

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

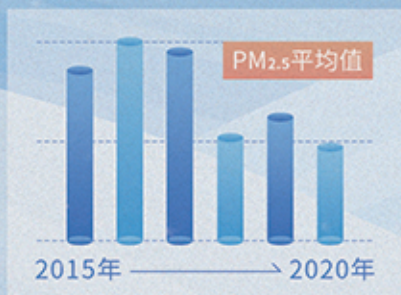
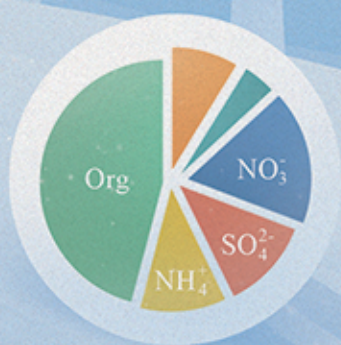
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价

雷晓玲^{1,2}, 邱丽娜^{1*}, 魏泽军^{2*}, 杨程², 何博¹

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆市科学技术研究院, 重庆 401123)

摘要: 生物滞留带作为海绵城市重要的净水和渗水措施,在全国海绵城市建设中得到了广泛的应用. 为了探明生物滞留带重金属累积、污染和可能存在的环境风险,以全国首批海绵城市建设示范区重庆市悦来新城生物滞留带为研究对象,探讨其重金属含量与空间分布特征,利用污染系数、地质累积指数和潜在生态风险指数进行污染水平和生态环境风险评价. 结果表明,悦来新城生物滞留带中除 Mn 外, Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cd 的含量平均值均超出重庆市土壤背景值的 4.14、1.77、4.98、1.23 和 6.51 倍. 空间分布上,不同功能区域道路旁的生物滞留带重金属含量呈现出较大差异性,工业区道路生物滞留带中 Cu、Zn、Mn、Pb、Ni 和 Cd 的含量均显著高于其他区域生物滞留带中的同种类重金属含量 ($P < 0.05$). 污染系数和地质累积指数显示重金属的污染水平排序为: $Mn < Zn < Ni < Cu < Pb < Cd$, 其中 Cu 和 Pb 为高度污染, Cd 为重度污染,且 Cd 的单个潜在生态危害系数为 194.13,处于高度风险,其余重金属均为轻微风险, Cd 对综合生态危害指数的污染贡献率为 78.73%,其为重金属潜在风险的主要来源. 海绵城市生物滞留带长期运行后,因填料内重金属的积累,后期存在一定环境生态风险,需加强运行管理,开展生物滞留设施填料无害化治理研究,防止其成为新型的城市重金属污染源.

关键词: 海绵城市; 生物滞留带; 重金属污染; 地质累积指数 (I_{geo}); 潜在生态风险指数 (PERC)

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4127-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202110201

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities

LEI Xiao-ling^{1,2}, QIU Li-na^{1*}, WEI Ze-jun^{2*}, YANG Cheng², HE Bo¹

(1. Hehai College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Institute of Science and Technology, Chongqing 401123, China)

Abstract: As an important water purification and seepage measure for sponge cities, biofiltration systems have been widely used in their construction in China. In order to identify the heavy metal accumulation, pollution, and its potential environmental risk in the biofiltration systems, this study examined the heavy metal contents and spatial distribution characteristics by taking the biofiltration systems of Yue Lai new town, Chongqing, the first demonstration area of sponge city construction in China, as the research object, and conducted a risk evaluation of the pollution level and ecological environment in this new town using the contamination factor (CF), geo-accumulation Index (I_{geo}), and potential ecological risk coefficient (PERC). The results showed that, except for Mn, the average contents of Cu, Zn, Pb, Ni, and Cd in the biofiltration systems of Yue Lai new town were 4.14, 1.77, 4.98, 1.23, and 6.51 times higher than the soil background values of Chongqing. In terms of spatial distribution, the contents of heavy metals in biofiltration systems along the roads in different functional areas showed great differences. The contents of Cu, Zn, Mn, Pb, Ni, and Cd in the industrial area were significantly higher than those of the same types of heavy metals in the biofiltration systems in other areas ($P < 0.05$). The CF and I_{geo} showed that the pollution level of heavy metals was ranked as follows: $Mn < Zn < Ni < Cu < Pb < Cd$. Among them, Cu and Pb were highly polluted, Cd was severely polluted, and the PERC of Cd was 194.13, which indicated a high risk; the remaining heavy metals were at a minor risk. The pollution contribution of Cd to the composite PERC of all heavy metals was 78.73%, which was the major source of heavy metal potential risk. After the long-term operation of the biofiltration systems in a sponge city, certain environmental and ecological risks may exist later due to the accumulation of filler heavy metals. Hence, it is necessary to strengthen the operation management and carry out research on the non-polluted management of the filler of biofiltration facilities, to prevent them from becoming a new source of urban heavy metal pollution.

Key words: sponge city; biofiltration systems; heavy metal pollution; geo-accumulation index (I_{geo}); potential ecological risk coefficient (PERC)

生物滞留带是海绵城市建设中应用最为广泛和有效的低影响开发技术之一,对道路径流中重金属污染物有着较好的去除效果^[1,2]. Søbørg 等^[3]的研究表明生物滞留带对重金属的去除效果高于 80%~90%; 郭娉婷等^[4]的研究结果显示不同介质类型生物滞留带对 Cu、Zn 和 Pb 的去除率均大于 92.90%, Cd 的去除率为 77.20%; 钱佳欢等^[5]模拟生物滞留带设施对径流中 Cu、Zn 和 Pb 的去除率分别为 70.90%~98.10%、77.60%~98.50% 和 71.70%~98.60%. 生物滞留设施去除重金属的机制主要依靠介质截留、填料吸附和植物吸收^[6,7],随着运行时间的延长,截留的污染物逐渐堵塞填料介质通道,填料

吸附位点饱和,生物滞留设施对重金属去除效能降低,甚至出现浸出及淋失现象,成为城市水系污染的污染源,构成潜在的环境风险^[8]. Kluge 等^[9]的研究结果显示德国不同城市的生物滞留系统中重金属在 0~20 cm 填料介质处发生累积. Al-Ameri 等^[10]的研究结果显示在澳大利亚的城市生物滞留中 Zn 在 0~10 cm 填料介质处含量超过限制背景值造成一定

收稿日期: 2021-10-26; 修订日期: 2022-01-04

基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目 (cstc2018jszx-zdyfxmX0010); 重庆市技术预见与制度创新项目 (cstc2017jsyj-zdcx BX0065); 重庆市社会民生科技创新专项项目 (cstc2016shmszx30024)

作者简介: 雷晓玲 (1967~), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为环境科学与海绵城市, E-mail: 1362002949@qq.com

* 通信作者, E-mail: 124453157@qq.com; 598535397@qq.com

生态风险. 目前,国内学者重点关注提升生物滞留系统对重金属污染物的去除效果^[11,12],关注生物滞留系统内部重金属累积及风险评价等方面鲜见报道.

重庆悦来新城于 2015 年 4 月成为国家首批海绵城市试点,本次研究区域生物滞留带于 2016 ~ 2017 年建成运行,最长至今已投入运行 5 a,是国内较早大规模投入实际使用的生物滞留设施,具有较好的代表性. 作为典型山地城市和工业城市,径流冲刷作用明显,道路径流中重金属污染物浓度较高,生物滞留带为道路径流污染控制的主要措施,可能存在着重金属累积污染的潜在风险. 本研究以生物滞留带重金属累积情况和生态风险为关注重点,对研究区域内工业区、住宅区、商业行政区和修筑区的主干道以及次级干道所处生物滞留带取样检测,分析 Cu、Zn、Mn、Pb、Ni 和 Cd 这 6 种重金属污染物的含量和空间分布特征,并使用污染系数、地质累积指数和潜在生态风险指数等评价方法进行污染水平和生态风险的综合评价,以掌握生物滞留带重金属积累、污染及潜在生态风险情况,以期控制生物滞留系统重金属二次污染,保持系统的可持续使用及科学的运维管理提供基础和依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样点确定

悦来新城位于重庆市渝北区,是全国第一批 16 个海绵城市试点地区之一,同时也是重庆“1+3”海绵城市建设试点的核心区域,占地面积为 18.67 km². 介于东经 106°27'30" ~ 106°57'58"、北纬 29°34'45" ~ 30°07'22"之间,属亚热带季风性湿润气候,海拔高程在 172 ~ 359 m,年降雨量为 1 200 ~ 1 300 mm. 根据研究区域生物滞留带所在道路的不同功能区划分,分为工业区、住宅区、商业行政区和修筑区的主干道以及次级干道 5 个采样路段,共计 153 个采样点(图 1),其中工业区 31 个、住宅区 30 个、商业行政区 31 个、修筑区 30 个和次级干道 31 个.

1.2 样品采集与分析

2020 年 6 月开始采集生物滞留带 0 ~ 10 cm 深处种植土层样品,采样点按梅花形布点法进行采样,均匀混合后装袋,除去碎石、树叶残渣等杂物,待自然风干后用碾钵研磨,过 20 目孔径筛,使用聚乙烯瓶封装,备用. 重金属采用 HCl-HNO₃-HClO₄ 电热板消解法-原子吸收仪器测定:用 HCl-HNO₃-HClO₄ 消解样品,采用原子吸收光谱仪(PinAAcle,新加坡 Perkin Elmer)测定 Cu、Zn、Mn、Pb、Ni 和 Cd 的含量. 以国家土壤标准物质(GSS-14)和平行样进行质

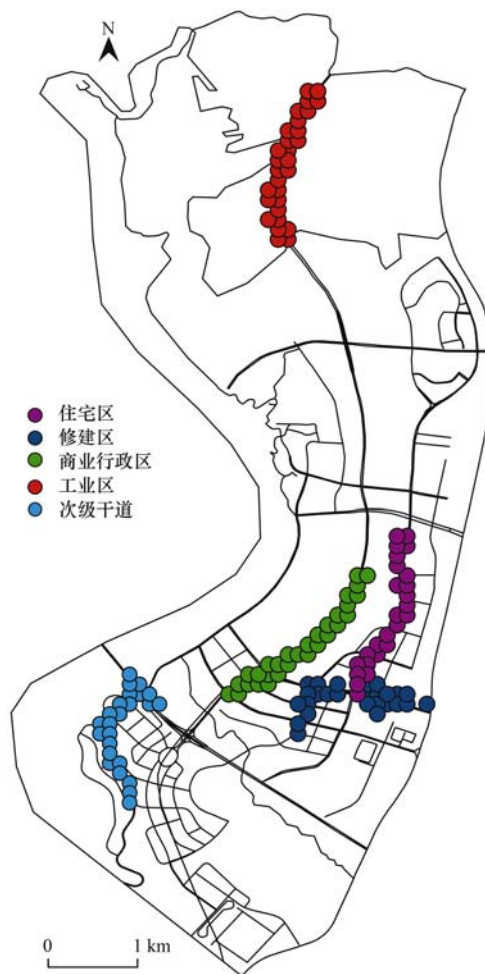


图 1 研究区域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in study area

量控制,样品的相对偏差 ≤ 8%,加标回收率为 95% ~ 105%,均符合检测质量控制要求.

1.3 污染系数

污染系数(contamination factor, CF)是用于评估土壤重金属水平的一种无量纲系数^[13,14],计算见式(1).

$$CF = C_s / C_{\text{RefS}} \quad (1)$$

式中,CF 为污染系数; C_s 为重金属污染物实测值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_{RefS} 为重金属污染物背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). CF 将污染程度分为 4 级,当 $CF < 1$,轻度污染; $1 \leq CF < 3$,中度污染; $3 \leq CF < 6$,高度污染; $CF \geq 6$,重度污染^[15,16].

1.4 污染负荷指数

污染负荷指数(pollution loading index, PLI)为元素污染系数乘积的 n 次方根,能评价研究区域内重金属污染程度的整体水平^[13,17,18]. 计算见式(2).

$$PLI = (CF_{S,1} \times CF_{S,2} \times \cdots \times CF_{S,n})^{1/n} \quad (2)$$

式中,PLI 为污染负荷指数; $CF_{S,1}, CF_{S,2}, \cdots, CF_{S,n}$ 为被检测重金属元素污染系数; 1, 2, ..., n 为被检测重金属数量. 当 $PLI > 1$ 表明研究区域存在污染.

1.5 地质累积指数

地质累积指数 (geo-accumulation index, I_{geo}) 是由德国科学家 Muller 提出用于研究重金属污染程度的定量指标^[16,19,20], 地质累积指数不仅能反映重金属分布变化特征, 而且能判断人为活动对环境的影响, 是区分人为活动影响的重要参数, 计算见式 (3)。

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_s / 1.5 C_{\text{RefS}}) \quad (3)$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数。其分级标准为: $I_{\text{geo}} \leq 0$, 无污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$, 轻-中度污染; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$, 中度污染; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$, 中-强度污染; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$, 强度污染; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$, 强-极强度污染; $I_{\text{geo}} > 5$, 极强度污染。

1.6 潜在生态危害指数法

瑞典科学家 Hakanson 提出潜在生态危害指数法, 它可将污染物含量、毒理学及环境敏感性等多种因素综合考虑, 预测重金属生态污染危害水平^[21,22]。计算单个污染物生态危害系数 E_i^i 和综合生态危害指数 RI 分别见式 (4) 和式 (5)。

$$E_i^i = T_r^i \times C_i^i = T_r^i \times (C_i / C_n^i) \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i \quad (5)$$

式中, C_i^i 为某重金属污染值, C_i 为重金属实际测量值, C_n^i 为重金属元素背景值 (Pb、Cu、Ni、Zn、Mn 和 Cd 的重庆市土壤背景值^[23] 分别为 26.00、26.00、32.00、80.00、615.00 和 0.11 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); T_r^i 为某一污染物毒性系数 (Pb、Cu、Ni、Zn、Mn 和 Cd 的毒性系数分别为 5、5、5、1、1 和 30); E_i^i 为单个污染物生态危害系数, RI 表示综合生态危害指数。 E_i^i 评价等级分为: $E_i^i \leq 40$, 轻微生态风险; $40 < E_i^i \leq 80$, 中等生态风险; $80 < E_i^i \leq 160$, 较强生态风险; $160 < E_i^i \leq 320$, 强生态风险; $E_i^i > 320$, 极强生态风险。 RI 评价等级分为: $RI \leq 150$, 低生态风险; $150 < RI \leq 300$, 中等生态风险; $300 < RI \leq 600$, 高生态风险; $RI > 600$, 极高生态风险。

1.7 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2019 和 IBM SPSS 21.0 软件进行重金属污染含量的统计与相关性分析, 采用 Origin 2021 进行图、表的绘制和主成分分析, 采用 ArcGis 10.2 绘制重金属空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 生物滞留带重金属含量

悦来新城生物滞留带中重金属 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 19.88 ~ 281.33、67.86 ~ 260.93、99.38 ~ 299.18、

28.45 ~ 310.67、24.08 ~ 58.58 和 0.23 ~ 1.92 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1), 平均值分别为 107.71、31.46、205.66、129.40、39.16 和 0.71 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Cd、Pb 和 Cu 含量平均值是重庆市土壤背景值的 6.51、4.98 和 4.14 倍, 超过背景值的超标率分别为 100%、100% 和 96.73%。Cd、Pb 和 Cu 这 3 种重金属累积含量相对较高, 相比之下 Zn、Mn 和 Ni 累积含量较小。悦来新城生物滞留带种植土重金属含量平均值与国家土壤环境质量 II 级标准值 (维持人体健康限制值) 相比, 除 Mn 外, Cu 和 Cd 均超过土壤 II 级标准值, Zn、Pb 和 Ni 部分采样点超标, 超标率分别为 0.65%、1.31% 和 6.54%。本研究所取样品为道路生物滞留带种植土层, 其进水主要来源是道路径流, 有研究者对国内部分城市道路径流重金属污染浓度进行检测, 在西安雨水径流中含有 Zn、Mn 和 Pb 等重金属, 其浓度分别为 137.92、96.54 和 6.31 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 与地表水环境质量标准相比均有超标现象^[24]; 长江下游某居民区内径流中 Zn、Cu、Pb 和 Cd 均长期超过各自水质基准^[25]; 乌鲁木齐市道路雨水径流中 $\rho(\text{Zn})$ 、 $\rho(\text{Cu})$ 、 $\rho(\text{Pb})$ 和 $\rho(\text{Cd})$ 为 646.00、223.63、85.33 和 1.67 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 重金属污染情况较为明显^[26]。有研究表明, 道路雨水径流的重金属污染较为严重, 常以颗粒态存在或被悬浮物所吸附。生物滞留带对径流中重金属的去除主要通过填料基质的截留与吸附、植物吸收以及离子或有机物形成化合物和络合物等形式^[27]。植物吸收是被截留下来的重金属在基质迁移去除的主要途径, 但是植物对重金属的吸收含量本身较低, 外加对生物滞留带枯萎植物的清理、更新不及时等不规范管理, 较大可能会导致重金属在生物滞留设施内累积。从本研究取样检测情况看, 运行 5 a 的生物滞留带种植土层 (种植土层一般为原位本地土壤) 重金属与原生土壤重金属背景值相比有显著增加, 特别是 Cd 元素, 鲍丽然等^[28] 对重庆渝西经济区 0 ~ 20 cm 表层土壤背景值研究结果显示, 测得 Cd 元素的背景值为 0.221 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本次生物滞留带基质是其含量的 3.2 倍。由此可见, 大量携带着重金属颗粒的雨水径流进入生物滞留带, 超过其自净能力, 则会造成重金属累积, 演变为潜在环境危害。

2.2 生物滞留带重金属空间分布特征

将悦来新城生物滞留带重金属含量通过反距离插值法制作其空间分布 (图 2), 重金属污染物呈现出北高南低的区域性分布规律。悦来新城生物滞留带 Cu、Pb 和 Cd 含量高值的区域均为工业区, Zn 和 Mn 含量高值集中在商业行政区和工业区, 但整体含

表 1 重庆悦来新城生物滞留带重金属含量特征描述

Table 1 Concentrations of heavy metals in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

污染物	最大值 /mg·kg ⁻¹	最小值 /mg·kg ⁻¹	中值 /mg·kg ⁻¹	平均值 ± 标准差 /mg·kg ⁻¹	样品超标率 /%	土壤背景值 /mg·kg ⁻¹
Cu	281.33	19.88	91.75	107.71 ± 57.85	96.08	26.00
Zn	260.93	67.86	138.36	141.56 ± 31.40	96.73	80.00
Mn	299.18	99.38	203.28	205.66 ± 42.05	0.00	615.00
Pb	310.67	28.45	112.57	129.40 ± 65.22	100.00	26.00
Ni	58.58	24.08	38.80	39.24 ± 7.25	81.70	32.00
Cd	1.92	0.23	0.77	0.72 ± 0.42	100	0.11

量均未超过重庆市土壤背景值. Ni 整体含量在所有区域含量均较低,较高值出现在工业区. 工业区重金属污染物含量平均值显著高于其他区域 ($P < 0.05$),次级干道重金属污染物含量平均值显著低于其他区域 ($P < 0.05$). 在悦来新城生物滞留带中 Cu、Zn、Mn、Pb、Ni 和 Cd 在北部污染物含量较高, Cu、Pb 和 Cd 呈现出有富集趋势,表明重金属累积情况与人类活动和城市规划建设有着较大关联^[29]. 工业区、住宅区、商业行政区和修筑区的主干道以及次级干道的生物滞留带在相同雨量情况下其单位面积汇入径流量为: 工业区 = 商业行政区 > 次级干道 > 住宅区 > 修筑区. 工业区主干道生物滞留带中重金属含量高于其他区域的原因可能主要有两点: 一是单位面积汇入径流量较大,二是其区域内道路径流中重金属浓度可能较高.

2.3 生物滞留带重金属污染评价

悦来新城生物滞留带重金属污染情况采用地质累积指数和污染系数进行评价. 从 I_{geo} 平均值来看 (图 3), Zn、Mn 和 Ni 的 I_{geo} 分别为 -1.97、-2.20 和 -0.30 均小于 0,表明其受人类活动影响较小; Cu 和 Pb 的 I_{geo} 分别为 1.25、1.54,表现为中度污染; Cd 的 I_{geo} 为 5.79 为极强度污染. Cd、Cu 和 Pb 有着较高的 I_{geo} ,表明其污染程度极大可能受到人类活动的影响. CF 评价结果显示 (图 4), Zn、Mn、Ni、Cu、Pb 和 Cd 的 CF 平均值分别为 0.39、0.33、1.28、4.14、4.98 和 6.47, Zn 和 Mn 为轻度污染; Ni 为中度污染; Cu 和 Pb 为高度污染; Cd 为重度污染. CF 和 I_{geo} 的重金属污染水平评价有着相近的结果,其对重金属的污染水平排序均为: Mn < Zn < Ni < Cu < Pb < Cd. PLI 评价结果分布显示 (图 5), 工业区、住宅区、商业行政区、修筑区和次级干道采样路段生物滞留带的 PLI 平均值分别为 2.21、1.55、1.77、1.35 和 1.07,值得一提的是,PLI 的高值主要集中在工业区,商业行政区的 PLI 也整体较高,次级干道各采样点中有 41.94% 的采样点的 PLI 小于 1,与其他区域采样点的 PLI 相比较低. 结果表明采样路段中人类活动频繁、工商业发展较高的区域 PLI

较高,存在污染负荷较高的情况,需要引起关注.

同时,悦来新城生物滞留带中重金属 E_r^i 平均值排序为: Mn < Zn < Ni < Cu < Pb < Cd, Zn、Mn 和 Ni 的 E_r^i 均小于 40,生态危害等级为轻微 (图 6); Cu 和 Pb 在采样点中有 93.00% 和 85.00% 的点位于生态危害轻微, 7.00% 和 15.00% 的点位于生态危害中等; Cd 分别有 5.00%、12.00%、27.00%、43.00% 和 13.00% 的点位于生态危害轻微、中等、较强、强和极强水平,可以看出生物滞留带中 Cd 的生态危害较为严重. 悦来新城生物滞留带 RI 变化范围为 612.50 ~ 35.57 (图 7), 采样点中有 25.49% 属于低生态风险, 46.41% 属于中等生态风险, 26.80% 属于高生态风险,还有 1.31% 属于极高生态风险. Cu、Zn、Mn、Pb、Ni 和 Cd 对 RI 的贡献率分别为 8.40%、0.16、0.14%、10.09%、2.48% 和 78.73%, Cd 的贡献率最大. Cd、Pb 和 Cu 有着较高的 CF 和 I_{geo} ,这与城市建设和工业发展程度密不可分. 悦来新城每年工业产值持续增长,工业生产过程中释放的废气、废渣和重金属粉尘通过不同形式进入周围环境,雨后随径流进入生物滞留带,产生累积. 有研究结果显示,安徽^[30] 和北京^[31] 的工业园区内土壤或粉尘中重金属含量超标,存在较高的生态污染风险. 相关数据表明,重庆机动车数量逐年增长,2020 年重庆的汽车保有量仅次于北京和成都达到 465 万辆. 机动车用油中防爆剂 $C_8H_{20}Pb$,燃烧后排放尾气中含铅及其化合物,机动车含铅汽油的燃烧对城市大气铅污染的贡献率可达到 60% 以上^[32],同时车胎、刹车片等零部件的磨损颗粒中也会产生 Cd、Cu 和 Pd 等污染物^[33~36]. 悦来新城生物滞留带系统中重金属潜在风险程度整体处于中等, Cd 是引起重金属污染水平较高的主要原因,这类背景值含量较低,毒性系数较高的低浓度重金属污染物有着对潜在生态风险较高的贡献率^[37,38],在重金属防控中需要引起重视. 目前,生物滞留带填料介质的研究着重于其对污染物的去除效果^[39,40],对后期废弃填料的处理少有涉及,受重金属污染的填料如果处理不当会给周围环境和土壤带来一定程度的危害,对于如何科学合理处

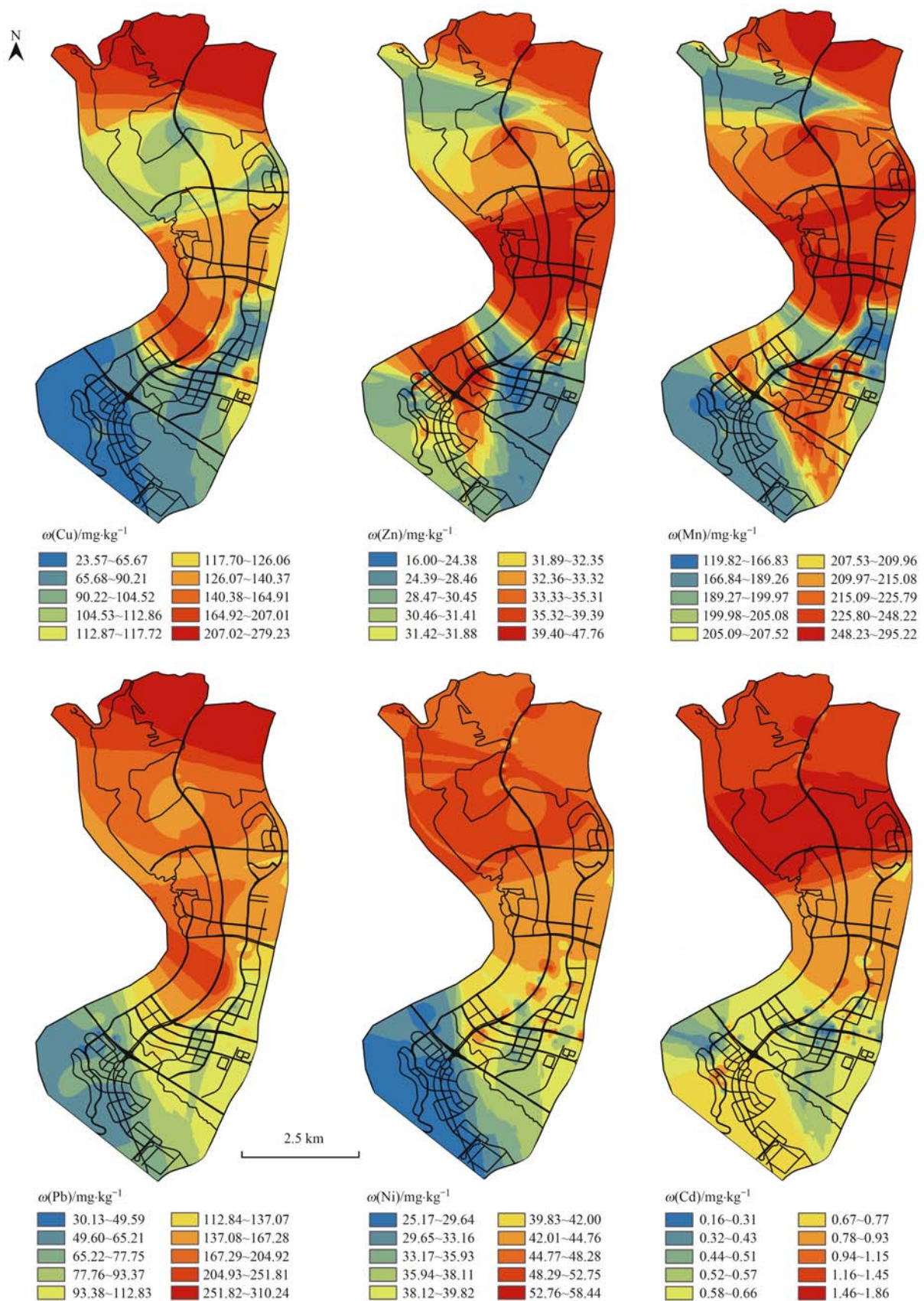


图2 重庆市悦来新城生物滞留带重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of heavy metals in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

理受污染的填料还需要进一步研究.

2.4 生物滞留带重金属来源分析

相关性分析可以显示出不同重金属元素间的相

关性,其有利于推断生物滞留带填料介质中重金属的可能来源^[41]. 对生物滞留带重金属进行 Pearson 分析,结果显示(表2). Cu-Pb、Cu-Cd、Zn-Pb 和 Pb-

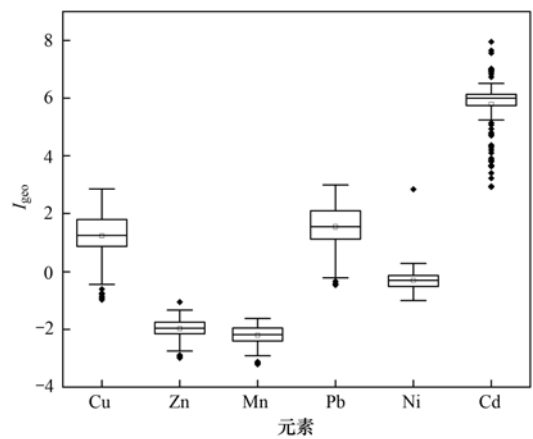


图3 重庆市悦来新城生物滞留带 I_{geo}

Fig. 3 The I_{geo} in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

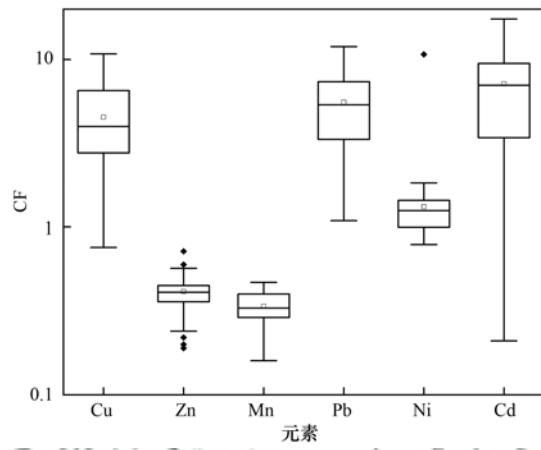


图4 重庆市悦来新城生物滞留带 CF

Fig. 4 CF in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

Cd 相关系数(r) 分别为 0.852、0.425、0.339 和 0.577,均为显著相关($P < 0.01$)且相关系数较高.根据相关性等级划分,Cu-Pb($r > 0.6$)表现为极强相关性,Cu-Cd、Zn-Pb 和 Pb-Cd($0.3 < r \leq 0.6$)表现为高相关性,推测其为同一污染源的可能性较高.

表2 重庆市悦来新城生物滞留带重金属相关性系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient of heavy metals in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

	Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd
Cu	1					
Zn	0.218 **	1				
Mn	0.103	0.227 *	1			
Pb	0.852 **	0.339 **	0.145	1		
Ni	0.234	0.206 *	0.318 *	0.266	1	
Cd	0.425 **	0.239 *	0.085	0.577 **	0.112	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

悦来新城生物滞留带主成分分析(PCA)结果中(表3),提取出特征值大于1的2个主成分,累积贡献率为61.58%(>60%),能代表污染物绝大部分信息.第一主成分和第二主成分的特征值和贡献率分别为2.807、1.667和46.79%、

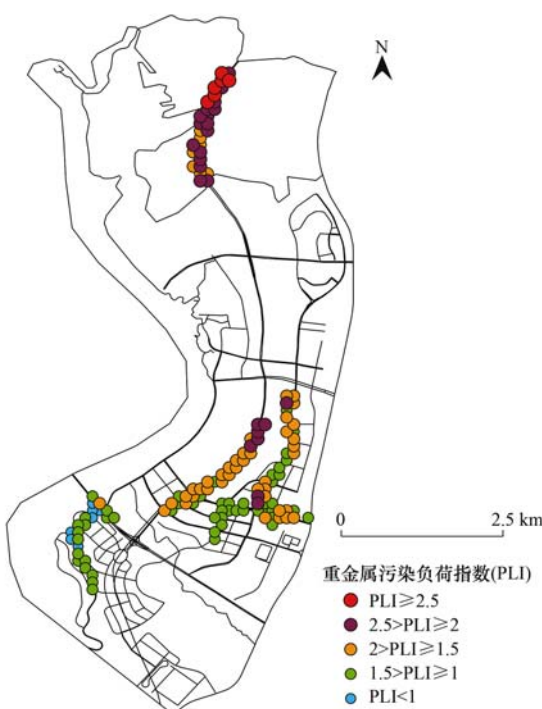


图5 重庆市悦来新城生物滞留带 PLI 分布

Fig. 5 Spatial distribution of the PLI in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

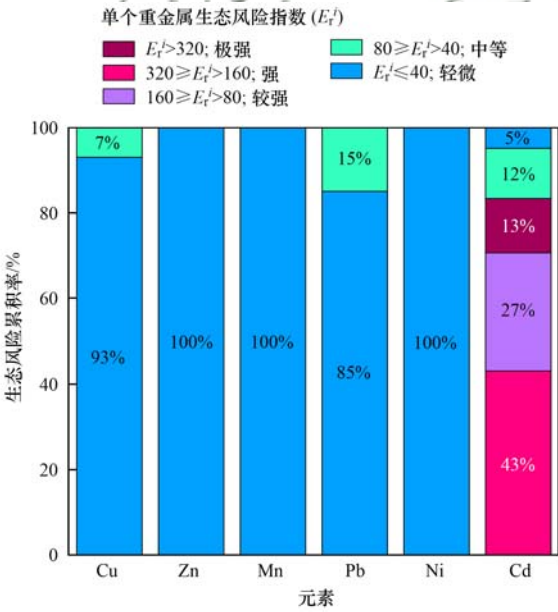


图6 重庆市悦来新城生物滞留带单个重金属生态风险累积率

Fig. 6 Cumulative percentage of E_i in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

14.79%,第一主成分中Cu、Zn、Mn、Pb、Ni和Cd因子荷载分别为0.509、0.392、0.310、0.547、0.314和0.401,第二主成分中Ni、Zn和Mn因子荷载为0.481、0.424和0.327.值得注意的是,Ni、Zn和Mn在第一主成分和第二主成分中均占有一定荷载,第二主成分荷载高于第一主成分,表明其可能来自不同两种来源.

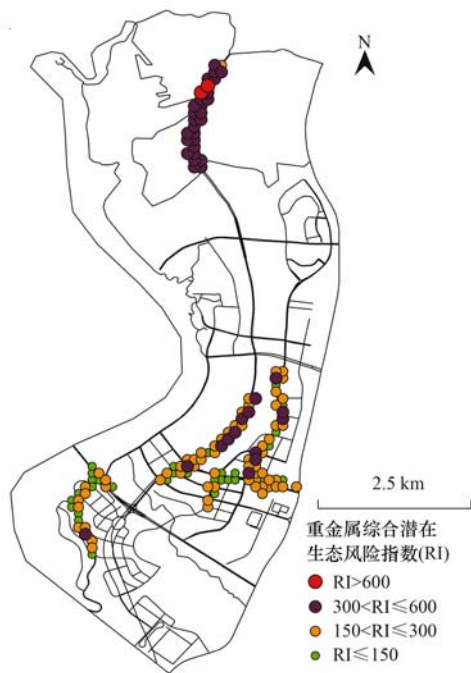


图7 重庆市悦来新城生物滞留带 RI 分布
Fig. 7 Spatial distribution of the RI in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

表3 重庆市悦来新城生物滞留带重金属主成分分析
Table 3 PCA of heavy metals in biofiltration systems of Yuelai new city, Chongqing

污染物	因子荷载	
	PC1	PC2
Cu	0.509	-0.198
Zn	0.392	0.424
Mn	0.310	0.327
Pb	0.547	-0.121
Ni	0.314	0.481
Cd	0.401	-0.285
特征值	2.807	1.667
累积贡献率/%	46.79	61.58

结合生物滞留带重金属含量分析和污染分析结果来看,Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cd 均超过重庆市土壤背景值,其中 Cd、Cu 和 Pb 变异系数较大,表明重金属含量在空间分布中存在较大不均匀性,人类活动对其产生了较大的影响.从 PLI 分布情况可以看出,工业发展和人类活动频繁的街区其生物滞留带的 PLI 较大,表明其生物滞留带有着较高的重金属污染负荷.第一主成分中,Pb、Cu、Cd 和 Zn 是交通污染的典型产物,轮胎以及汽车零部件磨损过程中会造成重金属 Pb、Cu 和 Cd 的释放^[42,43],工业区周边有铸造、机械加工、建筑材料等企业,工业生产过程会释放重金属进入周围环境,雨后淋洗作用下融入道路径流,进入生物滞留带.第一主成分中重金属来源主要为道路径流中的重金属污染物,因此推测其为径流污染源.悦来新城生物滞留带种植土大多为原

位土壤,类型多为黄壤,其含有丰富的矿物质如 Zn、Ni 和 Mn 等.有研究表明 Mn 和 Ni 含量主要受成土母质的影响^[44,45],且 Zn、Ni 和 Mn 具有显著正相关($P<0.05$),其来源相似性较高,推测第二主成分为成土母质影响的自然源.由于 Ni、Zn 和 Mn 在第一主成分和第二主成分中均占有一定比例荷载,可能来自不同两种来源,所以推测三者同时受到了自然源和径流源共同影响,推测其属于混合型污染源.

3 结论

以全国首批海绵城市建设示范区域重庆市悦来新城片区的工业区、住宅区、商业行政区和修筑区的主干道以及次级干道运行 5 a 的生物滞留带为对象,研究重金属含量累积情况和分布特征,采用污染系数、地质累积指数、潜在生态风险指数等评价方法对生物滞留带进行污染及生态风险评价.结果显示,生物滞留带中的 Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cd 的平均值分别超出重庆市土壤背景值的 4.14、1.77、4.98、1.23 和 6.51 倍,存在不同程度累积,其中 Cu、Pb 和 Cd 较为严重.重金属空间分布上表现出较明显差异,呈现出重金属浓度北高南低的区域性分布规律,工业区重金属含量显著高于其他区域($P<0.05$).由污染系数和地质累积指数显示 Cu、Pb 为高度污染,Cb 为重度污染.单个潜在生态危害系数中 Cd 为 194.13,处于高度风险,其余重金属均为轻微风险,且 Cd 对综合生态危害指数的污染贡献率为 78.73%,由此可见 Cd 为重金属潜在风险的主要来源.污染物相关性分析与主成分分析显示,Pb、Cu、Cd 和 Zn 属于径流源,Ni、Zn 和 Mn 属于混合源.生物滞留带重金属污染物表现出一定程度富集污染和潜在环境风险,需要引起关注.

参考文献:

[1] Ruan T S, Li J K, Li Y J, *et al.* Adsorption characteristics of amended bioretention fillers on heavy metals[J]. Desalination and Water Treatment, 2019, **140**: 259-267.
[2] Søbørg L C, Winston R, Viklander M, *et al.* Dissolved metal adsorption capacities and fractionation in filter materials for use in stormwater bioretention facilities[J]. Water Research X, 2019, **4**, doi: 10.1016/j.wroa.2019.100032.
[3] Søbørg L C, Viklander M, Blecken G T. Do salt and low temperature impair metal treatment in stormwater bioretention cells with or without a submerged zone? [J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 1588-1599.
[4] 郭娉婷,王建龙,杨丽琼,等.生物滞留介质类型对径流雨水净化效果的影响[J].环境科学与技术,2016, **39**(3): 60-67.
Guo P T, Wang J L, Yang L Q, *et al.* Effect of bioretention media on pollutions removal from stormwater runoff [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(3): 60-67.
[5] 钱佳欢,滕俊伟,张海平.生物滞留设施去除模拟道路径流

- 中典型重金属的中试[J]. 净水技术, 2016, **35**(1): 88-91.
- Qian J H, Teng J W, Zhang H P. Pilot test of removal of typical heavy metals in simulated road runoff by bioretention facilities [J]. Water Purification Technology, 2016, **35**(1): 88-91.
- [6] 杜晓丽, 韩强, 于振亚, 等. 海绵城市建设中生物滞留设施应用的若干问题分析[J]. 给水排水, 2017, **43**(1): 54-58.
- Du X L, Han Q, Yu Z Y, *et al.* Some issues of the bioretention application in sponge city construction[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, **43**(1): 54-58.
- [7] 刘雨童, 李田, 彭航宇. 生物滞留设施去除城市道路径流中邻苯二甲酸酯的效果评估[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(7): 2568-2574.
- Liu Y T, Li T, Peng H Y. Removal efficiency of phthalates in urban highway runoff in Shanghai by a bioretention system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(7): 2568-2574.
- [8] Hermawan A A, Chang J W, Pasbakhsh P, *et al.* Halloysite nanotubes as a fine grained material for heavy metal ions removal in tropical biofiltration systems [J]. Applied Clay Science, 2018, **160**: 106-115.
- [9] Kluge B, Markert A, Facklam M, *et al.* Metal accumulation and hydraulic performance of bioretention systems after long-term operation[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, **18**(2): 431-441.
- [10] Al-Ameri M, Hatt B, Le Coustumer S, *et al.* Accumulation of heavy metals in stormwater bioretention media: a field study of temporal and spatial variation[J]. Journal of Hydrology, 2018, **567**: 721-731.
- [11] 朱英杰, 杜晓丽, 于振亚, 等. 道路雨水径流溶解性有机物对生物滞留系统重金属截留过程的影响[J]. 环境化学, 2019, **38**(1): 51-58.
- Zhu Y J, Du X L, Yu Z Y, *et al.* Influence of dissolved organic matter on heavy metals removal in road runoff in bioretention systems[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(1): 51-58.
- [12] 李迪, 陈焱, 吕波. 生物滞留系统对溶解性污染物的去除特性及优化途径[J]. 环境工程, 2020, **38**(10): 120-127.
- Li D, Chen Y, Lyu B. Characteristics and optimization approach for removal of dissolved pollutants in bioretention systems[J]. Environmental Engineering, 2020, **38**(10): 120-127.
- [13] Li M Y, Zhang Q G, Sun X J, *et al.* Heavy metals in surface sediments in the trans - Himalayan Koshi River catchment: distribution, source identification and pollution assessment[J]. Chemosphere, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125410.
- [14] Antoniadis V, Levizou E, Shaheen S M, *et al.* Trace elements in the soil-plant interface: phytoavailability, translocation, and phytoremediation - A review [J]. Earth - Science Reviews, 2017, **171**: 621-645.
- [15] Shaheen S M, Shams M S, Khalifa M R, *et al.* Various soil amendments and environmental wastes affect the (im) mobilization and phytoavailability of potentially toxic elements in a sewage effluent irrigated sandy soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **142**: 375-387.
- [16] Ghosh S, Bakshi M, Kumar A, *et al.* Assessing the potential ecological risk of Co, Cr, Cu, Fe and Zn in the sediments of Hooghly - Matla estuarine system, India [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41**(1): 53-70.
- [17] Manoj M C, Kawsar M. Metal contamination assessment in a sediment core from Vagamon Lake, southwest India: natural/anthropogenic impact [J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2020, **14**, doi: 10.1016/j.emmm.2020.100362.
- [18] Shaheen S M, Ali R A, Abowaly M E, *et al.* Assessing the mobilization of As, Cr, Mo, and Se in Egyptian lacustrine and calcareous soils using sequential extraction and biogeochemical microcosm techniques[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, **191**: 28-42.
- [19] Zhu Y C, Wang L J, Zhao X Y, *et al.* Accumulation and potential sources of heavy metals in soils of the Hetao area, Inner Mongolia, China[J]. Pedosphere, 2020, **30**(2): 244-252.
- [20] Li Z Y, Ma Z W, van den Kuip T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 843-853.
- [21] Almeida L C, da Silva Júnior J B, dos Santos I F, *et al.* Assessment of toxicity of metals in river sediments for human supply: distribution, evaluation of pollution and sources identification[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **158**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111423.
- [22] Klinsawathom T, Songsakunrueng B, Pattanamahakul P. Heavy metal concentration and risk assessment of soil and rice in and around an open dumpsite in Thailand[J]. EnvironmentAsia, 2017, **10**(2): 53-64.
- [23] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, **21**(3): 265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, **21**(3): 265-306.
- [24] 袁宏林, 李星宇, 王晓昌. 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- Yuan H L, Li X Y, Wang X C. Heavy metals pollution and analysis of seasonal variation runoff in Xi'an[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- [25] 郭文景, 张志勇, 闻学政, 等. 长江下游居民区降水地表径流的污染特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3304-3315.
- Guo W J, Zhang Z Y, Wen X Z, *et al.* Contamination characteristics of surface runoff in densely populated areas in downstream Yangtze River, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3304-3315.
- [26] 董微砾, 陈学刚, 魏疆, 等. 乌鲁木齐市道路雨水径流重金属污染分析[J]. 环境工程, 2014, **32**(5): 105-110.
- Dong W L, Chen X G, Wei J, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in road-runoff in Urumqi City[J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(5): 105-110.
- [27] Geronimo F K F, Maniquiz-Redillas M C, Hong J, *et al.* Evaluation on the suspended solids and heavy metals removal mechanisms in bioretention systems [J]. Membrane Water Treatment, 2019, **10**(1): 91-97.
- [28] 鲍丽然, 龚媛媛, 严明书, 等. 渝西经济区土壤地球化学基准值与背景值及元素分布特征[J]. 地球与环境, 2015, **43**(1): 31-40.
- Bao L R, Gong Y Y, Yan M S, *et al.* Element geochemical baseline and distributions in soil in Chongqing west economic zone, China[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(1): 31-40.
- [29] 杨少斌, 于鑫, 孙向阳, 等. 北京城区绿地土壤重金属污染评价与空间分析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(5): 933-941.
- Yang S B, Yu X, Sun X Y, *et al.* Pollution assessment and spatial structure analysis of heavy metals of greenbelt soil in Beijing urban area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(5): 933-941.

- [30] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1105-1113.
Zeng W B, Gu G Q, Wan X M, *et al.* Heavy metal contents of soil and surface dust and its ecological risk analysis in a multifunctional industrial park [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1105-1113.
- [31] 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 等. 基于土壤重金属及 PAHs 来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4180-4196.
Wu Z Y, Zhang L N, Xia T X, *et al.* Quantitative assessment of human health risks based on soil heavy metals and PAHs sources: take a polluted industrial site of Beijing as an example [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4180-4196.
- [32] Wagner S, Hüffer T, Klöckner P, *et al.* Tire wear particles in the aquatic environment - A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects[J]. Water Research, 2018, **139**: 83-100.
- [33] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 909-916.
Chen J L, Li R Y, Xie X J, *et al.* Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of Nanjing City[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 909-916.
- [34] 赵靛, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5552-5561.
Zhao L, Liang Y P, Chen Q, *et al.* Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in North China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [35] Juwah H O, Tachere O Z. Environmental impact assessment of vehicular traffic along major roads in delta state of Nigeria, using contamination and enrichment factors[J]. Archives of Current Research International, 2021, **21**(1): 54-64.
- [36] Da Silva Ferreira M, Fontes M P F, Pacheco A A, *et al.* Health risks of potentially toxic trace elements in urban soils of Manaus city, Amazon, Brazil [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, **43**(9): 3407-3427.
- [37] 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 等. 太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2143-2152.
Huang H, Xu Z Q, Yan J X, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution and ecological risk evaluation of indoor dust from urban and rural areas in Taiyuan City during the heating season [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2143-2152.
- [38] 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 等. 电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 18-26.
Zhao Z L, Zhao W T, Huang T, *et al.* Seasonal characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in PM₁₀ around electroplating plants[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 18-26.
- [39] Nguyen D X, Nairn R W, Knox R C. Sand filtration enhanced by various reactive materials for bioretention cell design considerations[J]. Journal of Environmental Engineering, 2021, **147**(11), doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001916.
- [40] Xu Y, Liu Y W, Zhang B C, *et al.* Enhanced removal of sulfamethoxazole and tetracycline in bioretention cells amended with activated carbon and zero-valent iron: system performance and microbial community[J]. Science of the Total Environment, 2021, **797**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148992.
- [41] Weissmannova H D, Mihočová S, Chovanec P, *et al.* Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(22), doi: 10.3390/ijerph16224495.
- [42] Mehmood K, Ahmad H R, Abbas R, *et al.* Heavy metals in urban and peri-urban soils of a heavily-populated and industrialized city: assessment of ecological risks and human health repercussions [J]. Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal, 2020, **26**(6): 1705-1722.
- [43] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1093-1104.
Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [44] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地学前缘, 2021, **28**(4): 238-249.
Zhang S R, Wang C Y, Liu J H, *et al.* Assessments of heavy metal pollution in soils of the southwestern Xiong'an District and its ecological risk[J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(4): 238-249.
- [45] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 140-147.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)