

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

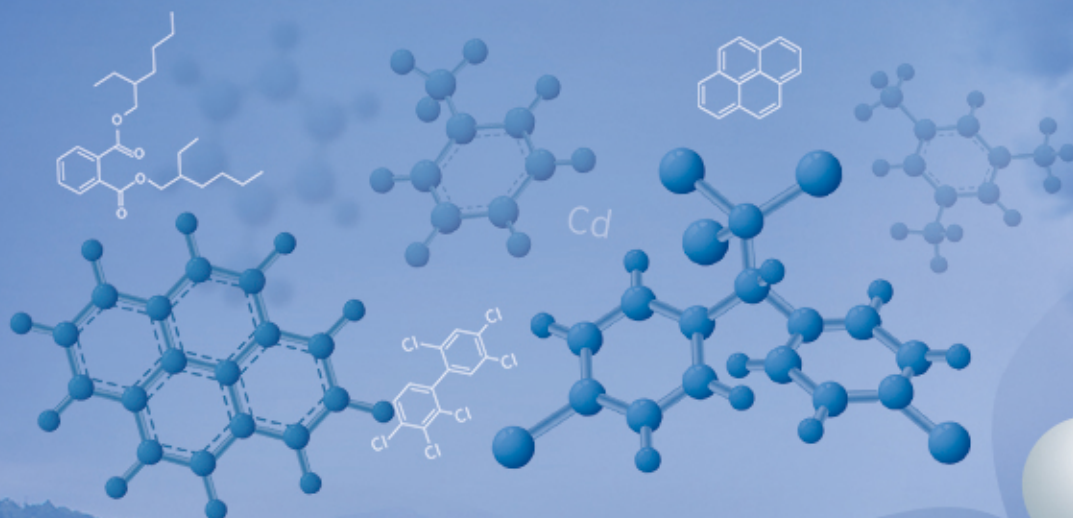
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险

李梦婷^{1,2}, 沈城¹, 吴健^{1,2*}, 黄沈发¹, 李大雁¹, 王敏¹

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241)

摘要: 以上海市闵行区典型快速城市化区域为例, 基于 36 个地块 595 个点位土壤样品数据, 分析 5 种不同土地利用类型中 8 项土壤重金属的含量分布特征, 通过内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法进行生态风险评价。结果表明, 重金属锌和镉含量的变异系数较高, 受人为活动影响特征明显。涉重工业用地、非涉重工业用地的重金属赋存相对较高, 住宅用地和耕地重金属含量总体不高但具有其特异性组成特征, 公共管理与公共服务用地相对最低。重金属锌和镉的内梅罗综合污染指数较高, 分别处于重度和中度污染水平, 其余重金属均为警戒或轻度污染水平。不同土地利用类型的土壤重金属潜在生态风险水平为: 涉重工业用地 > 非涉重工业用地 ≈ 住宅用地 > 耕地 ≈ 公共管理与公共服务用地, 工业用地由于行业类别多、历史生产复杂和管理水平差异大等原因, 具有较大的土壤重金属污染风险, 住宅用地和耕地等其他用地类型也呈现出一定的重金属累积趋势。不同土地利用的土壤重金属污染源头防控和地块再开发利用的安全性及风险管控, 是快速城市化区域土壤污染防治的重点和难点。

关键词: 快速城市化区域; 土壤重金属; 土地利用类型; 涉重工业用地; 生态风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4889-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101194

Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area

LI Meng-ting^{1,2}, SHEN Cheng¹, WU Jian^{1,2*}, HUANG Shen-fa¹, LI Da-yan¹, WANG Min¹

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Taking the Minhang District of Shanghai as a typical rapidly urbanizing area, and based on 595 soil samples from 36 plots, the content of eight heavy metals in soils from five different land uses were analyzed. The ecological risk was evaluated using the Nemerow composite index and the potential ecological risk index. The results showed that the variation coefficients of the heavy metals Zn and Cd were highest, and were notably affected by human activities. The content of heavy metals in industrial land soil was relatively high compared to residential land and cultivated land soils, and heavy metal content was lowest in public management and service land soil. The Nemerow composite index of Zn and Cd was high, corresponding to severe and moderate levels of pollution, respectively. The other heavy metals were found at warning or light levels of pollution. The potential ecological risks posed by heavy metals in the soils from different land uses, in descending order, were heavy-metal-related industry land > non-heavy-metal-related industry land ≈ residential land > cultivated land ≈ public management and service land. Industrial land had a greater risk of heavy metal pollution due to industrial operations, complex historical production, and widely variable levels of management. Heavy metal accumulation also tended to occur in residential land and cultivated land soils. Therefore, the prevention of soil heavy metal pollution in association with different land uses, and the control of associated risks during redevelopment, are key challenges in rapidly urbanizing area.

Key words: rapid urbanization area; heavy metals in soil; land uses; heavy metal related industrial land; ecological risk assessment

土壤是生态环境重要的组成元素,也是人类赖以生存的资源载体,土壤环境质量的优劣与生态系统状态和人群健康息息相关^[1-3]。土地利用方式是人类与自然界之间相互关系的重要投射,随着中国经济的高速发展,城镇化和工业化的规模和速度逐渐增长,土地资源的利用方式随之发生了巨大变化,土地利用类型的差异导致了城市土壤的理化性质出现较为明显的空间异质性^[4-6]。重金属在土壤中的迁移转化和积累量受到土壤性状的影响,对不同土地利用类型下的土壤重金属性状进行研究,能够了解重金属的动态变化以及土地利用方式合理性,同时对土壤退化防治及土地资源的可持续开发利用提供科学依据^[7-9]。近年来,国内外学者针

对农用地^[10,11]、矿区^[12,13]和工业园区^[14,15]等区域的重金属污染特征进行了大量研究,章立佳^[16]和何博等^[17]针对典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征进行了分析,李春芳等^[18]和郭志娟等^[19]更关注人体健康风险方面的探讨,但目前对于典型城市化区域中快速流转的不同用地类型再开发地块土壤重金属风险水平研究却较少。上海地区是我国城市化最为剧烈的地区之一,其快速城市

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-03-12

基金项目: 上海市生态环境局重大科研项目(沪环科[2018]第3号,沪环科[2019]第22号); 上海市科学技术委员会重大项目(17DZ1202200)

作者简介: 李梦婷(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态风险评估, E-mail: lmt46627@163.com

* 通信作者, E-mail: wuj@saes.sh.cn

化进程为不同土地利用类型下的重金属含量分布及生态风险研究提供了良好的素材^[20~22]. 本文以上海市闵行区为例, 聚焦不同土地利用类型地块土壤重金属的污染特征, 分析其潜在生态风险, 以期为城市化区域更为合理的土地利用和管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

闵行区(东经 121°14′~121°34′, 北纬 30°59′~31°15′)地处上海市地域腹部, 属北亚热带湿润气候, 四季分明, 雨水充沛, 日照较丰富, 无霜期长, 是

东亚季风盛行的地区, 区域位置上紧邻中心城区, 是上海市主要对外交通枢纽, 也是重要的装备制造业、信息产品制造业基地, 拥有较为健全的行业门类. 近年来随着城市化进程的加快, 闵行区承载了大量人口和中心城区功能布局优化和产业结构调整过程中外迁的产业, 受到社会经济发展的巨大影响, 同时区域环境也承受着巨大的压力. 本文以该行政区内 5 种不同土地利用类型的 36 个地块为研究对象, 其中涉重工业用地和非涉重工业用地均为 9 块, 各占研究地块总数的 25%, 耕地、住宅用地和公共管理与公共服务用地均为 6 块, 占比 8.3%, 如表 1 所示. 地块位置分布如图 1 所示.

表 1 土地利用类型特征描述

Table 1 Characteristic description of land-use types		
土地利用类型	采样地块(n)	特征描述
涉重工业用地	9	用于以重金属作为原辅材料或产品的工业生产活动的土地, 主要包括表面处理和机械加工等行业
非涉重工业用地	9	用于涉重工业以外的工业生产活动的土地, 主要包括食品制造、橡胶塑料加工和物资仓储等行业
公共管理与公共服务用地	6	用于机关团体、科教文卫和公共设施等的土地
耕地	6	历史上长期用于农作物种植的土地
住宅用地	6	历史上长期用于居民生活居住的宅基地和附属土地

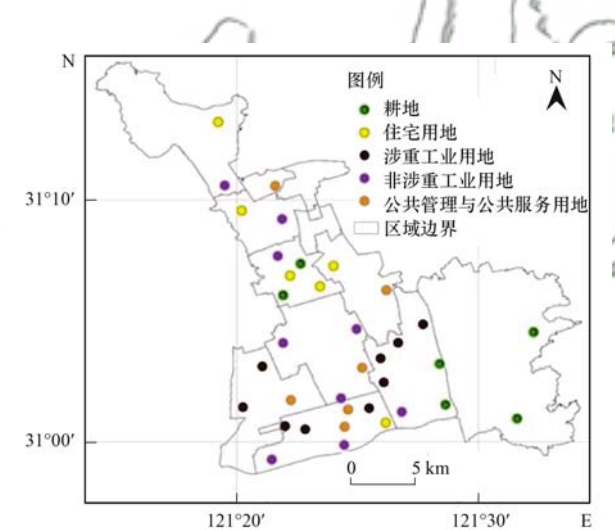


图 1 研究地块位置分布

Fig. 1 Location distribution of research plots

1.2 采样和检测分析

在综合考虑城市用地类型分异的基础上, 采集各布点区域内 0~50 cm 表层土壤, 其中针对涉重及非涉重工业用地, 充分考虑其疑似污染区域分布情况, 针对耕地、住宅用地及公共管理与公共服务用地, 在未识别出明显疑似污染区域情况下, 更多采用系统布点法, 共采集土壤样品 595 个. 采集的土壤样品均在室温避光条件下风干, 适时翻动取出植物残体及碎石等杂物, 研磨过 10 目尼龙筛充分混合, 装袋备用. As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量参照 USEPA 6010C-2007 并采用 USEPA 3051A-2007 沉积物、淤泥、土壤和油类的

微波辅助酸消解法前处理后进入 X-Serie II 型 ICP-MS 质谱仪中进行测定, 实验室检出限分别为 1.00、0.01、0.25、0.10、0.10、2.50 和 0.50 mg·kg⁻¹; Hg 的含量参照 GB/T 17136-1997 并采用硫酸-硝酸-高锰酸钾消解法前处理后采用 AFS-9330 原子荧光测汞仪进行测定, 实验室检出限为 0.001 mg·kg⁻¹. 在测定过程中, 为保证数据的准确性, 质控平行样数量不少于总样品量 10%, 每测试 20 个样品后用重金属标准溶液进行标准曲线的校正, 并做空白对照, 平行样间的相对标准偏差(RSD)小于 5%.

1.3 重金属生态风险评价

1.3.1 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法^[23~25]是在单因子污染指数评价的基础上, 通过对平均值和最大值的归纳处理, 进行综合评价的方法. 采用内梅罗综合污染指数法进行土壤重金属污染的生态评价, 能够全面反映重金属的平均污染水平, 而且还能突出污染程度最严重的重金属元素对环境的有害影响. 综合污染指数 P 的分级标准为: $P \leq 0.7$ 为安全水平; $0.7 < P \leq 1$ 为警戒水平; $1 < P \leq 2$ 为轻度污染水平; $2 < P \leq 3$ 为中度污染水平; $P > 3$ 为重度污染水平. 计算公式如下:

$$\begin{aligned} P_{i\max} &= (c_i/S_i)_{\max} \\ P_{i\text{ave}} &= (c_i/S_i)_{\text{ave}} \\ P_{\text{综}} &= \sqrt{(P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2)/2} \end{aligned}$$

式中, c_i 为污染物 i 的实测含量; S_i 为污染物 i 的评价标准(上海土壤环境元素背景值); P_{imax} 为最大单项污染指数, P_{ivae} 为平均单项污染指数, $P_{综}$ 为内梅罗综合污染指数.

1.3.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法^[26~28]由瑞典科学家 Hakanson 提出, 是一种将污染因子的毒理学效应、环境效应、生态效应联系起来, 采用指数分级法定量评价特定污染物潜在生态危害水平的方法, 具有可比性、等价性的优点. 评价重金属生态风险水平时, 可反映土壤中特定重金属元素的单一影响, 也能反映重金属元素存在的复合影响, 能够更加全面地评价重金属在土壤环境中的污染现状和污染潜势. 潜在生态危害指数计算式为:

$$E_i = T_i \times (C^i/C_i)$$
$$RI = \sum E_i$$

式中, C^i 为 i 元素的实测含量; C_i 为 i 元素的参比值(上海土壤环境元素背景值); E_i 为重金属元素 i 的潜在生态危害系数; T_i 为重金属 i 的毒性响应系数; RI 为潜在生态风险指数. 根据 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数, 各重金属毒性系数分别为 Zn = 1、Ni = Pb = Cu = 5、Cr = 2、Cd = 30、As = 10 和 Hg = 40, 潜在生态危害系数 E_i 与危害指数 RI 的生态危害程度分级的评价标准如表 2 所示.

1.4 数据统计分析

利用 Excel 和 SPSS23.0 软件对闵行区 36 个地块 595 个点位土壤监测数据整理分析, 并对 5 种土地利用类型的土壤重金属污染特征进行对比分析^[29~31], 利用 Origin 2019b 和 ArcGIS 10.6 进行制图.

表 2 土壤重金属潜在生态危害分级标准
Table 2 Hakanson potential ecological risk level of heavy metals in the soil

E_i	RI	生态危害程度
<40	<150	轻微
40~80	150~300	中等
80~160	300~600	强
160~320	≥600	很强
≥320		极强

2 结果与讨论

2.1 重金属含量统计特征分析

在平均值水平上, 8 种重金属含量均小于上海土壤环境元素背景值^[32], 除重金属 Cu 外, 各元素含量最大值均超过上海土壤环境元素背景值, 其中 Cd 最大含量 ($0.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 为背景值的 2.77 倍, Zn 最大含量 ($434.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 为背景值的 5.04 倍, Hg 最大含量 ($0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 为背景值的 2.03 倍, 这与何博等^[17]和李泗清等^[33]关于南方典型城市化区域土壤重金属污染的研究结果相似, 均表现为某些地块中 Cd、Zn 或 Hg 的含量明显超过正常土壤环境状态下的赋存量. 本研究涉及到的地块用地类型除耕地属于农用地外, 其他 4 类均为第二类建设用地, 参照国家土壤环境质量标准^[34, 35], 各地块重金属均未超过规定的风险筛选值和管制值.

变异系数 CV (标准差/平均数) 能够综合反映某重金属元素含量在各采样点中的聚集程度, 可体现人为活动对于重金属污染水平的干扰作用^[36], $CV \leq 0.1$ 时说明变异性弱; $0.1 < CV < 1$, 说明变异性中等; $CV \geq 1$, 说明变异性强. 由表 3 数据可以看出, 8 类重金属元素均属于中等变异程度, Zn 和 Cd 的变异系数相对较高, 说明人为活动对此两类重金属含量分布影响较大.

表 3 土壤重金属含量分布特征 ($n = 595$)

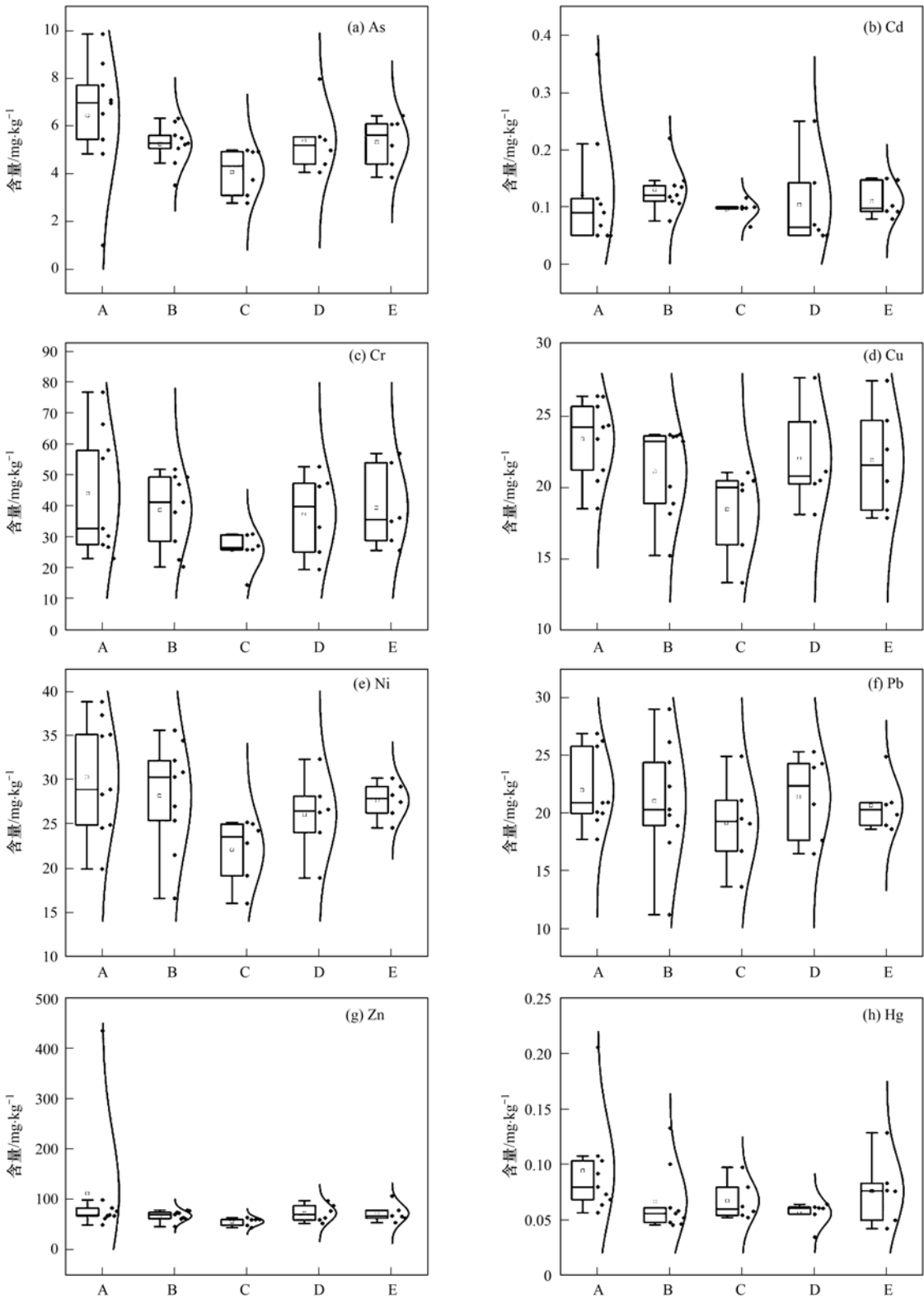
Table 3 Distribution characteristics of soil heavy metal content

重金属元素	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	背景值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率	标准差	变异系数
As	1.00	9.85	5.38	5.25	9.10	0.97	1.65	0.31
Cd	0.05	0.37	0.11	0.10	0.13	0.86	0.06	0.55
Cr	14.29	76.78	37.69	32.81	75.00	1.00	14.55	0.39
Cu	13.36	27.69	21.55	21.09	28.59	1.00	3.37	0.16
Ni	16.00	38.79	27.24	26.80	31.90	1.00	5.53	0.20
Pb	11.14	29.00	20.94	20.49	25.47	1.00	3.77	0.18
Zn	43.02	434.42	77.71	65.93	86.10	1.00	61.93	0.80
Hg	0.03	0.21	0.07	0.06	0.10	1.00	0.03	0.44

2.2 不同用地类型土壤重金属累积特征

不同土地利用类型地块土壤重金属累积特征如图 2 所示, 其中箱型图之外的散点表示各地块土壤重金属的累积含量, 曲线表示其正态分布概率. 从各

重金属含量水平来看, 基本呈现涉重工业用地 > 非涉重工业用地 > 住宅用地 > 耕地 > 公共管理与公共服务用地的趋势. As、Cu、Pb、Cr、Ni、Zn 和 Hg 这 7 种重金属的累积平均值都在涉重工业用地中取得



A. 涉重工业用地, B. 非涉重工业用地, C. 公共管理与公共服务用地, D. 耕地, E. 住宅用地

图 2 不同土地利用类型地块土壤重金属累积特征

Fig. 2 Accumulation characteristics of heavy metals in soil from different land use types

最高值,而 Cd 则在非涉重工业用地中最高; Hg 元素的累积平均值在耕地中取得最低值,其他 7 类元素均在公共管理与公共服务类用地中取得最低值. 比较 5 种用地类型中各地块中的重金属累积最大值,可以发现 Cu 和 Pb 分别在耕地和非涉重工业用

地中最大值相对最高,而其他 6 种元素的最大值均在涉重工业用地中达到最高. 分析其原因,由于人类生产生活中使用到的重金属种类和数量各异,其进入到土壤环境中的风险水平也呈现不同特征,不同土地利用类型之间存在

较大差异. 涉重工业用地主要涉及化学品制造、表面处理和机械加工制作等行业类型, 生产中常涉及 Zn、Cd、Cr、Ni、Hg 和 As 等重金属^[37,38], 不同行业类型可能造成的重金属污染程度各不相同, 但各地块均表现出一种或几种较强的重金属污染^[39,40], 不同地块间离散程度也更大, 如某拉链制造公司地块土壤中 Zn 含量为 $434.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 非涉重工业用地的行业类型主要为食品制造和仓储等, 涉及重金属的使用较少, 但固体废弃物堆放及处置和工业园区废物大气沉降等影响也会带来部分重金属累积^[41], 而造成 Cd 累积平均值最高的原因在于某地块中其中一个采样点 Cd 含量达到 $0.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明该地块可能存在点源污染; 住宅用地主要是以历史上长期以宅基地为主的土地类型, 人类生活中常使用的 Cu、Zn 和 Pb 等重金属长期蓄积, 生产生活中煤的燃烧大气沉降带来 Hg 的累积^[42]; 耕地中污水农灌和化肥等农用物质的不合理施用等带来 Cu、Zn 和 As 等重金属的长期累积^[43,44]; 公共管理与公共服务用地既不涉及工业生产, 也没有农用品投入, 人类活动产生的废弃物也能得到较好管理^[45], 因此整体而言各类重金

属累积值最低.
2.3 重金属污染风险评价

2.3.1 内梅罗综合污染指数法评价

根据内梅罗综合污染指数 $P_{\text{综}}$ 的大小判断闵行区不同土地利用类型重金属的污染水平^[46,47], 根据表 4 可以看出, 涉重工业用地 > 非涉重工业用地 > 住宅用地 > 耕地 > 公共管理与公共服务用地. 其中, 涉重工业用地处于轻度污染水平, 非涉重工业用地、耕地与住宅用地处于警戒水平, 而公共管理与公共服务用地为安全水平. 根据单因子污染指数发现, Cd、Ni 和 Zn 对于各土地利用类型的贡献较为突出, 涉重工业用地的 P_i 指数平均值及极大值 (Zn) 均比其他利用类型高.

结合实际调查情况, 涉重工业用地中以机械制造为主要行业类型的有 6 个地块, 占比 66.7%, 其他 3 个地块分别为化学品制造、拉链制造和纺织, 而 Cd、Ni 和 Zn 常被用作制造合金、金属加工和表面处理的原料, 会对地块和周边区域的土壤造成较大的污染风险, 柳云龙等^[22] 和吴健等^[48] 关于上海市不同区域土壤重金属的内梅罗综合污染评价结果也表明了这一点.

表 4 不同土地利用类型土壤重金属的内梅罗综合污染评价

土地利用类型	单因子污染指数 (P_i)								内梅罗综合污染指数 ($P_{\text{综}}$)
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	
整体	0.59	0.87	0.50	0.75	0.85	0.82	0.90	0.72	0.83
涉重工业用地	0.71	0.93	0.59	0.82	0.95	0.86	1.29	0.93	1.11
非涉重工业用地	0.58	0.98	0.51	0.74	0.88	0.83	0.77	0.66	0.87
公共管理与公共服务用地	0.45	0.73	0.34	0.65	0.69	0.75	0.64	0.66	0.69
耕地	0.59	0.78	0.50	0.77	0.82	0.84	0.84	0.55	0.78
住宅用地	0.59	0.83	0.52	0.77	0.87	0.81	0.83	0.75	0.81

2.3.2 潜在生态危害指数法评价

运用潜在生态危害指数法对重金属元素的风险水平进行评价, 结果如表 5 所示. 根据 E_i 值的大小可以看出, 8 种重金属的生态风险水平由小至大的顺序为: Zn < Cr < Cu < Pb < Ni < As < Cd < Hg, 整体潜在生态风险指数 RI 值为 74.97, 说明其整体表现为轻度潜在生态风险. 5 种土地利用类型中, RI 值从大到小的排列顺序为: 涉重工业用地 > 非涉重工业用地 $\approx$ 住宅用地 > 耕地 $\approx$ 公共管理与公共服务用地, 5 类用地的 RI 值均小于 150, 在轻度风险水平范围内. Cd 元素的 E_i 值在非涉重工业用地中呈现最高值, 而其他重金属元素的 E_i 值都在涉重工业用地中呈现最高值; 除 Hg 在耕地中呈现最小值外, 其他元素的最小值均集中在公共管理与公共服务类用地. 5 类土地利用类型各类元素的 E_i 值均小于 40, 重金属污染物风险水平均为轻微危害. 相较而言,

Hg 和 Cd 两种元素的污染水平较高, 而 Cr 和 Zn 两类元素风险水平由于重金属毒性系数较低而相对轻微, 这与很多关于城市化土壤潜在生态风险评价的研究结果相一致^[15,17,21,26,48].

南方某典型城市化区域的表层土壤 RI 值为 30.21 ~ 661.36^[17], 雄安新区土壤 RI 值为 58.21 ~ 837.53^[19], 西安市城市三环内不同功能区土壤 RI 值为 47.8 ~ 51.2^[36], 山东省莱芜市钢城区土壤 RI 值为 67.49 ~ 11 666.44^[49]. 由此可以看出, 与其他城市化区域相比, 上海市快速城市化区域的土壤重金属潜在生态危害指数位于相对中等的水平^[21]. 涉重工业用地由于行业类别多、历史条件复杂、管理水平差异大等原因具有较大的重金属污染风险, 非涉重工业用地与住宅用地中存在特征重金属导致其潜在生态危害仍不可忽视, 耕地和公共管理与公共服务用地虽然暂未体现出明显的污染迹象, 但土壤

表 5 不同土地利用类型土壤重金属的潜在生态危害指数法评价

Table 5 Hakanson potential ecological risk index of soil heavy metals in soil from different land use types

土地利用类型	潜在生态危害系数(E_i)								RI 值
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	
整体	5.92	26.01	1.00	3.77	4.27	4.11	0.90	28.98	74.97
涉重工业用地	7.08	27.80	1.17	4.09	4.75	4.31	1.29	37.28	87.78
非涉重工业用地	5.75	29.42	1.03	3.70	4.42	4.13	0.77	26.27	75.49
公共管理与公共服务用地	4.47	21.75	0.68	3.23	3.46	3.75	0.64	26.49	64.49
耕地	5.93	23.46	0.99	3.86	4.08	4.20	0.84	22.12	65.47
住宅用地	5.86	25.03	1.05	3.84	4.33	4.05	0.83	29.98	74.96

中重金属累积造成的潜在危害仍需引起高度重视。

3 结论

(1)从重金属含量特征来看,8种重金属含量均值均小于上海土壤环境元素背景值,但Cd、Zn和Hg元素均存在地块的重金属赋存量明显高于背景值.其中,Zn和Cd的变异系数较高,受人为活动影响特征明显。

(2)从不同土地利用类型土壤重金属累积特征来看,涉重工业用地、非涉重工业用地的重金属含量相对较高,住宅用地和耕地虽然整体含量不高但均有其特征重金属,公共管理与公共服务用地重金属含量相对最低。

(3)从生态风险评价结果来看,内梅罗综合污染风险水平表明涉重工业用地处于轻度污染水平,Cd、Ni和Zn的单因子污染风险较高.不同土地利用类型的重金属潜在生态风险可分为3个梯度:涉重工业用地>非涉重工业用地≈住宅用地>耕地≈公共管理与公共服务用地,Hg和Cd重金属的潜在生态风险水平较高.总体评价表明,区域土壤重金属存在轻度潜在生态风险.快速城市化区域土地转性开发频繁,在不同土地利用后续的再开发利用过程中,需进一步加强工业用地等土壤重金属污染的风险管控和修复,以确保土壤安全利用。

参考文献:

[1] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502.
Han C M, Wang L S, Gong Z Q, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1499-1502.

[2] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320, 350.
Zhou J J, Zhou J, Feng R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(3): 315-320, 350.

[3] 串丽敏, 赵同科, 郑怀国, 等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 213-222.
Chuan L M, Zhao T K, Zheng H G, et al. Research advances in remediation of heavy metal contaminated soils[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(S2): 213-222.

[4] Tepanosyan G, Sahakyan L, Belyaeva O, et al. Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 900-909.

[5] Zhao Z, Hazelton P. Evaluation of accumulation and concentration of heavy metals in different urban roadside soil types in Miranda Park, Sydney [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(11): 2548-2556.

[6] Kosheleva N E, Vlasov D V, Korlyakov I D, et al. Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 854-863.

[7] 何如海, 薛中俊, 刘娜, 等. 两种土地利用方式下土壤重金属污染特征与评价[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1858-1864.
He R H, Xue Z J, Liu N, et al. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soil under two land use [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8): 1858-1864.

[8] 李秀霞, 朱伟, 张子豪, 等. 基于信息熵的土壤Cr含量空间分布与土地利用空间相关性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1437-1443.
Li X X, Zhu W, Zhang Z H, et al. Spatial distribution of chromium content in soil and its spatial correlation with land use type based on information entropy[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(11): 1437-1443.

[9] 梁博, 聂晓刚, 杨东升, 等. 西藏尼洋河流域下游5种典型土地利用方式土壤物理性质差异分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 119-128.
Liang B, Nie X G, Yang D S, et al. Differences in soil physical properties of 5 typical land use types in downstream of the Niyang River in Tibet[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2018, 46(1): 119-128.

[10] 甘婷婷, 赵南京, 殷高方, 等. 长江三角洲地区农用地土壤重金属污染状况与防治建议[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 174-184.
Gan T T, Zhao N J, Yin G F, et al. A review on heavy metal pollution of agricultural land soil in the yangtze river delta and relevant pollution control strategy[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 174-184.

[11] 赵佐平, 付静, 岳思羽, 等. 陕南茶园产地环境现状及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1983-1992.

[12] Zhao Z P, Fu J, Yue S Y, et al. Assessing producing environment and potential ecological risk of tea plantation in southern Shaanxi Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(9): 1983-1992.

[12] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(6):

- 3018-3027.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [13] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- Liu W, Yang J J, Wang J, *et al.* Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of East Junggar Basin in Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- [14] 张永慧, 麻冰涓, 张东, 等. 南太行山山前平原工业园区土壤重金属污染特征及来源[J]. *环境化学*, 2017, **36**(8): 1821-1830.
- Zhang Y H, Ma B J, Zhang D, *et al.* Contamination and sources of heavy metals in the soils of industrial cluster in piedmont plain of South Taihang Mountain [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(8): 1821-1830.
- [15] 吕占禄, 张金良, 张晗, 等. 生物质能电厂周边土壤中重金属元素污染特征及评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(12): 3480-3494.
- [16] 章立佳. 上海城市土壤重金属空间变异结构和分布特征[D]. 上海: 上海师范大学, 2011.
- [17] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- He B, Zhao H, Wang T Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- [18] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- Li C F, Cao J F, Lv J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [19] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 431-441.
- Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 431-441.
- [20] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 上海城市用地扩展强度、模式及其空间分异特征[J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(4): 412-422.
- Li X W, Fang J Y, Piao S L. The intensity and modes of urban land use growth in Shanghai [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(4): 412-422.
- [21] 沈城, 刘馥雯, 吴健, 等. 再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5125-5132.
- Shen C, Liu F W, Wu J, *et al.* Distribution and ecological risk of heavy metals in the soil of redevelopment industrial sites [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5125-5132.
- [22] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 599-605.
- Liu Y L, Zhang L J, Han X F, *et al.* Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the urban-transect of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 599-605.
- [23] 杨磊磊, 卢文喜, 黄鹤, 等. 改进内梅罗污染指数法和模糊综合法在水质评价中的应用[J]. *水电能源科学*, 2012, **30**(6): 41-44.
- Yang L L, Lu W X, Huang H, *et al.* Application of improved nemerow pollution exponential method and fuzzy comprehensive evaluation method used in water quality assessment [J]. *Water Resources and Power*, 2012, **30**(6): 41-44.
- [24] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- Wang Y J, Wu T L, Zhou D M, *et al.* Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- [25] 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2304-2312.
- Sun J W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Tracing sources of heavy metals in the soil profiles of drylands by multivariate statistical analysis and lead isotope [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2304-2312.
- [26] 陈江军, 刘波, 蔡烈刚, 等. 基于多种方法的土壤重金属污染风险评价对比——以江汉平原典型场区为例[J]. *水文地质工程地质*, 2018, **45**(6): 164-172.
- Chen J J, Liu B, Cai L G, *et al.* Comparison of risk assessment based on the various methods of heavy metals in soil: a case study for the typical field areas in the Jianghan Plain [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, **45**(6): 164-172.
- [27] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3262-3268.
- Xu Z C, Yang X Y, Wen Y, *et al.* Evaluation of the heavy metals contamination and its potential ecological risk of the sediments in Beijiang River's upper and middle reaches [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3262-3268.
- [28] 赵沁娜, 徐启新, 杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2005, (1): 111-116.
- Zhao Q N, Xu Q X, Yang K. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2005, (1): 111-116.
- [29] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染源解析研究综述[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(1): 232-242.
- Li J, Wu J, Jiang J Y, *et al.* Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(1): 232-242.
- [30] 郭欣, 姚苹, 杜焰玲, 等. 典型土地利用方式下土壤重金属污染物分布特征与源解析——以成都平原干溪河流域为例[J]. *环境工程*, 2019, **37**(1): 1-5.
- Guo X, Yao P, Du Y L, *et al.* Distribution characteristics and source apportionment of heavy metals in soils under typical land use patterns——A case study on the Ganxi River basin of Chengdu Plain [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(1): 1-5.
- [31] Luo X S, Xue Y, Wang Y L, *et al.* Source identification and apportionment of heavy metals in urban soil profiles [J]. *Chemosphere*, 2015, **127**: 152-157.
- [32] 王云, 汪雅谷, 罗海林, 等. 上海市土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [33] 李泗清, 杨满芽. 中山市不同类型企业周边土壤重金属污染特性及潜在生态风险评价[J]. *地球与环境*, 2014, **42**(4):

- 525-531.
- Li S Q, Yang M Y. The features and potential ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of different types of enterprises in Zhongshan municipality [J]. *Earth and Environment*, 2014, **42**(4): 525-531.
- [34] 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].
- [35] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [36] 刘梦梅, 王利军, 王丽, 等. 西安市不同功能区土壤重金属含量及生态健康风险评价[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(1): 167-175.
- Liu M M, Wang L J, Wang L, *et al.* Concentration and ecological health risk assessment of heavy metals of soil in different functional areas in Xi'an, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(1): 167-175.
- [37] 刘永伟, 毛小菱, 孙莉英, 等. 深圳市工业污染源重金属排放特征分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(2): 279-285.
- Liu Y W, Mao X L, Sun L Y, *et al.* Characteristics of heavy metals discharge from industrial pollution sources in Shenzhen [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(2): 279-285.
- [38] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 900-908.
- Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 900-908.
- [39] 蒋煜峰, 胡雪菲, Yves U J, 等. 典型工业区土壤重金属污染特征及生物有效性研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(7): 58-64.
- Jiang Y F, Hu X F, Yves U J, *et al.* Pollution characteristic and bio-availability of heavy metals in soils and plants from a typical industrial district in Lanzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(7): 58-64.
- [40] 姜芝萍, 杨俊衡. 城市重点污染区土壤重金属污染评价标准探讨——以衡阳市某区为例[J]. *安全与环境工程*, 2010, **17**(1): 57-60, 64.
- Jiang Z P, Yang J H. Discussion on heavy metal quality assessment standards of urban pollution soil——Taking Hengyang City for example [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, **17**(1): 57-60, 64.
- [41] 冯乙晴, 刘灵飞, 肖辉林, 等. 深圳市典型工业区土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(6): 1051-1058.
- Feng Y Q, Liu L F, Xiao H L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of typical industrial district of Shenzhen [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, **26**(6): 1051-1058.
- [42] 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 等. 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1667-1678.
- Xu M, Yan Z G, He M M, *et al.* Human health risk-based environmental criteria for soil: A comparative study between countries and implication for China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1667-1678.
- [43] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(10): 1727-1736.
- Fan T, Ye W L, Chen H Y, *et al.* Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, **22**(10): 1727-1736.
- [44] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 692-703.
- Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al.* Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 692-703.
- [45] 姜玉玲, 阮心玲, 杨玲, 等. 开封市城市土壤剖面 Hg、As 和 Sb 分布特征分析[J]. *环境化学*, 2017, **36**(5): 1036-1046.
- Jiang Y L, Ruan X L, Yang L, *et al.* Distribution of Hg, As and Sb concentrations in urban soil profiles of Kaifeng City, Henan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(5): 1036-1046.
- [46] 沈洪艳, 胡小敏. 不同环境介质中污染物生态风险评价方法的国内研究进展[J]. *河北科技大学学报*, 2018, **39**(2): 176-182.
- Shen H Y, Hu X M. Research progress on ecological risk assessment methods of pollutants in different environmental media at domestic [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2018, **39**(2): 176-182.
- [47] 张建东, 范舟, 赖健清, 等. 综合指数质量评价模型在太原市土壤重金属污染评价中的应用[J]. *水土保持研究*, 2007, **14**(4): 240-243.
- Zhang J D, Fan Z, Lai J Q, *et al.* Application of comprehensive index quality evaluation model of soil heavy metal pollution in Taiyuan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, **14**(4): 240-243.
- [48] 吴健, 王敏, 张辉鹏, 等. 复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5620-5627.
- Wu J, Wang M, Zhang H P, *et al.* Heavy metal pollution and potential ecological risk of soil from reclaimed industrial sites and surrounding river sediments [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5620-5627.
- [49] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
- Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i>	(4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i>	(4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i>	(4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i>	(4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i>	(4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i>	(4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i>	(4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i>	(4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i>	(4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i>	(4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi	(4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i>	(4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i>	(4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing	(4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i>	(4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i>	(4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i>	(4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i>	(4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i>	(4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen	(4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai	(4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i>	(4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(Ioid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i>	(4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun	(4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i>	(4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei	(4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i>	(4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i>	(4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i>	(4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i>	(4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i>	(4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i>	(4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e	(4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i>	(4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i>	(4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i>	(4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i>	(4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i>	(4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i>	(4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i>	(4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i>	(4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i>	(5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i>	(5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i>	(5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei	(5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi	(5046)