

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM_{2.5} 分布影响因素及交互效应 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价

朱静¹, 侯耀宗², 邹书成¹, 曹梦华^{2*}, 涂书新²

(1. 武汉生态环境监测中心, 武汉 430022; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 研究了武汉市 19 个集中式饮用水源地土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的时空分布特征, 采用单因子污染指数和综合污染指数分析重金属污染程度, 利用潜在生态风险指数评价重金属生态风险, 通过相关性和聚类分析重金属的来源。结果表明, 武汉市中心城区水源地土壤重金属的含量普遍高于远城区, 同时长江干流附近的水源地土壤重金属含量普遍高于长江支流。Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的单项潜在生态风险指数平均值均小于 40, 属于轻微风险程度。Cd 的单项潜在生态风险指数平均值在 80~160 范围内, 属于强度风险程度。武汉集中式饮用水源地土壤重金属的综合潜在生态风险指数平均值为 142.12, 属于轻微风险水平。相关性分析表明, 武汉集中式水源地土壤重金属 Cu、Pb 和 Cr 来源相似, 均与交通有关; Ni、As、Cr 和 Cu 来源相似, 均与冶金生产有关; Zn、Hg 和 Cr 来源相似, 均与防腐和催化化工有关。武汉白沙洲水厂和堤角水厂周边土壤长期定点监测表明, 2017 年后武汉集中式水源地土壤各种重金属含量均呈现显著下降趋势, 其生态风险在未来将进一步降低。

关键词: 武汉集中式饮用水源地; 土壤重金属; 时空分布; 生态风险评价; 来源解析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3215-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202010196

Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan

ZHU Jing¹, HOU Yao-zong², ZOU Shu-cheng¹, CAO Meng-hua^{2*}, TU Shu-xin²

(1. Wuhan Ecological and Environmental Monitoring Center, Wuhan 430022, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In the present study, the spatio-temporal distribution characteristics of heavy metals (Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni, and Zn) in soil around 19 centralized drinking water sources in Wuhan were investigated. Single-factor and comprehensive pollution indexes were used to determine soil pollution levels. The potential ecological hazard index was employed to evaluate soil potential ecological risks. The correlation and cluster analysis were conducted to identify pollution sources. The results showed that higher concentrations of heavy metals were present in soil from centralized drinking water source located in core area than suburb area of Wuhan. The concentrations of heavy metals in soil from centralized drinking water sources near the Yangtze River were higher than that in the sites near the tributaries of the Yangtze River. The average single potential ecological risk index of Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni, and Zn were lower than 40, which suggests a slight potential ecological risk. The average single potential ecological risk index of Cd was 80-160, which indicates a high potential ecological risk. The average comprehensive potential ecological risk index of heavy metals in soil around centralized drinking water sources in Wuhan was 142.12, which corresponded to a slight potential ecological risk. The correlation analysis showed that the sources of Cu, Pb, and Cr were similar and came from transport. The sources of Ni, As, Cr, and Cu were similar and could be attributed to metallurgical industries. The sources of Zn, Hg, and Cr were similar and could be related to antiseptic and catalytic industries. The long-term monitoring of Wuhan Dijiao and Baishazhou waterworks indicated that the concentrations of heavy metals around centralized drinking water sources in Wuhan were markedly decreased after 2017 and that ecological risk may be further reduced in the future.

Key words: Wuhan centralized drinking water source; heavy metals in soil; spatial-temporal distribution; ecological risk assessment; source apportionment

随着我国城市工农业生产和居民生活水平的不断提高,大量排放的废气、废水和废渣通过大气干湿沉降、地表径流和地下水传输等方式向城市集中式饮用水水源地土壤输入重金属^[1,2]。江苏省扬州市瓜州、三江营和廖家沟水源地土壤中 Cd、Pb、Cu、Cr 和 Zn 处于轻微-中等污染水平^[3],北京密云水库土壤中 Cd 为中度污染到强污染水平^[4]。水源地土壤环境既是重金属的汇,也是重金属传输的源,对饮用水水源产生潜在威胁,长期饮用重金属污染水源

将对人体健康产生严重危害^[5,6]。集中式饮用水安全直接关系到城市社会稳定,其中水源地土壤环境质量是影响饮用水水质的关键因素之一,因此集中式饮用水水源地土壤重金属污染状况受到广泛关注。

收稿日期: 2020-10-26; 修订日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800305); 广东省自然科学基金项目(201707010144)

作者简介: 朱静(1984~),女,博士,高级工程师,主要研究方向为环境质量监测综合评价, E-mail: alicezhu84@gmail.com

* 通信作者, E-mail: caomenghua@mail.hzau.edu.cn

武汉市位于长江中游地区,是长江经济带的核心节点城市.文献[7]重点强调水资源的保护,其中水源地土壤污染防治是重要环节.掌握水源地土壤重金属污染状况是实现水资源风险管控的基础,因此研究武汉市水源地土壤重金属的分布特征及其环境风险极其重要.目前针对武汉市土壤重金属污染特征已经开展了较多研究工作,主要集中在工业区周边土壤重金属污染评价^[8,9]、不同功能区土壤重金属污染状况^[10,11]、退役场地土壤重金属污染特征分析等^[12].关于武汉集中式饮用水源地土壤重金属污染特征及其环境风险的研究报道较少.本研究以武汉集中式饮用水源地土壤为研究对象,分析了饮用水源地土壤重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的时空分布特征及生态风险,对武汉集中式饮用水源地土壤环境做出科学合理的评价,以为相关管理部门对水资源的保护奠定理论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选择武汉市江岸区长江堤角水厂、汉阳区(汉江国棉水厂和汉江琴断口水厂)、武昌区(长江余家头水厂和长江平湖门水厂)、青山区(长江港东水厂)、洪山区(长江白沙洲水厂)、东西湖区(汉江白鹤咀水厂、西湖水厂和余氏墩水厂)、汉南区(长江沌口水厂和汉武水厂)、蔡甸区(蔡甸水厂)、江夏区(江夏龙床矾水厂)、黄陂区(黄陂武湖水厂和黄陂前川水厂)和新洲区(新洲阳逻水厂、新洲长源自来水公司大桥水厂和新洲长源自来水公司汪套水厂)共 19 个主要集中式饮用水源地为研究对象(如图 1).其中长江堤角水厂、长江港东水厂、长江余家头水厂、长江平湖门水厂、长江白沙洲水厂、长江沌口水厂、余氏墩水厂、江夏龙床矾水厂、汉武水厂、黄陂武湖水厂和新洲阳逻水厂共 11 个水源地以长江为取水水源;汉江国棉水厂、汉江琴断口水厂、汉江白鹤咀水厂、西湖水厂和蔡甸水厂共 5 个水源地以汉水为取水水源;黄陂前川水厂以滢水为取水水源;新洲长源自来水公司大桥水厂和汪套水厂以举水为取水水源.

1.2 样品采集

在每一个集中式饮用水源地取水口 100 m 缓冲区陆域、一级保护区范围和二级保护区范围陆域分别布设 3 个采样点,共计 57 个采样点.每个监测点位依据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)^[13],使用 5 点混合样采集 0~20 cm 表层土壤,然后用四分法在每个监测点选取土壤样品 1~2

kg.土壤样品自然风干后去除砂砾和植物根系等异物,然后过 2 mm 筛,密封后常温保存备用.

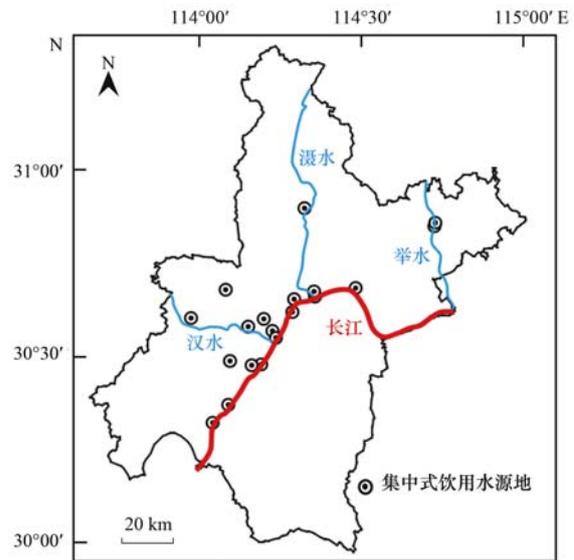


图 1 武汉集中式饮用水源地分布示意

Fig. 1 Distribution of centralized drinking water sources in Wuhan

1.3 土壤样品测试

土壤 pH 依据 NY/T 1121.2-2006 标准采用水土比 2.5:1 混合^[14],充分搅拌 5 min 后静置 2 h,采用 pH 计(上海雷磁 PHS-3E)测定.土壤采用 HCl-HNO₃-HClO₄-HF 在电热板上进行热消解^[15],消解完全后 Cd 和 Pb 采用石墨炉原子吸收(美国安捷伦 GTA 120)测定,Cr、Cu、Zn 和 Ni 采用火焰原子吸收(美国安捷伦 200 Series AA)测定,As 和 Hg 采用原子荧光(北京吉天 AFS-8220)测定.土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的检出限分别为 0.01、0.005、0.5、2.0、0.40、0.15、0.50 和 0.20 mg·kg⁻¹,pH 的检出限为 0.01.测试过程中,采用国家一级标准土壤监控测试的准确度,采用重复样监控分析测试的精密度^[16].每个电热板均作 2 个空白样,每个采样点测试 3 个平行样品,平行样浓度值的相对标准偏差小于 10%.样品分析测试质量和各元素指标检出限均满足文献[13]的要求,测试数据可靠.

1.4 土壤重金属污染评价方法

1.4.1 污染指数法

采用单因子污染指数和综合污染指数分别对武汉集中式水源地土壤中重金属污染状况进行评价.

单因子污染指数计算公式为^[17]:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为重金属 i 的单因子污染指数, C_i 为监测点土壤重金属 i 的实测值(mg·kg⁻¹), S_i 为重金属 i 的评价标准值(mg·kg⁻¹),以湖北省土壤环境背景值^[18]作为评价标准.

综合污染指数计算公式为^[17]:

$$P_N = \sqrt{\frac{(P_{iavr})^2 + (P_{imax})^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_N 综合污染指数, P_{iavr} 单因子污染指数平均值, P_{imax} 单项污染指数最大值. 单因子污染指数与综合污染指数分级标准如表 1 所示^[19].

表 1 单因子污染指数与综合污染指数分级标准

Table 1 Classification standard of single factor and comprehensive pollution indexes

单因子污染指数	污染等级	综合污染指数	污染水平
$P_i \leq 1$	未污染	$P_N \leq 0.7$	未污染
$1 < P_i \leq 2$	轻微污染	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
$3 < P_i \leq 5$	中度污染	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
$P_i > 5$	重度污染	$P_N > 3.0$	重度污染

1.4.2 潜在生态风险指数法

采用潜在生态风险指数法对武汉集中式饮用水源地土壤中重金属潜在生态风险进行评价, 其计算公式如下^[20]:

$$E_i = T_i \times C_i / B_i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

式中, E_i 为重金属 i 的单项潜在生态风险指数; T_i 为重金属 i 的毒性响应系数, 本研究中毒性响应系数 $Hg = 40 > Cd = 30 > As = 10 > Pb = Cu = Ni = 5 > Cr = 2 > Zn = 1$ ^[21]; C_i 为重金属 i 含量实测值 ($mg \cdot kg^{-1}$); B_i 为重金属 i 含量标准值 ($mg \cdot kg^{-1}$), 本研究选用湖北省土壤环境背景值^[18]; RI 为综合潜在生态风险指数. 潜在生态风险指数分级标准如表 2 所示^[22].

表 2 潜在生态风险指数分级标准

Table 2 Grade standards of potential ecological hazard index

E_i	RI	生态风险程度
$E_i < 40$	$RI < 150$	轻微风险
$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中度风险
$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强度风险
$160 \leq E_i < 320$	$600 \leq RI < 1200$	很强风险
$E_i \geq 320$	$RI > 1200$	极强风险

表 3 武汉集中式饮用水源地土壤重金属含量统计

Table 3 Heavy metal concentrations in soils around centralized drinking water sources in Wuhan

元素	样本数 (n)	含量范围 / $mg \cdot kg^{-1}$	平均含量 / $mg \cdot kg^{-1}$	标准差	变异系数	湖北省背景值 ^[17] / $mg \cdot kg^{-1}$
Cd	57	0.10 ~ 2.24	0.52	0.35	0.68	0.17
Hg	57	0.01 ~ 0.15	0.08	0.04	0.55	0.08
As	57	2.30 ~ 33.88	11.50	5.19	0.45	12.3
Pb	57	17.98 ~ 75.78	35.21	15.72	0.44	27.1
Cr	57	35.95 ~ 202.00	83.86	24.41	0.29	86.0
Cu	57	10.69 ~ 84.98	39.11	14.62	0.37	30.7
Ni	57	14.55 ~ 129.00	36.31	15.60	0.43	37.3
Zn	57	43.17 ~ 258.73	110.06	37.20	0.51	83.6

2 结果与讨论

2.1 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的空间分布特征

2017 年监测武汉市 11 个区中 19 个主要集中式饮用水源地土壤的重金属含量统计如表 3 所示. 土壤样品 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的算术平均含量分别为 0.52、0.08、11.50、35.21、83.86、39.11、36.31 和 110.06 $mg \cdot kg^{-1}$. Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的平均含量趋近于湖北省土壤元素背景值, 尚未造成污染. Cd 的平均含量显著高于背景值, 是湖北省土壤环境背景值的 3.06 倍, 可能存在污染风险.

变异系数反映各监测点土壤中重金属空间分布的离散程度, 低于 0.2 属于低变异, 0.2 ~ 0.5 属于中等变异, 0.5 ~ 1 属于强变异^[23]. 表 3 中重金属的变异系数大小顺序为 $Cd > Hg > Zn > As > Pb > Ni > Cu > Cr$, 其中 Cd、Hg 和 Zn 属于强变异, As、Pb、Ni、Cu 和 Cr 属于中等变异, 表明土壤中 Cd、Hg 和 Zn 空间分布具有显著离散型, 可能存在多种不同点源污染. 图 2 显示武汉集中式饮用水源地土壤中重金属含量空间分布. 各种重金属的空间分布整体上呈现两个规律: 一是位于中心城区的集中式饮用水源地土壤中各种金属含量普遍高于远城区. 重金属主要来源于工业生产、汽车排放和农业生产, 与经济发展水平呈显著正相关^[24]. 武汉市中心城区集中了主要的工业企业, 其中汉阳区和青山区分别是汽车和化工产业聚集区, 这两个行业是重金属排放的主要工业源. 同时武汉市中心城区人口密集, 机动车保有量持续增加, 机动车尾气排放对土壤中重金属输入也具有显著贡献. 二是长江干流附近的集中式饮用水源地土壤中各种重金属含量普遍高于长江支流(汉江、淝水和举水). 表明武汉集中式饮用水源地土壤中重金属的输入与长江水质存在相关性. 长江流域岩土矿物风化侵蚀和工农业生产会向长江水体传输重金属元素, 长江水体中 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 的平均浓度分别为 2.86、5.40、4.69、0.965、0.136 和

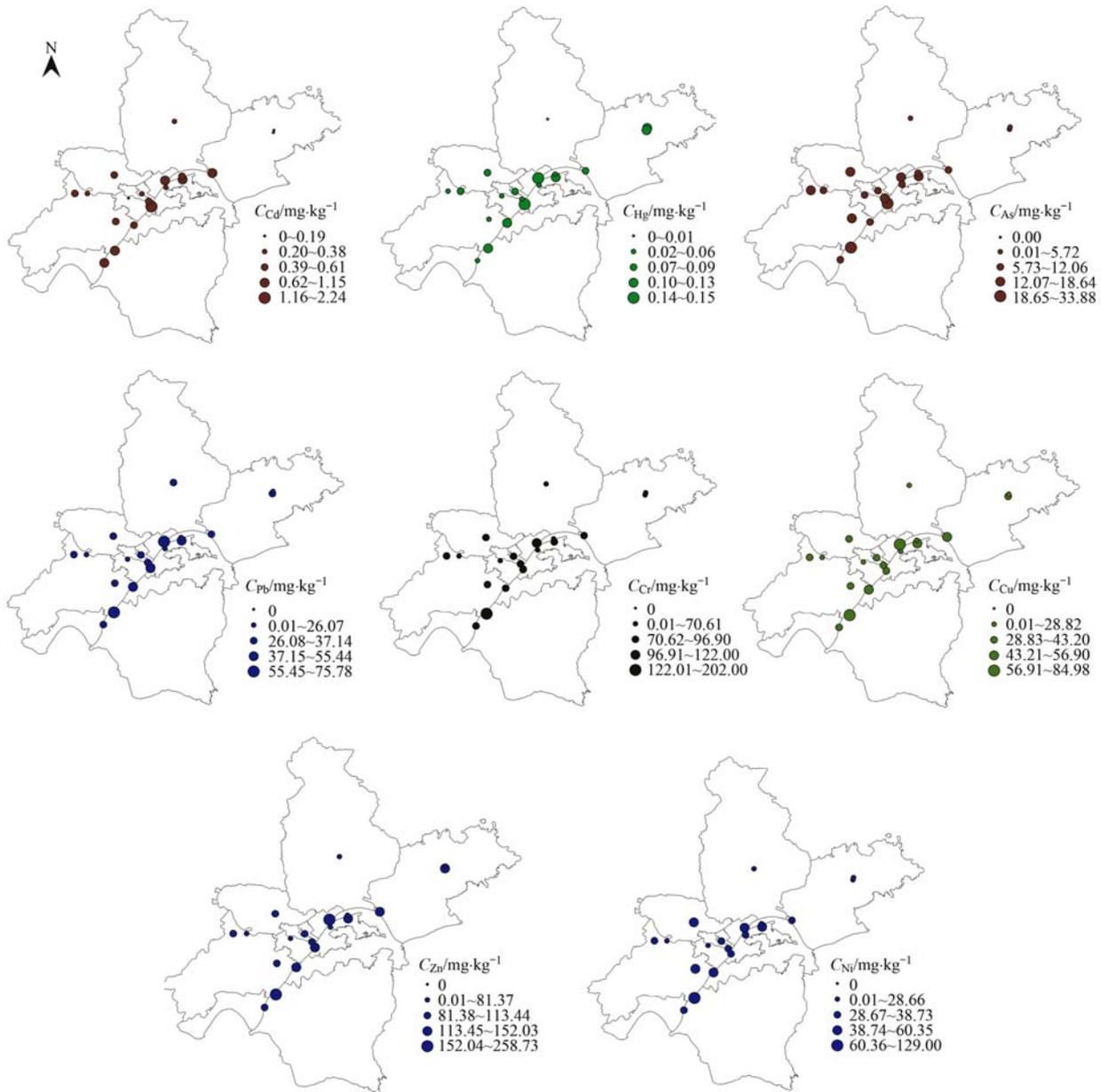


图2 武汉集中式水源地土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of different heavy metals in soil around centralized drinking water sources in Wuhan

$3.41 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 水体中重金属随着吸附作用逐渐在长江流域周边沉积物中累积^[25,26]。

2.2 武汉集中式水源地土壤重金属污染评价及生态风险评估

2.2.1 武汉集中式水源地土壤重金属污染评价

采用单因子污染指数与综合污染指数对武汉集中式饮用水源地土壤重金属污染状况进行评价(图3)。单因子污染指数评价结果表明,绝大多数土壤中 Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 属于轻微污染及以下,而 Cd 大部分属于轻度污染及以上。土壤中 Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的单因子污染指数分别为 $0.01 \sim 0.23$ 、 $0.19 \sim 2.75$ 、 $0.66 \sim 4.17$ 、 $0.42 \sim 2.35$ 、 $0.35 \sim 2.77$ 、 $0.39 \sim 3.45$ 和 $0.52 \sim 2.64$, 这 7 种重金属属于轻微污染及以下所占比例分别为

96.49%、96.49%、89.47%、98.24%、92.98%、91.23% 和 98.24%。土壤中 Cd 的单因子污染指数范围为 $0.59 \sim 13.16$, 平均值为 3.04, 其中 Cd 轻度污染以上所占比例达到 66.67%。有 6 个集中式饮用水源地(汉武水厂、长江港东水厂、堤角水厂、龙床矾水厂、武湖水厂和平湖门水厂)土壤重金属 Cd 的单因子污染指数属于重度污染,这 6 个集中式饮用水源地全部位于长江干流附近。综合污染指数评价结果表明,土壤中 Cd 为重度污染, Hg、As、Pb、Cu、Ni 和 Zn 为中度污染, Cr 为轻度污染。武汉市 19 个集中式饮用水源地土壤重金属的综合污染指数大小顺序为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cr}$, 其中 Cd 的综合污染指数为 9.51, 其它重金属 Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的综合污染因子指数范围为

1.79~2.99. 汪敬忠等也发现白洋淀水系表层沉积物中 Cd 的综合污染指数明显高于其它重金属, 同时 Cd 空间分布也具有显著地理特征^[27].

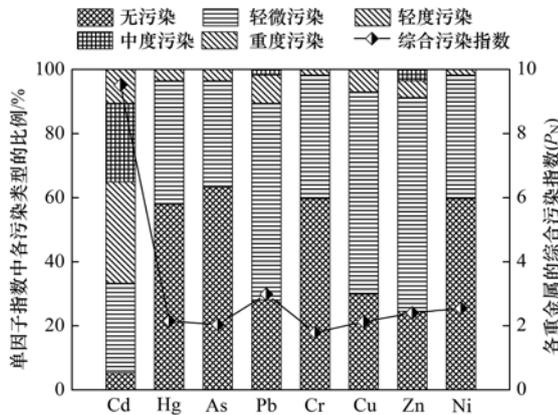


图3 单因子污染指数与综合污染指数评价武汉集中式饮用水源地土壤重金属

Fig. 3 Assessment of heavy metals in soil around centralized drinking water sources in Wuhan by single factor and comprehensive pollution indexes

2.2.2 武汉集中式水源地土壤重金属生态风险评估

采用潜在生态风险指数对武汉集中式饮用水源地土壤重金属潜在生态风险进行评估(表4). 结果表明, 武汉集中式饮用水源地土壤重金属单项潜在生态风险指数平均值的大小顺序依次为 Cd > Hg > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn. 依据潜在生态风险分级标准(表2), Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的单项潜在生态风险指数平均值均小于 40, 属于轻微风险程度. Cd 的单项潜在生态风险指数平均值在 80 ~

160 范围内, 属于强度风险程度. 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的综合潜在生态风险指数为 57.08 ~ 519.42, 平均值为 142.12, 表明武汉集中式饮用水源地土壤重金属整体上处于轻微风险水平, 其中处于轻微风险、中度风险和强度风险的监测点分别占比为 52.63%、42.11% 和 5.26%. 仅 3 个集中式饮用水源地(堤角水厂、龙床矾水厂和平湖门水厂)土壤重金属处于强度风险水平, 这 3 个集中式饮用水源地也全部位于长江干流附近.

此外, 依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[28], 19 个集中式饮用水源地土壤中 Hg、As、Pb、Cr、Cu 和 Ni 的浓度均低于农田土壤污染风险筛选值. 只有 8 个集中式饮用水源地(汉南区汉武水厂、黄陂区武湖水厂、江岸区堤角水厂、江夏区龙床矾水厂、经济技术开发区沌口水厂、青山区长江港东水厂、武昌区平湖水厂和新洲区阳逻水厂)土壤中 Cd 的含量超过农田土壤污染风险筛选值, 但低于风险管制值. 在空间分布特征方面, 这 8 个集中式饮用水源地全部沿长江分布, 其中长江武汉段中下游附近土壤中 Cd 浓度高于上游, 这可能与中下游靠近青山区化工聚集区有关. Yang 等也发现在武汉青山工业区附近表层土壤 Cd 平均含量高达 2.3 mg·kg⁻¹, 其主要来源于工业生产、汽车排放和天然源^[29]. 在含量水平方面, 武汉集中式饮用水源地土壤 Cd 的含量显著低于北京水源保护地土壤(表层土壤 Cd 平均含量达到 4.58 mg·kg⁻¹)^[4].

表4 武汉集中式饮用水源地土壤重金属潜在生态风险指数分析

Table 4 Potential ecological risk of heavy metals in soils around centralized drinking water sources in Wuhan

项目	E_i								RI
	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	
最小值	17.71	3.96	1.87	3.32	0.84	1.74	1.95	0.52	57.08
最大值	394.67	115.90	27.55	20.85	4.70	13.84	8.08	3.09	519.42
平均值	82.27	30.18	9.35	6.50	1.95	5.89	4.74	1.24	142.12
生态风险程度	强度	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微

2.3 武汉集中式水源地土壤重金属的来源统计分析

重金属元素之间的相关性能够反映它们是否具有同源性, 对重金属的来源提供信息. 本文采用 SPSS(25.0)对武汉集中式水源地土壤 8 种重金属进行相关性分析, 相关系数采用 Pearson(表5). 结果表明, Cu 与 Pb 和 Cr 存在显著正相关($P < 0.01$, 相关系数均大于 0.7). Pb 是交通源的标志性元素^[30], Li 等发现道路周边土壤中 Cu、Pb 和 Cr 呈正相关, 且显著高于背景值^[31], 因此土壤中重金属 Cu、Pb 和 Cr 可能来源于武汉市大规模机动车尾气排放. 同时, Ni 与 As、Cr 和 Cu 也呈显著的正相关($P < 0.01$), 其中 Ni 与 Cr 的相关性达到 0.924. 这 4

种重金属的共同用途是冶金, 故土壤重金属 Ni、As、Cr 和 Cu 的来源可能与武汉的核心工业汽车、船舶和钢铁生产排放相关. Zhang 等^[32]在福建九龙江水源地周边土壤中也发现 Ni 与 Cr 存在显著正相关, 与当地的工业生产有关. 此外, Zn 与 Hg 和 Cr 也成显著正相关($P < 0.01$, 相关系数均大于 0.7), 这 3 种重金属均具有防腐和催化特性, 广泛应用于化工行业, 因此这 3 种重金属可能与武汉市龙头行业石化和纺织工业有关. Cd 与其它重金属的相关系数较低, 可能原因是 Cd 的来源途径更复杂. Cd 除了来源于工业和交通排放, 还与农业种植施用肥料含 Cd 有关^[3,30].

进一步采用聚类分析对武汉集中式水源地土壤重金属来源进行分析(图4)。结果表明,江夏区江夏龙床矾水厂属于一个亚类,其位于远城区,周边无工业污染源,其土壤中重金属可能主要来源于农业面源污染。武昌区长江平湖门水厂、青山区长江港东水厂和江岸区长江堤角水厂属于一个亚类,其全部位于中心城区,农田较少,其土壤中重金属可能主要来源于工业源和交通源。其它15个集中式饮用水源地属于一个亚类,涵盖中心城区和远城区,其重金属来源可能来源于工业、交通和农业面源复合

污染。其中余家头水厂、武湖水厂、蔡甸水厂、琴断口水厂、前川水厂和新洲汪套水厂属于一个次亚类,主要位于长江和汉江以北区域,表明重金属污染来源相对集中。白鹤咀水厂、余氏墩水厂、西湖水厂、汉武水厂、国棉水厂、白沙洲水厂、沌口水厂、阳逻水厂和新洲大桥水厂属于另一个次亚类,空间分布无明显规律,表明重金属污染来源比较分散。党丽娜等通过多元统计分析推断武汉市内环重金属以交通和工业源为主,二环带以工业源为主,三环带以交通源为主^[11]。

表5 武汉集中式饮用水源地土壤重金属之间的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients between heavy metals in soil around centralized drinking water sources in Wuhan

	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
Cd	1							
Hg	0.445	1						
As	0.557	0.343	1					
Pb	0.555	0.596	0.526	1				
Cr	0.490	0.572	0.747**	0.590	1			
Cu	0.574	0.642	0.669	0.736**	0.806**	1		
Zn	0.365	0.723**	0.364	0.631	0.747**	0.589	1	
Ni	0.482	0.385	0.821**	0.537	0.924**	0.756**	0.498	1

1) **表示在0.01水平(双侧)上极显著相关

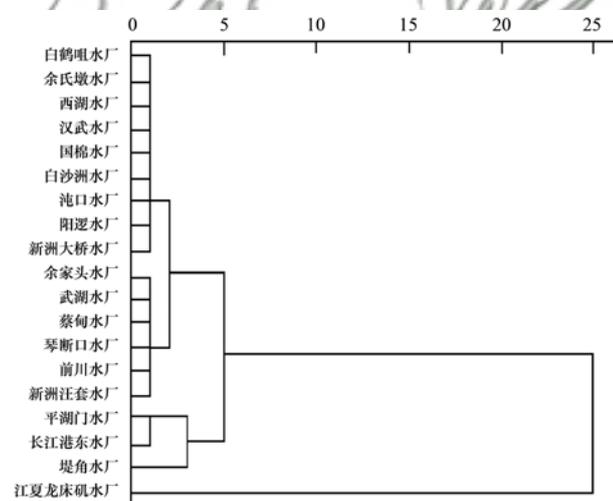


图4 武汉集中式饮用水源地土壤采样点之间的系统聚类分析

Fig. 4 Hierarchical clustering dendrogram of elements in sampling sites around centralized drinking water sources in Wuhan

2.4 武汉集中式水源地土壤重金属含量随时间的变化趋势

白沙洲水厂和堤角水厂是武汉市最早建立的一批大规模集中式饮用水源,其中白沙洲水厂(始建于1973年)的日生产饮用水能力为40万 m^3 ,供水面积约68 km^2 ,堤角水厂(始建于1966年)的日生产饮用水能力为20万 m^3 ,供水面积约14 km^2 。同时依据聚类分析,白沙洲水厂和堤角水厂属于两个典型亚类。此外白沙洲水厂和堤角水厂周边土壤分别为武汉市广泛分布的暗棕壤和潮土。因此选择白沙

洲水厂和堤角水厂作为武汉集中式水源地代表,于2014~2019年对其周边土壤进行了3次定点监测,从中可以分析武汉集中式水源地土壤重金属随时间的变化趋势。图5的结果表明堤角水厂和白沙洲水厂周边土壤中大部分重金属在2014~2017年均呈现增加的趋势,其可能来源于武汉市工业和交通源排放的持续增加。但是,堤角水厂和白沙洲水厂周边土壤中重金属含量在2017~2019年均呈现显著降低的趋势,其中堤角水厂Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn和Ni平均含量分别降低7.73%、14.09%、5.43%、10.74%、10.22%、10.62%、22.83%和17.08%,白沙洲水厂Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn和Ni平均浓度分别降低15.35%、2.55%、3.15%、16.19%、9.79%、4.75%、14.56%和14.19%。武汉集中式水源地土壤中重金属含量的削减可能与武汉市落实《武汉市改善空气质量行动计划》(2013~2017)^[33]有直接关系。一方面武汉市全面实施清洁能源改造,煤炭燃烧是重金属排放的重要污染源,武汉市在2017年煤炭消费总量实现零增长,煤炭消费占能源消费比重降到50%以下;另一方面武汉市到2017年已完成三环线内重污染化工企业关停或搬迁,从而有效减少工业污染源,有利于降低重金属排放。此外武汉市近年大力发展新能源汽车为代表的绿色交通和推进主城区绿地系统建设,大幅提高植被覆盖(2019年比2017年的建成区绿化面积增加

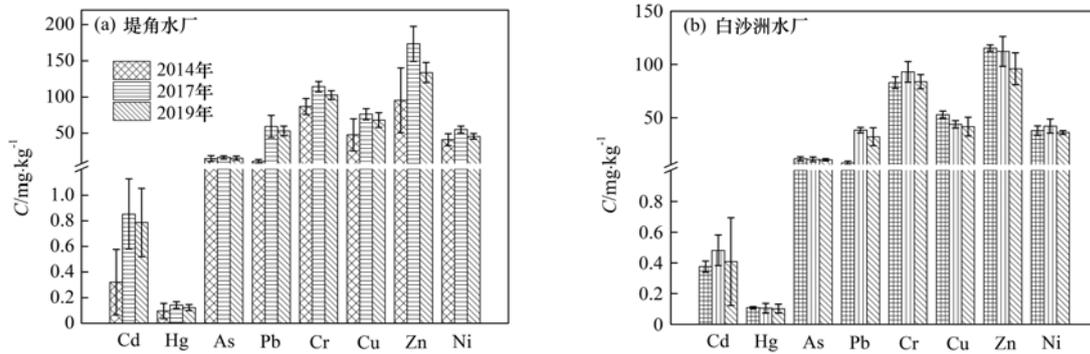


图5 武汉堤角水厂和白沙洲水厂周边土壤中重金属含量在2014~2019年的变化趋势

Fig. 5 Tendency of different heavy metals in soil around Wuhan Dijiao and Baishazhou waterworks during 2014-2019

1.2%)。通过植物叶片和根系对重金属的吸附和吸收作用,从空气和水介质向土壤介质中传输和沉积的重金属含量将降低。

3 结论

(1)武汉集中式饮用水源地重金属的空间分布整体上呈现两个规律:一是位于中心城区的集中式水源地土壤中各种金属含量普遍高于远城区,二是长江干流附近的土壤重金属含量普遍高于长江支流。

(2)单因子污染指数评价结果表明,土壤中Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni和Zn属于轻微污染及以下所占比例分别为33.33%、96.49%、96.49%、89.47%、98.24%、92.98%、91.23%和98.24%。综合污染指数评价结果表明,土壤中Cd为重度污染,Hg、As、Pb、Cu、Ni和Zn为中度污染,Cr为轻度污染。

(3)潜在生态风险指数评估结果表明,Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni和Zn的单项潜在生态风险指数平均值均小于40,属于轻微风险程度。Cd的单项潜在生态风险指数平均值在80~160范围内,属于强度风险程度。武汉集中式饮用水源地土壤重金属的综合潜在生态风险指数为57.08~519.42,平均值为142.12,表明武汉集中式饮用水源地土壤重金属整体上处于轻微风险水平。

(4)相关性分析表明,武汉集中式水源地土壤重金属Cu与Pb、Cr、Ni与As、Cr、Cu,以及Zn与Hg、Cr存在显著正相关。聚类分析表明,武汉19个集中式水源地分成3类:Ⅰ类重金属主要来源于农业面源污染;Ⅱ类重金属主要来源于工业源和交通源;Ⅲ类重金属来源于工业、交通和农业面源复合污染。

(5)以白沙洲水厂和堤角水厂作为武汉集中式水源地代表,长期连续定点监测表明,武汉集中式水源地土壤各种重金属含量自2017年之后均呈现显

著下降趋势,其生态风险在未来将进一步降低。

参考文献:

- [1] Tong S M, Li H R, Wang L, *et al.* Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019—a systematic review[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(9), doi: 10.3390/ijerph17093099.
- [2] Byers H L, McHenry L J, Grundl T J. Increased risk for lead exposure in children through consumption of produce grown in urban soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **743**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140414.
- [3] 马武生,金根娣,薛梅,等.某地区集中式饮用水源地土壤重金属污染状况、评价与源解析[J]. *环境工程*, 2016, **34**(12): 141-146, 136.
- [4] Ma W S, Jin G D, Xue M, *et al.* Contents, evaluation and source analysis of heavy metal in soil in a centralized drinking water source[J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(12): 141-146, 136.
- [5] 胡艳霞,周连第,魏长山,等.北京水源保护地土壤重金属空间变异及污染特征[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(6): 1483-1490.
- [6] Hu Y X, Zhou L D, Wei C S, *et al.* Study on spatial variability of soil heavy metals environments and its pollution characteristics in Beijing water protective area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(6): 1483-1490.
- [7] Gu C K, Zhang Y, Peng Y, *et al.* Spatial distribution and health risk assessment of dissolved trace elements in groundwater in southern China[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**, doi: 10.1038/s41598-020-64267-y.
- [8] 贾英,方明,吴友军,等.上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 147-153.
- [9] Jia Y, Fang M, Wu Y J, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in river sediments of Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(1): 147-153.
- [10] 环境保护部,发展改革委,水利部.关于印发《长江经济带生态环境保护规划》的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201707/t20170718_418053.htm, 2017-07-17.
- [11] Yang Y, Christakos G, Guo M W, *et al.* Space-time quantitative source apportionment of soil heavy metal concentration increments[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 560-566.
- [12] 刘君侠,童铭,李莹莹,等.武汉地区典型行业土壤重金属

- 污染分析与评价[J]. 广东化工, 2019, **46**(6): 151-153.
- Liu J X, Tong M, Li Y Y, *et al.* Analysis and evaluation of soil pollution by heavy metal in typical industry zones in Wuhan[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, **46**(6): 151-153.
- [10] Ou C H, Zhu X, Hu L, *et al.* Source apportionment of soil contamination based on multivariate receptor and robust geostatistics in a typical rural-urban area, Wuhan city, middle China[J]. Open Chemistry, 2020, **18**(1): 244-258.
- [11] 党丽娜, 杨勇. 武汉市土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 华中农业大学学报, 2015, **34**(6): 66-72.
- Dang L N, Yang Y. Spatial distribution and pollution assessment of soil heavy metals in Wuhan urban[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, **34**(6): 66-72.
- [12] Ta de sse A W, Gereslassie T, Qiang X, *et al.* Concentrations, distribution, sources and ecological risk assessment of trace elements in soils from Wuhan, central China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**, doi: 10.3390/ijerph15122873.
- [13] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
HJ/T 166-2004, Technical specification for soil environmental monitoring[S].
- [14] NY/T 1121.2-2006, 土壤检测 第2部分: 土壤 pH 的测定[S].
NY/T 1121.2-2006, Soil testing part 2: Method for determination of soil pH[S].
- [15] Xia Y, He P J, Shao L M, *et al.* Metal distribution characteristic of MSWI bottom ash in view of metal recovery[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **52**: 178-189.
- [16] 郭志娟, 周亚龙, 杨峥, 等. 雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4169-4179.
- Guo Z J, Zhou Y L, Yang Z, *et al.* Discussion on key issues of geochemical monitoring of soil heavy metal in Xiong'an new district[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4169-4179.
- [17] Huang L L, Rad S, Xu L, *et al.* Heavy metals distribution, sources, and ecological risk Assessment in Huixian wetland, South China [J]. Water, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/w12020431.
- [18] 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. 330-380.
- [19] Mazurek R, Kowalska J, Gašiorek M, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution [J]. Chemosphere, 2017, **168**: 839-850.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [21] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, Southwestern, China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [22] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in Southwestern China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [23] Phil-Eze P O. Variability of soil properties related to vegetation cover in a tropical rainforest landscape[J]. Journal of Geography and Regional Planning, 2010, **3**(7): 177-184.
- [24] 党丽娜, 梅杨, 廖祥森, 等. 城市不同交通圈(带)土壤重金属多元统计分析及空间分布研究——以武汉市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(6): 925-931.
- Dang L N, Mei Y, Liao X S, *et al.* Study on multivariable statistics and spatial distribution of urban soil heavy metals at different traffic circle (band)-with the example of Wuhan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, **25**(6): 925-931.
- [25] 杜维, 李爱民, 鲁敏, 等. 长江武汉段水质重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(120): 535-539.
- Du W, Li A M, Lu M, *et al.* Preliminary health risk assessment of heavy metals in the Yangtze river of Wuhan area [J]. Environmental Science and Technology, 2014, **37**(120): 535-539.
- [26] Li R, Tang X Q, Guo W J, *et al.* Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River [J]. Science of the Total Environment, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136779.
- [27] 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.
- [28] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
GB 15618-2018, Soil environmental quality: risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [29] Yang Y, Mei Y, Zhang C T, *et al.* Heavy metal contamination in surface soils of the industrial district of Wuhan, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2016, **22**(1): 126-140.
- [30] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3496-3502.
- Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, *et al.* Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the pearl river delta, China [J]. Environmental Science, 2008, **29**(12): 3496-3502.
- [31] Li F R, Kang L F, Gao X Q, *et al.* Traffic-related heavy metal accumulation in soils and plants in northwest China[J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2007, **16**(5): 473-484.
- [32] Zhang Q, Han G L, Liu M, *et al.* Distribution and contamination assessment of soil heavy metals in the Jiulongjiang river catchment, southeast China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(23), doi: 10.3390/ijerph16234674.
- [33] 武汉市人民政府. 武汉市人民政府关于印发武汉市改善空气质量行动计划(2013-2017年)的通知[EB/OL]. http://www.pkulaw.cn/fulltext_form.aspx?gid=17606810, 2014-02-10.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)