274.
- [5] 赵胜男, 史小红, 张汉蒙, 等. 乌梁素海水体重金属元素赋存形态模拟分析[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(2): 341-349.
Zhao S N., Shi X H., Zhang H M., *et al.* Simulation on the species of heavy metals in Wuliangsu Lake water[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(2): 341-349.
- [6] 陈春霄, 姜霞, 郑丙辉, 等. 太湖竺山湾沉积物重金属形态分析及风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(6): 177-182, 194.
Chen C X., Jiang X., Zheng B H., *et al.* Heavy metals in sediment of Lake Taihu's Zhushan Bay: chemical speciation and risk evaluation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**

- (6): 177-182, 194.
- [7] Zhu Y Y, Jin X, Tang W Z, *et al.* Comprehensive analysis of nitrogen distributions and ammonia nitrogen release fluxes in the sediments of Baiyangdian Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **76**: 319-328.
- [8] Ji Z H, Zhang Y, Chen T, *et al.* Distribution, ecological risk and source identification of heavy metals in sediments from the Baiyangdian Lake, Northern China [J]. *Chemosphere*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124425.
- [9] 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(5): 945-951.
Yang Z, Li G B, Wang D W, *et al.* Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(5): 945-951.
- [10] 向语兮, 王晓, 单保庆, 等. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(6): 2237-2246.
Xiang Y X, Wang X, Shan B Q, *et al.* Spatial distribution, fractionation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(6): 2237-2246.
- [11] 张杨, 许梦雅, 张超, 等. 白洋淀村落水域沉积物中营养元素和重金属分布特征及风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(10): 4074-4085.
Zhang Y, Xu M Y, Zhang C, *et al.* Distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals and its risk assessment in sediments around villages in Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(10): 4074-4085.
- [12] 易雨君, 林楚翘, 唐彩红. 1960s 以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势 [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1333-1347.
Yi Y J, Lin C Q, Tang C H. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5): 1333-1347.
- [13] 李小林, 刘恩峰, 于真真, 等. 异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 614-624.
Li X L, Liu E F, Yu Z Z, *et al.* Contamination and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Yilong Lake, Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 614-624.
- [14] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(4): 467-477.
Gao Y C, Wang J F, Feng Z M. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(4): 467-477.
- [15] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 186-193.
Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 186-193.
- [16] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 57-61.
- [17] 李振涵, 张文强, 雷沛, 等. 巢湖西部河口区沉积物氮磷分布特征与原位扩散通量估算 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(8): 2974-2982.
- Li Z H, Zhang W Q, Lei P, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in sediments and estimation of the diffusion fluxes at river mouths of Western Chaohu Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(8): 2974-2982.
- [18] 王旭, 单保庆, 郭伊苒, 等. 滦河干流表层沉积物中营养元素和重金属含量分布特征及其风险评价 [J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(10): 5429-5439.
Wang X, Shan B Q, Guo Y H, *et al.* Distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals content and its risk assessment in surface sediments from Luan River mainstream [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(10): 5429-5439.
- [19] Bhuiyan M A H, Karmaker S C, Bodrud-Doza M, *et al.* Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128339.
- [20] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
CNEMC (China National Environmental Monitoring Center). The backgrounds of soil environment in China [M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 1990.
- [21] 孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 应用铅铍同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1566-1575.
Sun J W, Yu R L, Hu G R, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and tracing sources by Pb & Sr Isotope in the soil profile of woodland in Quanzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1566-1575.
- [22] Almeida L C, da Silva Júnior J B, dos Santos I F, *et al.* Assessment of toxicity of metals in river sediments for human supply: distribution, evaluation of pollution and sources identification [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **158**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111423.
- [23] Jain C K. Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna, India [J]. *Water Research*, 2004, **38**(3): 569-578.
- [24] Pedersen F, Bjørnstad E, Andersen H V, *et al.* Characterization of sediments from Copenhagen Harbour by use of biotests [J]. *Water Science & Technology*, 1998, **37**(6-7): 233-240.
- [25] Pueyo M, Rauret G, Lück D, *et al.* Certification of the extractable contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in a freshwater sediment following a collaboratively tested and optimised three-step sequential extraction procedure [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, **3**(2): 243-250.
- [26] Rosado D, Usero J, Morillo J. Assessment of heavy metals bioavailability and toxicity toward *Vibrio fischeri* in sediment of the Huelva estuary [J]. *Chemosphere*, 2016, **153**: 10-17.
- [27] 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 等. 望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4914-4923.
Xu C, Wang P F, Chen J, *et al.* Contaminant characteristics and ecological risk assessments of heavy metals from river networks in the western area of the Wangyu River [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4914-4923.
- [28] 白军红, 赵庆庆, 卢琼琼, 等. 白洋淀沼泽化区域土壤重金属含量的剖面分布特征——以烧车淀为例 [J]. *湿地科学*, 2013, **11**(2): 271-275.
Bai J H, Zhao Q Q, Lu Q Q, *et al.* Profile distribution of soil heavy metals in the paludification region of Baiyangdian Lake—A

- case study of Shaohedian Lake[J]. *Wetland Science*, 2013, **11**(2): 271-275.
- [29] 崔新月, 莫武秋, 廖建波. 粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中 Cd 形态空间分布特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1375-1383.
- Cui X Y, Mo W Q, Liao J B. Multiphase spatial distribution characteristics of Cd morphology in typical intertidal zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1375-1383.
- [30] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5410-5418.
- Jiang T, Lin W W, Cao Y J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5410-5418.
- [31] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- Lin C Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Jiulong River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- [32] Zhang C, Shan B Q, Zhao Y, *et al.* Spatial distribution, fractionation, toxicity and risk assessment of surface sediments from the Baiyangdian Lake in northern China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 633-642.
- [33] 唐文忠, 王立硕, 单保庆, 等. 典型城市河流(凉水河)表层沉积物中重金属赋存形态特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 3898-3905.
- Tang W Z, Wang L S, Shan B Q, *et al.* Speciation distribution of heavy metals in the surface sediments of a typical urban river (Liangshui River System) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3898-3905.
- [34] 孔明, 董增林, 晁建颖, 等. 巢湖表层沉积物重金属生物有效性及生态风险评价[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.
- [35] 陈兴宏, 李立青, 张美一, 等. 白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 230-238.
- Chen X H, Li L C, Zhang M Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals in sediments of the Fuhe River influenced area, Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 230-238.
- [36] 姜时欣, 翟付杰, 张超, 等. 伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2653-2663.
- Jiang S X, Zhai F J, Zhang C, *et al.* Speciation distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from the Yitong River city area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2653-2663.
- [37] Ji Z H, Zhang Y, Zhang H, *et al.* Fraction spatial distributions and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Baiyangdian Lake [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **174**: 417-428.
- [38] Wang J K, Zeng X L, Xu D Y, *et al.* Chemical fractions, diffusion flux and risk assessment of potentially toxic elements in sediments of Baiyangdian Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138046.
- [39] Gao L, Wang Z W, Li S H, *et al.* Bioavailability and toxicity of trace metals (Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn) in sediment cores from the Shima River, South China [J]. *Chemosphere*, 2018, **192**: 31-42.
- [40] Zhang C, Shan B Q, Tang W Z, *et al.* Heavy metal concentrations and speciation in riverine sediments and the risks posed in three urban belts in the Haihe Basin [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **139**: 263-271.
- [41] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- [42] 刘婷. ICP-AES 法测定纺织染整助剂中 8 种重金属元素 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Liu T. The determination of 8 heavy metals in textile dyeing and finishing auxiliaries with ICP-AES [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i>	(4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i>	(4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i>	(4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i>	(4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i>	(4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i>	(4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i>	(4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i>	(4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i>	(4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i>	(4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i>	(4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i>	(4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i>	(4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i>	(4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i>	(4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i>	(4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i>	(4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i>	(4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i>	(4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i>	(4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i>	(4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i>	(4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i>	(4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i>	(4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i>	(4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i>	(4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i>	(4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i>	(4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i>	(4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i>	(4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i>	(4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i>	(4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i>	(4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i>	(4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i>	(4911)