

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
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估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

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

陈兴宏¹, 李立青^{1*}, 张美一², 张伟军¹, 王东升², 王洪杰³

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 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. 河北大学生命科学学院生态与环境治理研究所, 保定 071002)

摘要: 根据府河入淀水流的扩散, 将府河影响区分为6个片区, 2020年10月分层采集48个样点的沉积物, 测定并研究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。结果表明, 研究区域沉积物中平均 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{TOC})$ 分别为 $1\,841\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $769\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.77% 。沉积物重金属污染的主要元素为 Cd、Cu、Zn、Hg 和 Pb, 分别是区域土壤背景值的 3.73、1.50、1.42、1.31 和 1.31 倍。由府河入淀区、南刘庄至下游枣林庄方向, 沉积物中 TP 和重金属 (Cd、Cu、Zn、Hg 和 Pb) 含量呈现明显减少规律, 而 TN 和 TOC 含量没有明显规律。沉积物中 TN、TP、TOC 和重金属 (Cd、Cu、Zn、Hg 和 Pb) 主要蓄积在表层 0~10 cm。府河入淀、府河-南刘庄和南刘庄片区沉积物 TP 属于重度污染等级, 王家寨和光淀片区沉积物 TP 属于中度污染等级, 枣林庄片区沉积物 TP 属于轻度污染等级。Cd 和 Hg 是重金属主要污染贡献因子, 分别为较重污染和中等污染等级。府河入淀、府河-南刘庄和南刘庄片区沉积物重金属属于重度生态风险等级, 王家寨和光淀片区属于中等生态风险等级, 枣林庄片区属于低生态风险等级。重度生态风险等级区域的沉积物重金属浸出浓度低于浸出毒性鉴别标准值, 清淤后可作一般废物处理。

关键词: 白洋淀; 府河影响区; 营养盐; 重金属; 污染特征

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0230-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105200

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake

CHEN Xing-hong¹, LI Li-qing^{1*}, ZHANG Mei-yi², ZHANG Wei-jun¹, WANG Dong-sheng², WANG Hong-jie³

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Institute of Ecology and Environmental Governance, College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: Based on the flow direction of the Fuhe River into Baiyangdian Lake, the impacted area of the Fuhe River was divided into 6 subareas, and sediments from 48 sites were collected in November 2020. The characteristics and risks of sediment nutrients and heavy metal pollution in these six subareas were investigated. The results showed that the average $\omega(\text{TN})$, $\omega(\text{TP})$, and $\omega(\text{TOC})$ were $1\,841\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $769\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 1.77% , respectively. The major heavy metals were Cd, Cu, Zn, Hg, and Pb, which were 3.73, 1.50, 1.42, 1.31, and 1.31 times the soil background values for Hebei Province, respectively. The TP and heavy metal (Cd, Cu, Zn, Hg, and Pb) content showed a decreasing trend from the Fuhe River estuary to the downstream Zao linzhuang, whereas the TN and TOC content showed no marked trends. TN, TP, TOC, and heavy metals (Cd, Cu, Zn, Hg, and Pb) were enriched in surface sediments (0-10 cm). The TP content in the surface sediments (0-10 cm) of the Fuhe River estuary, Fuhe River estuary-Nanliuzhuang, and Nanliuzhuang subareas were heavily polluted; the Wangjiazhai and Guangdian subareas were moderately polluted; and the Zao linzhuang subarea was slightly polluted. Cd and Hg were the major contributors to heavy metal pollution, which were at considerable risk and moderate risk levels, respectively. The heavy metals in surface sediments (0-10 cm) of the Fuhe River estuary, Fuhe River estuary-Nanliuzhuang, and Nanliuzhuang subareas were at a considerable risk level, and the sediments below 30 cm presented a low risk level. The leaching concentrations of heavy metals in sediments from the subarea of severe ecological risk level were far less than the identification standard values of leaching toxicity, suggesting that the sediments can be treated as general waste after dredging.

Key words: Baiyangdian Lake; Fuhe River influenced area; nutrients; heavy metals; pollution pattern

湖泊沉积物是营养盐和重金属等污染物重要的蓄积库,既可以充当污染物的“汇”,也可以充当污染物的“源”^[1-3]。外源污染物进入湖泊初期,通过沉淀等方式蓄积在沉积物中;在适当条件下,沉积物会向上覆水中释放污染物,恶化湖泊水质,威胁湖泊生态环境^[4-6]。意大利的 Lake Trasimeno 沉积物中重金属向水体释放,影响水生生物生活,进而引发生态环境问题^[7]。在我国,巢湖、滇池和洞庭湖等湖泊沉积物释放大量的营养盐,水体富营养化严重,水质恶化^[8-10]。因此,在外源输入得到一定程度控制

的同时,沉积物内源释放问题便成为湖泊水生态系统治理过程中迫切需要解决的问题^[11,12]。

白洋淀位于河北省中部,是华北平原最大的草型浅水湖泊,是正在建设的雄安新区的中心,为新区社会经济发展提供了重要的生态服务功能。但过去

收稿日期: 2021-05-19; 修订日期: 2021-07-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07110004)

作者简介: 陈兴宏(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染修复, E-mail: cxd971209@163.com

* 通信作者, E-mail: lilq@cug.edu.cn

几十年中,随着上游流域经济社会的发展,工业废水和生活污水排放以及淀内水产养殖逐渐增多,使白洋淀生态环境质量下降^[13~15]. 近年来,尽管通过减少外源输入负荷,白洋淀的水质有一定程度改善,但沉积物内源污染依然存在^[16,17]. 为了满足新区建设对水质的高要求,需要进一步提升水质和全面恢复水生态.

目前,相关学者对白洋淀水体富营养化和沉积物污染特征进行了研究^[18~23],结果表明府河对白洋淀影响最大. 但鲜见根据不同生境和不同水质状况对府河入淀影响范围进行分区,采集柱状样品,同时关注沉积物中营养盐和重金属,进而详细比较府河入淀影响区沉积物污染空间差异. 因此本文重点研究白洋淀府河影响区,根据府河入淀水流的扩散,将府河影响区分为 6 个片区,分层采集沉积物样品,测定并研究沉积物中总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)和重金属(Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 As)的污染特征及风险,以期为府河影响区内源污染防治及清淤提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

白洋淀地处华北平原中部,地理坐标为 115°38′~116°07′E、38°43′~39°02′N,四周以堤坝为界,淀区地势自西北向东南倾斜,有府河和唐河等 8 条河流流入淀区,赵王新河作为出水口. 目前除府河外,其余入淀河流已基本季节性断流^[24]. 近几十年白洋淀上游社会经济发展较快,保定市生活污水和工业废水主要通过府河进入白洋淀,长期的外源污染输入和沉积,使得府河入淀区域沉积物污染严重,且污染有随水流向出水口方向蔓延的趋势^[25].

为了明确白洋淀府河影响区沉积物污染的空间分布,根据府河入淀水流的扩散、水质以及生境将研究区域分为 6 个片区(图 1). 于 2020 年 10 月在该区域进行现场沉积物样品采集,利用手持 GPS 定位设置 48 个采样点,采样点具体信息及分布见表 1 和图 1. 用内径 8.5 cm 柱状采样器采集沉积柱,现场以 10 cm 间隔进行分层.

表 1 白洋淀府河影响区沉积物采样点具体信息

Table 1 Specific information of sediment sampling sites in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake			
片区	采样点编号	平均水深/m	生境及水质特性
府河入淀	1~6	3.0	府河入淀口,水体平均 $\rho(\text{TN})2.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 $\rho(\text{TP})0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
府河-南刘庄	7~11	2.8	入淀口到南刘庄开阔淀面,水体平均 $\rho(\text{TN})2.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 $\rho(\text{TP})0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
南刘庄	12~23	4.5	开阔淀面,附近有村庄,水体平均 $\rho(\text{TN})2.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 $\rho(\text{TP})0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
王家寨	24~33	3.0	远离府河入淀口,附近有村庄,水体平均 $\rho(\text{TN})1.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 $\rho(\text{TP})0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
光淀	34~44	2.5	远离府河入淀口,水体平均 $\rho(\text{TN})1.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 $\rho(\text{TP})0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
枣林庄	45~48	1.8	沉水植物和芦苇较多,水体平均 $\rho(\text{TN})1.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 $\rho(\text{TP})0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

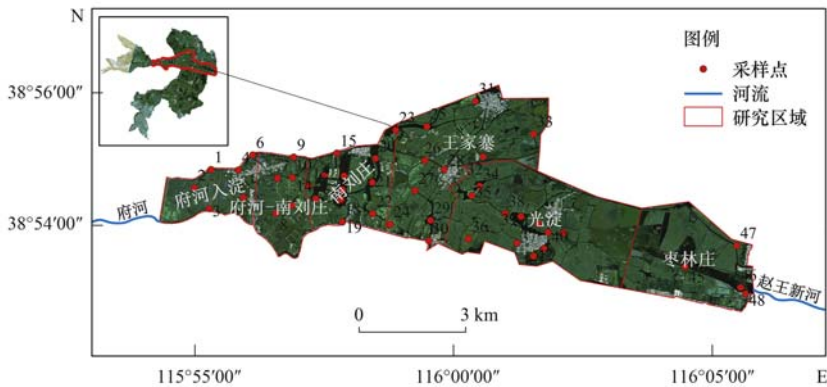


图 1 白洋淀府河影响区沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sediment sampling sites in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake

1.2 样品处理及测定

样品放入 -20℃ 冰箱冷冻后进行冷冻干燥处理,研磨过 100 目筛装入密封袋中,处理后的样品贮存于 -20℃ 冰箱中备用.

沉积物中 TN 采用 K1100 全自动凯氏定氮仪(SYS-S115)测量; TP 采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 联合消解,使用 ICP-OES 测定; TOC 采用重铬酸钾容

量法测量; 沉积物中重金属测定参照文献[26], Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 As 使用电感耦合等离子体质谱仪(SYS-S100)测定, Hg 使用 AFS-820 型双道原子荧光光度计(SYS-S099)测定.

另选取府河入淀、府河-南刘庄和南刘庄片区 6 个样点(3、6、11、16、19 和 21)表层沉积物样品测试重金属(Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 As)浸出

毒性,重金属浸出毒性采用硫酸硝酸法对沉积物进行浸提^[27],浸出液中的重金属浓度测定方法同上.

1.3 沉积物污染评价方法

沉积物中 TOC 和 TN 采用有机污染指数法进行评价,TP 采用单因子指数法进行评价,计算公式分别为^[3]:

$$I_0 = W_{\text{TOC}} \times W_{\text{ON}}$$
$$W_{\text{ON}} = W_{\text{TN}} \times 95\%$$
$$S_i = C_i/C_s$$

式中, I_0 为有机污染指数, W_{TOC} 和 W_{TN} 分别为 TOC 和 TN 的含量(%), S_i 为 TP 污染指数; C_i 为 TP 的含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), C_s 为区域沉积物中 TP 的标准值, 本文采用引起最低级别生态风险效应的 TP 阈值 ($600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[28]. I_0 和 S_i 的评价标准见表 2.

沉积物重金属污染评价采用潜在生态风险指数法^[29], 计算公式如下:

$$E_r = T_i \times C/C_n$$
$$\text{RI} = \sum E_r$$

表 3 沉积物中重金属元素背景值及其毒性系数

Table 3 Background content and toxicity coefficients of heavy metals in sediments								
项目	Cd	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	As
背景值(ω)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.094	0.039	21.8	21.5	78.4	68.3	30.8	13.6
毒性系数	30	40	5	5	1	2	2	10

1.4 数据处理

数据处理与分析采用 Excel 和 SPSS 21.0 软件, 图表绘制采用 Origin 8.5 和 ArcGIS 10.2 软件.

2 结果与讨论

2.1 沉积物中营养盐污染分布特征

研究区内沉积物 TN、TP 和 TOC 含量统计结果见表 4, 含量空间分布见图 2. 所有沉积物样品 $\omega(\text{TN})$ 为 $168 \sim 6920\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $1841\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各采样点表层沉积物 $\omega(\text{TN})$ 整体偏高, 南刘庄片区平均 $\omega(\text{TN})$ 最高, 为 $3665\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于光淀片区 ($2363\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.05$) 和枣林庄片区 ($2785\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.05$). 对于白洋淀这种典型的浅水草型湖泊来讲, 其遍布的芦苇、荷花等大型维管束植物, 富集了大量的氮元素, 在植物生命周期完成之后, 随植物残体腐败分解积累到了沉积物中, 从而造成了研究区域大范围氮含量偏高的现状.

研究区所有沉积物样品 $\omega(\text{TP})$ 为 $383 \sim 1910\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $769\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 表层沉积物 $\omega(\text{TP})$ 总体呈现沿府河入淀区南刘庄至下游枣林庄方向减少的空间分布特征, 府河入淀区平均 $\omega(\text{TP})$

式中, C 为单一元素实测值; C_n 为单一元素参比值, 采用河北省土壤重金属背景值^[30] (表 3); T_i 为第 i 种重金属元素的毒性系数 (表 3). E_r 为某元素的潜在生态风险指数, 其中 $E_r \leq 40$ 为低风险等级, $40 < E_r \leq 80$ 为中等风险等级, $80 < E_r \leq 160$ 为较重风险等级, $160 < E_r \leq 320$ 为重风险等级, $E_r > 320$ 为严重风险等级. RI 为沉积物中重金属综合潜在生态风险指数, 其中 $\text{RI} \leq 150$ 为低生态风险等级, $150 < \text{RI} \leq 300$ 为中等生态风险等级, $300 < \text{RI} \leq 600$ 为重度生态风险等级, $\text{RI} > 600$ 为严重生态风险等级.

表 2 沉积物营养盐污染状况评价标准

Table 2 Assessment standard of sediment nutrient pollution			
I_0	污染程度	S_i	污染程度
< 0.05	清洁	< 0.5	清洁
$0.05 \sim 0.2$	较清洁	$0.5 \sim 1.0$	轻度污染
$0.2 \sim 0.5$	尚清洁	$1.0 \sim 1.5$	中度污染
≥ 0.5	有机污染	≥ 1.5	重度污染

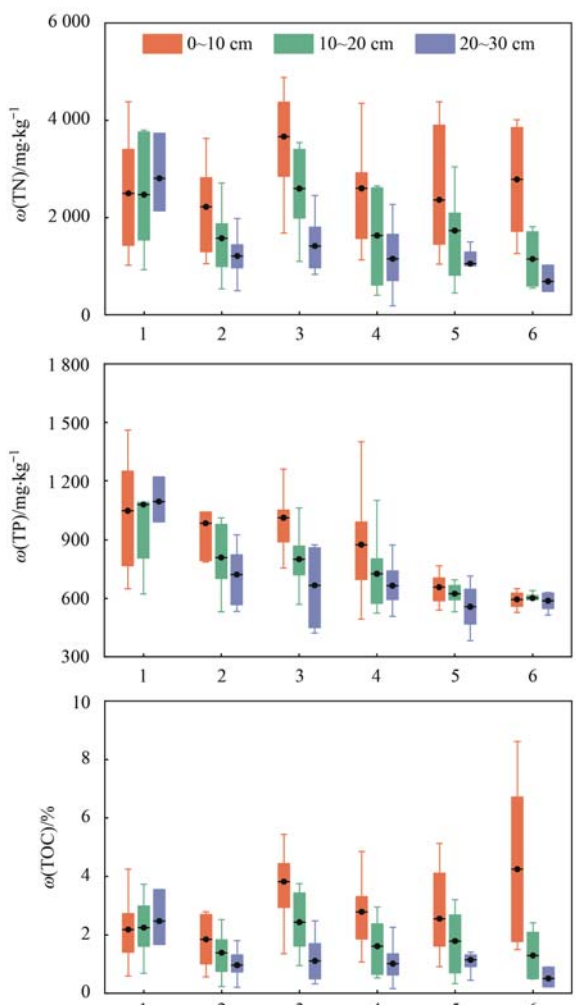
最高, 为 $1046\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于光淀片区 ($657\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.01$) 和枣林庄片区 ($587\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.05$). 该分布结果表明府河对沉积物总磷污染贡献较大, 造成入淀口沉积物磷负荷严重, 说明白洋淀磷污染主要来源于上游输入.

研究区所有沉积物样品 $\omega(\text{TOC})$ 为 $0.10\% \sim 9.03\%$, 均值为 1.77% . 各采样点表层沉积物 $\omega(\text{TOC})$ 为 $0.56\% \sim 9.03\%$, 均值为 2.94% . 枣林庄片区平均含量最高, 南刘庄片区平均含量次之. 大量芦苇和沉水植物碎屑残体堆积于枣林庄片区, 故该区域沉积物中有机质含量显著高于其他区域.

表 4 白洋淀府河影响区沉积物 TN、TP 和 TOC 含量统计结果

Table 4 Statistical results of TN, TP, and TOC content in sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake			
项目	$\omega(\text{TN})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TP})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TOC})$ /%
最小值	168	383	0.10
最大值	6920	1910	9.03
平均值	1841	769	1.77
标准差	1175	246	1.41
变异系数/%	64	32	80

除府河入淀片区外, 其余片区各样点沉积物中 TN、TP 和 TOC 含量总体呈现随深度增加而降低的



1. 府河入淀, 2. 府河-南刘庄, 3. 南刘庄, 4. 王家寨, 5. 光淀, 6. 枣林庄

图2 白洋淀府河影响区沉积物中 TN、TP 和 TOC 含量空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of TN, TP, and TOC contents in sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake

趋势,如图 3 所示. 各点位表层沉积物中 $\omega(\text{TN})$ 为 $1\,020 \sim 6\,920 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $2\,775 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10 \sim 20 \text{ cm}$ 沉积物中 $\omega(\text{TN})$ 为 $405 \sim 3\,800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $1\,953 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $20 \sim 30 \text{ cm}$ 沉积物中平均 $\omega(\text{TN})$ 为 $1\,351 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各点位表层沉积物中 $\omega(\text{TP})$ 为 $497 \sim 1\,520 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $867 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10 \sim 20 \text{ cm}$ 沉积物中平均 $\omega(\text{TP})$ 为 $763 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $20 \sim 30 \text{ cm}$ 沉积物中平均 $\omega(\text{TP})$ 为 $694 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相比表层下降较多. TOC 垂向变化较为明显, 表层沉积物平均 $\omega(\text{TOC})$ 为 2.94% , 具有较高的释放风险, $10 \sim 20 \text{ cm}$ 沉积物中平均 $\omega(\text{TOC})$ 为 1.89% , $20 \sim 30 \text{ cm}$ 沉积物中平均 $\omega(\text{TOC})$ 为 1.19% , 超过 30 cm 部分沉积物中 $\omega(\text{TOC})$ 均值为 1.06% , 远低于表层沉积物中 $\omega(\text{TOC})$.

2.2 沉积物中营养盐污染状况评价

白洋淀府河影响区沉积物中营养盐污染状况评价结果如图 4 所示. 表层沉积物有机污染指数为 $0.06 \sim 5.94$, 均值为 0.97 , 整体属于有机污染等级, 南刘庄片区平均有机污染指数为 1.58 , 显著高于其余片区. $10 \sim 20 \text{ cm}$ 沉积物有机污染指数均值为 0.44 , 属于尚清洁等级; $20 \sim 30 \text{ cm}$ 沉积物有机污染指数均值为 0.21 , 属于尚清洁等级; 而超过 30 cm 沉积物降为较清洁等级. 表层沉积物 TP 的单因子污染指数为 $0.82 \sim 2.53$, 均值为 1.45 , 整体属于中度污染等级; 污染指数的空间分布差异较大, 其中府河入淀、府河-南刘庄和南刘庄片区的平均污染指数分别为: 1.74 、 1.64 和 1.68 , 属于重度污染等级, 王家寨和光淀片区属于中度污染等级, 枣林庄片区属于轻度污染等级.

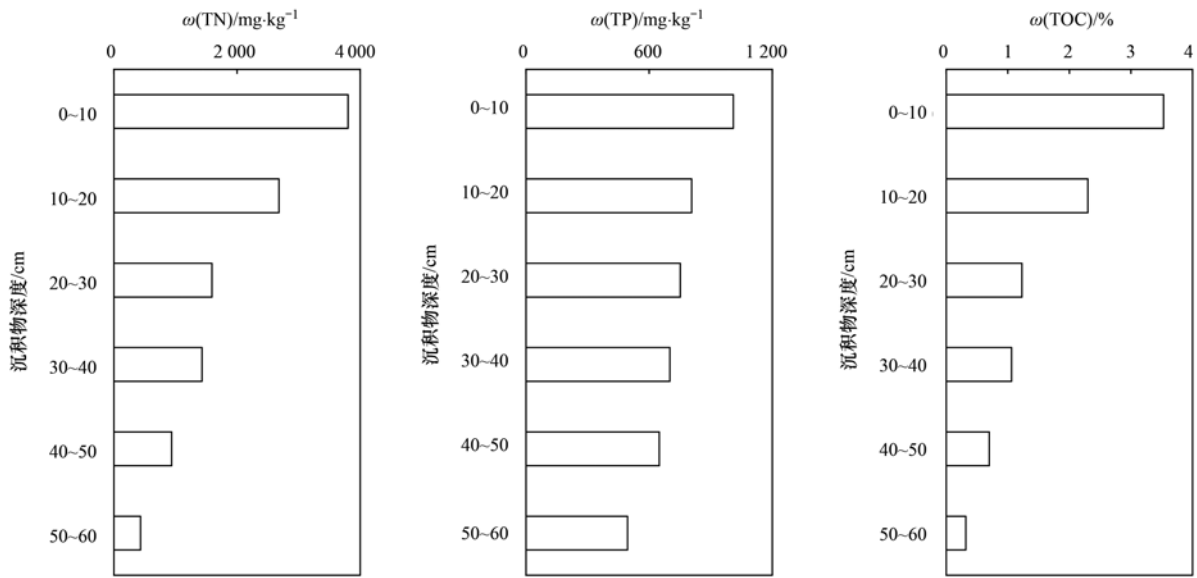
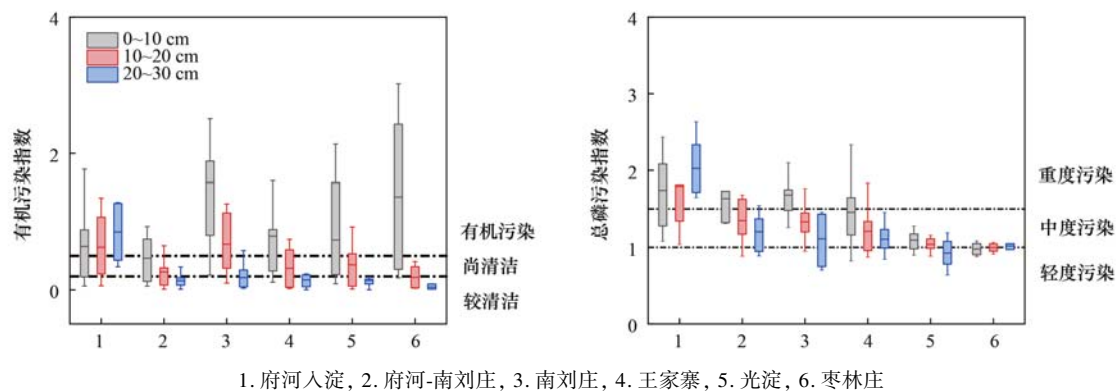


图3 白洋淀府河影响区沉积物中 TN、TP 和 TOC 含量的垂向分布
Fig. 3 Vertical distributions of TN, TP, and TOC content in sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake



1. 府河入淀, 2. 府河-南刘庄, 3. 南刘庄, 4. 王家寨, 5. 光淀, 6. 枣林庄
图4 白洋淀府河影响区沉积物中有机和总磷污染指数
Fig. 4 Organic pollution indices and total phosphorus pollution indices in sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake

2.3 沉积物中重金属污染分布特征

白洋淀府河影响区沉积物中 8 种重金属含量统计结果见表 5. 平均 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{As})$ 分别为: 0.35、0.051、32.8、28.2、111.2、72.7、37.1 和 $9.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 沉积物重金属污染的主要元素为 Cd、Cu、Zn、Hg 和 Pb, 其平均含量分别为河北省土壤背景值的 3.73、1.50、1.42、1.31 和 1.31 倍. 另外, 沉积物中 8 种重金属含量的最大值都已超过河北省土壤背景值, 其中 Cd 的最大值是河北省土壤背景值的 31.9 倍, 出现在 3 号样点, 位于府河入淀区, 说明府河入淀区污染严重.

表层沉积物中除 As 外, 其余 7 种重金属含量分布总体表现为: 府河入淀 > 南刘庄 > 府河-南刘庄 > 王家寨 > 光淀 > 枣林庄 (图 5), 呈现沿府河入淀区南刘庄至下游枣林庄方向减少的空间特征. 以上结果表明白洋淀府河影响区沉积物重金属污染具有空间差异, 各种重金属均在府河入淀口附近累积, 并沿水流方向逐渐减少, 且沉积物中 Cd 的污染最重. 这可能是府河来水在流过南刘庄后进入白洋淀淀区, 此时水域面积突增, 造成河流流速急速下降, 河流本身携带的重金属污染物颗粒在流速下降后快速沉积, 造成了入淀口附近的沉积物重金属污染程度显著增高^[18].

表 5 白洋淀府河影响区沉积物重金属含量统计结果

Table 5 Statistical results of heavy metal content in sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake

项目	$\omega / \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$							
	Cd	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	As
最小值	0.04	0.006	12.1	15.5	39.2	40.0	19.3	3.7
最大值	3.00	0.240	84.0	74.8	482.0	116.0	54.9	24.2
平均值	0.35	0.051	32.8	28.2	111.2	72.7	37.1	9.9
标准差	0.42	0.042	10.3	8.9	64.5	12.2	6.7	3.4
变异系数/%	119	82	31	31	58	17	18	34

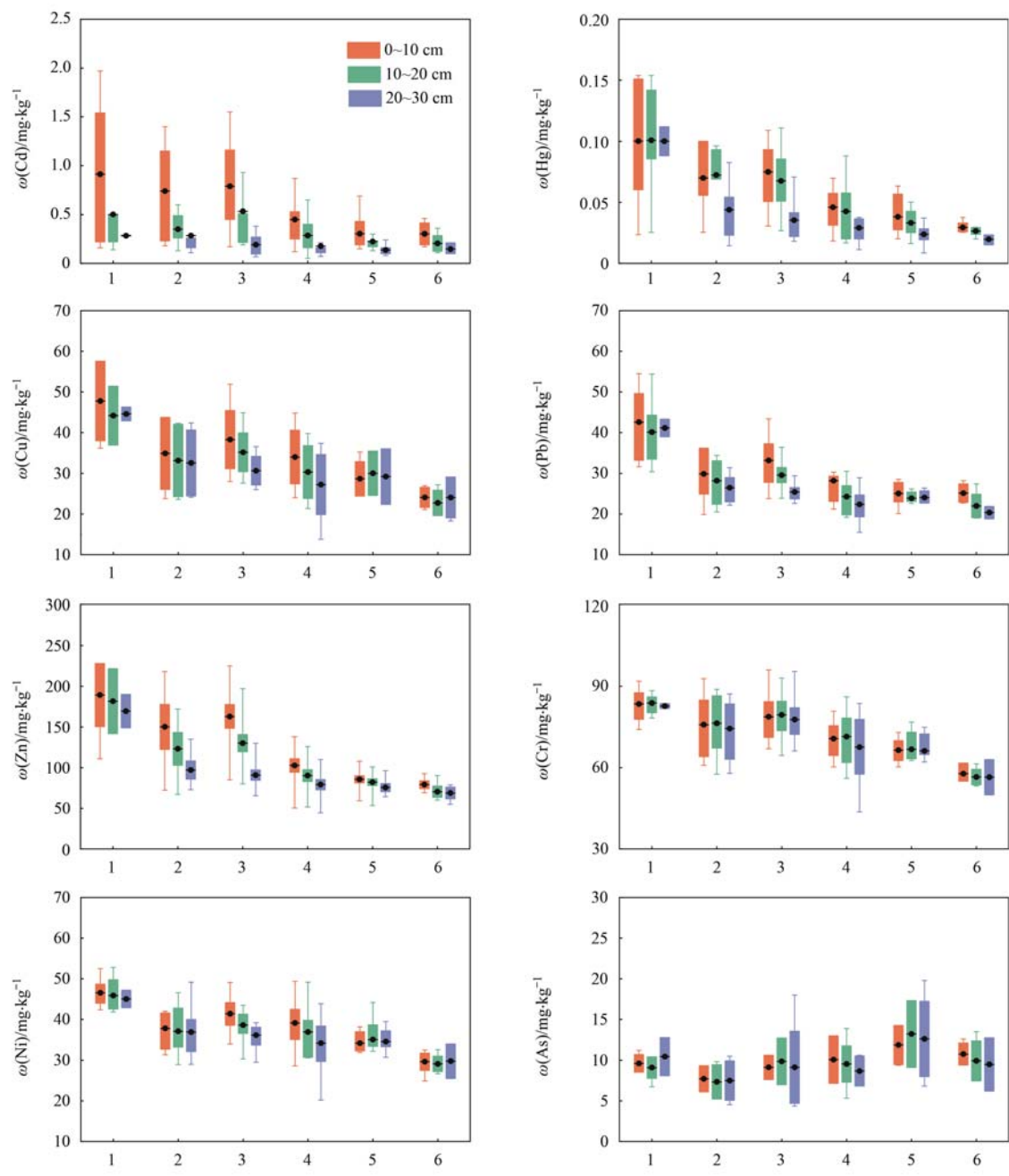
沉积物中重金属 (Cd、Hg、Cu、Pb、Zn 和 Ni) 含量主要蓄积在表层, 含量随沉积物深度增加而降低, 如图 6 所示. 重金属 (Cd、Hg、Cu、Pb、Zn 和 Ni) 在 10 ~ 20 cm 处开始明显降低, 其中 Cd 含量在 10 ~ 20 cm 下降较快, 最大下降量是 0 ~ 10 cm 的 75%. 各点位 0 ~ 10 cm 平均 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 10 ~ 20 cm 平均 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20 ~ 30 cm 平均 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过 30 cm 的含量远低于表层沉积物中 $\omega(\text{Cd})$.

2.4 沉积物中重金属生态风险评价

白洋淀府河影响区沉积物中重金属 (Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 As) 的生态风险状况评价结果如表 6 所示. Cd 的风险指数为 111.93, 属于较重污染等级; Hg 的风险指数为 52.46, 属于中等污染

等级; 其余 6 种重金属风险指数为 1.42 ~ 7.52, 均属于低风险等级. 所有样品 RI 值为 31 ~ 1 271, 均值为 192, 整体属于中等生态风险等级; 表层沉积物 RI 空间分布差异较大 (图 7), 整体呈现沿府河入淀区南刘庄至下游枣林庄方向减少的空间特征, 府河入淀、府河-南刘庄和南刘庄片区的平均 RI 分别为 430、355 和 359, 属于重度生态风险等级, 王家寨和光淀片区属于中等生态风险等级, 枣林庄片区属于低生态风险等级.

Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、和 Ni 的潜在生态风险指数随沉积物深度增加而下降, 0 ~ 10 cm 风险指数最高, 超过 30 cm 的风险指数较低, 基本属于低生态风险等级, 由此可见 0 ~ 30 cm 沉积物的重金属是生态风险指数的主要贡献部分. 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm



1. 府河入淀, 2. 府河-南刘庄, 3. 南刘庄, 4. 王家寨, 5. 光淀, 6. 枣林庄

图5 白洋淀府河影响区沉积物重金属含量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of heavy metal content in sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake

沉积物样品 RI 的均值分别为 274 和 200,属于中等生态风险等级; 20 ~ 30 cm 的 RI 的均值小于 150,属于低生态风险等级.

重度生态风险等级区域部分采样点的表层沉积物浸出毒性结果见表 7. 根据浸出毒性鉴别

标准^[31],表层沉积物中 Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 As 的浸出浓度较低,不属于危险废物,因此重度生态风险等级区域的沉积物,清淤后可作为一般废物通过固化、焚烧和填埋等方式处理.

表6 白洋淀府河影响区沉积物中重金属生态风险指数

深度/cm	E_r								RI
	Cd	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	As	
0 ~ 60	111.93	52.46	7.52	6.55	1.42	2.13	2.41	7.25	192
0 ~ 10	184.18	60.82	7.99	7.08	1.63	2.11	2.50	7.35	274
10 ~ 20	115.03	57.14	7.54	6.44	1.42	2.15	2.45	7.50	200
20 ~ 30	81.83	41.21	7.21	6.16	1.28	2.14	2.38	7.44	149

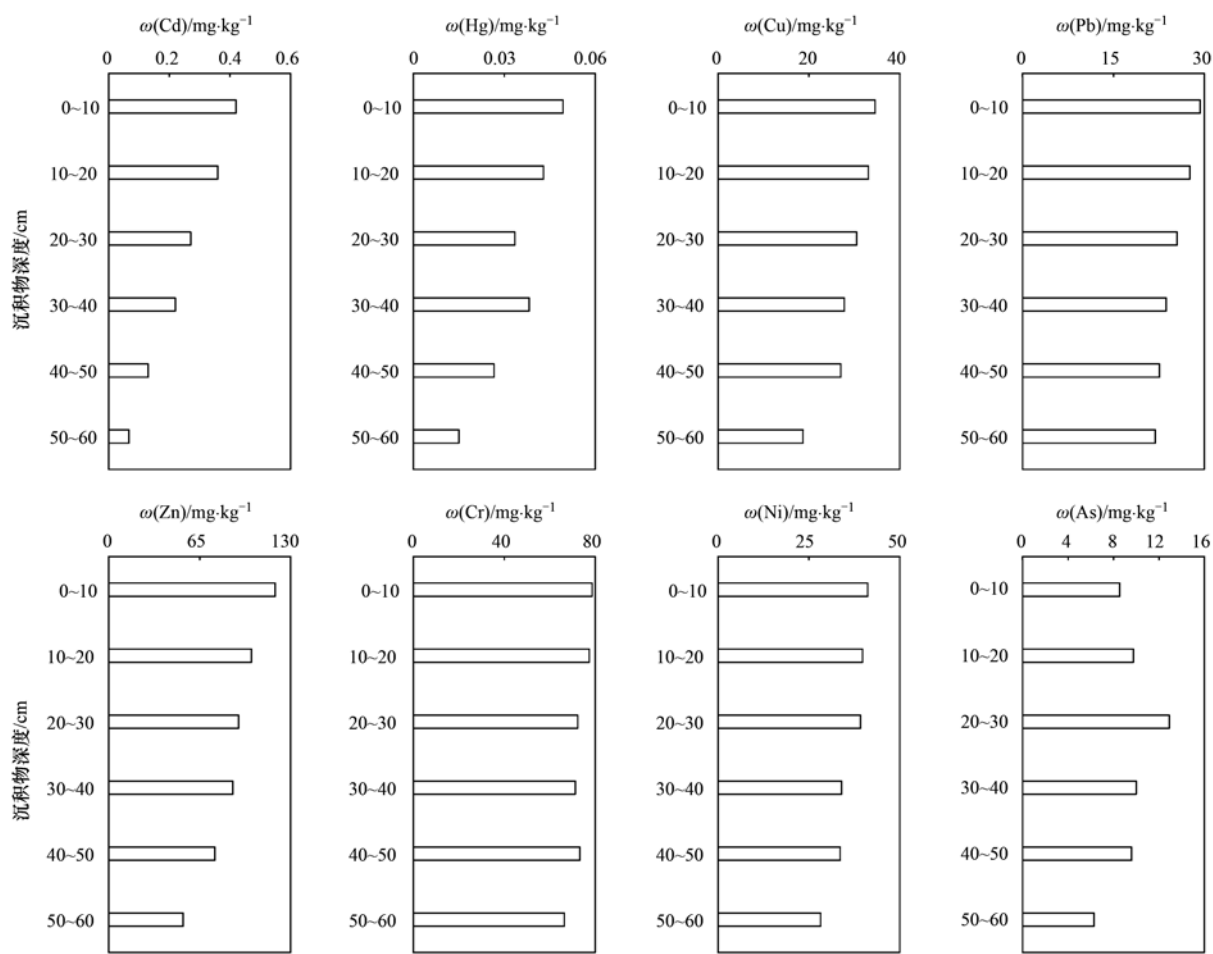


图 6 白洋淀府河影响区沉积物重金属含量垂向分布

Fig. 6 Vertical distributions of heavy metal content in sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake

表 7 重度生态风险等级区域的表层沉积物重金属含量和重金属浸出浓度

Table 7 Heavy metal content and leaching concentrations in surface sediments in the area with severe ecological risk

项目	Cd	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	As
重金属含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.15 ~ 1.97	0.09 ~ 0.15	42.5 ~ 65.3	34.0 ~ 54.5	187 ~ 370	80.1 ~ 92.8	42.5 ~ 49.1	8.8 ~ 12.2
重金属平均含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.53	0.12	49.4	42.7	236.3	86.8	44.8	10.4
浸出浓度范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.05 ~ 0.22	0.04 ~ 0.18	1.7 ~ 3.2	0.09 ~ 0.47	10.4 ~ 14.5	2.86 ~ 10.2	5.52 ~ 17.5	0.5 ~ 20.1
浸出平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.12	0.08	2.78	0.15	12.51	6.32	9.89	4.1
浸出毒性鉴别标准值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1	0.1	100	5	100	15	5	5

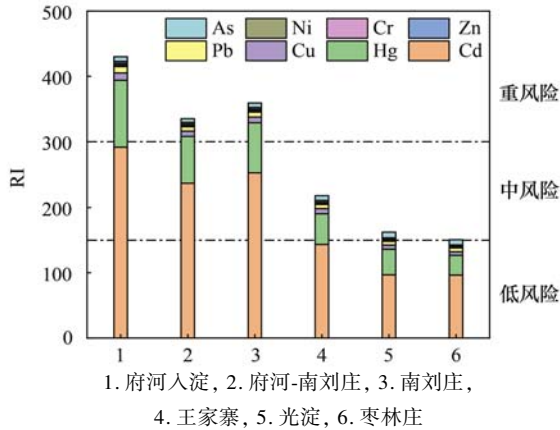


图 7 白洋淀府河影响区表层沉积物中重金属综合潜在生态风险指数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of ecological risk index of heavy metals in surface sediments in the Fuhe River influenced area of Baiyangdian Lake

3 结论

(1)白洋淀府河影响区沉积物平均 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{TOC})$ 分别为 $1\,841\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $769\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.77% 。由府河入淀区南刘庄至下游枣林庄方向,TP 含量呈现明显减少规律,而 TN 和 TOC 含量空间差异不明显。沉积物中 TN、TP 和 TOC 主要蓄积在表层 $0\sim10\text{ cm}$ 。

(2)沉积物 TP 整体属于中度污染等级,其中府河入淀、府河-南刘庄和南刘庄片区属于重度污染等级,王家寨和光淀片区属于中度污染等级,枣林庄片区属于轻度污染等级。

(3)沉积物重金属污染的主要元素为 Cd、Cu、Zn、Hg 和 Pb,分别是河北省土壤背景值的 3.73、

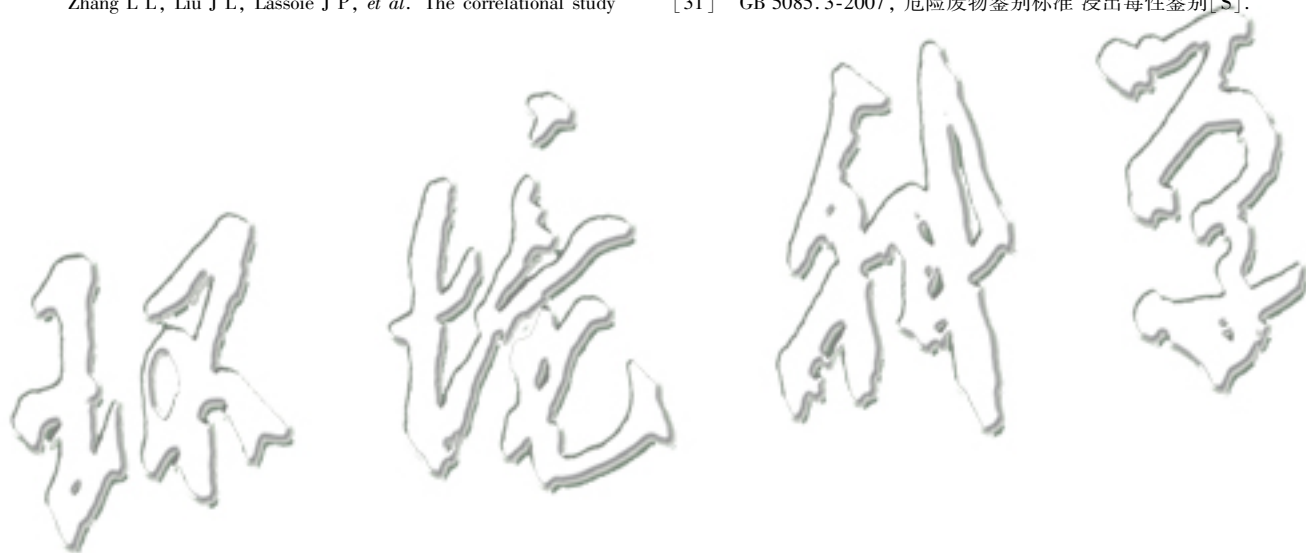
1.50、1.42、1.31 和 1.31 倍。重金属(Cd、Cu、Zn、Hg 和 Pb)均在府河入淀口南刘庄附近累积,呈现沿府河入淀区南刘庄至下游枣林庄方向减少的规律。

(4)Cd 和 Hg 是重金属主要污染贡献因子,分别为较重污染和中等污染。府河入淀、府河-南刘庄和南刘庄片区沉积物重金属属于重度生态风险等级,王家寨和光淀片区属于中等生态风险等级,枣林庄片区属于低生态风险等级。重度生态风险等级区域的沉积物重金属浸出浓度低于浸出毒性标准,清淤后可作一般废物处理。

参考文献:

- [1] 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 等. 巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 712-722.
Yang P, Yang C H, Ma X Y, *et al.* Sediment pollution characteristics and dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 712-722.
- [2] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 961-968.
Yu H, Zhang W B, Lu S Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their pollution status evaluation[J]. Environmental Science, 2010, **31**(4): 961-968.
- [3] 方家琪, 祁闯, 张新厚, 等. 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5367-5374.
Fang J Q, Qi C, Zhang X H, *et al.* Spatial distribution and pollution evaluation of carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5367-5374.
- [4] 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.
- [5] Shen Q S, Liu C, Zhou Q L, *et al.* Effects of physical and chemical characteristics of surface sediments in the formation of shallow lake algae-induced black bloom[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(12): 2353-2360.
- [6] Rothwell J J, Evans M G, Allott T E H. Sediment-water interactions in an eroded and heavy metal contaminated peatland catchment, southern pennines, UK[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2006, **6**(5): 669-676.
- [7] 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.
- [8] 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 699-711.
Wang Y P, Xu W W, Han C, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu sediments and pollution evaluation[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 699-711.
- [9] 孟亚媛, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 471-480.
Meng Y Y, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of nitrogen pollution and the potential mineralization in surface sediments of Dianchi Lake[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 471-480.
- [10] 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.
- [11] Horppila J. Sediment nutrients, ecological status and restoration of lakes[J]. Water Research, 2019, **160**: 206-208.
- [12] 俞慎, 历红波. 沉积物再悬浮-重金属释放机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(7): 1724-1731.
Yu S, Li H B. Perspectives on the release of heavy metals via sediment resuspension[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, **19**(7): 1724-1731.
- [13] Han Q, Tong R Z, Sun W C, *et al.* Anthropogenic influences on the water quality of the Baiyangdian Lake in north China over the last decade[J]. Science of the Total Environment, 2020, **701**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134929.
- [14] Yuan R Q, Wang S Q, Wang P, *et al.* Changes in flow and chemistry of groundwater heavily affected by human impacts in the Baiyangdian catchment of the north China plain[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(16), doi: 10.1007/s12665-017-6918-9.
- [15] Guo W, Huo S L, Ding W J. Historical record of human impact in a lake of northern China: magnetic susceptibility, nutrients, heavy metals and OCPs[J]. Ecological Indicators, 2015, **57**: 74-81.
- [16] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 213-223.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spatial distribution, spectral characteristics, and sources analysis of dissolved organic matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District during the winter freezing period[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 213-223.
- [17] 李娜, 周绪申, 孙博闻, 等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 772-783.
Li N, Zhou X S, Sun B W, *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(3): 772-783.
- [18] 胡国成, 许木启, 许振成, 等. 府河-白洋淀沉积物中重金属污染特征及潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(1): 146-153.
Hu G C, Xu M Q, Xu Z C, *et al.* Pollution characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediment from Fuhe River and Baiyangdian Lake, north China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(1): 146-153.
- [19] 王珺, 高高, 裴元生, 等. 白洋淀府河中氮的来源与迁移转化研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2905-2910.
Wang J, Gao G, Pei Y S, *et al.* Sources and transformations of nitrogen in the Fuhe River of the Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2010, **31**(12): 2905-2910.
- [20] 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1537-1551.
Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- [21] 阳小兰, 张茹春, 毛欣, 等. 白洋淀水体氮磷时空分布与富营养化分析[J]. 江苏农业科学, 2018, **46**(24): 370-373.

- Yang X L, Zhang R C, Mao X, *et al.* Analysis of spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus and eutrophication of water in Baiyangdian Lake [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(24): 370-373.
- [22] 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 等. 白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 224-231.
- Wang J Z, Liu Z, Wei H, *et al.* Spatial characteristics, risk assessment, and source analysis of elements in surface sediments from the Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 224-231.
- [23] 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.
- [24] 张璐璐, 刘静玲, Lassoie J P, 等. 白洋淀底栖动物群落特征与重金属潜在生态风险的相关性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 612-621.
- Zhang L L, Liu J L, Lassoie J P, *et al.* The correlational study between the community characteristics of benthic macroinvertebrates and the potential ecological risk of heavy metal in Baiyangdian[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 612-621.
- [25] 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.
- [26] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [27] HJ/T 299-2007, 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法[S].
- [28] Mudroch A, Azcue J M. Manual of aquatic sediment sampling [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] 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.
- [31] GB 5085.3-2007, 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别[S].



CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)