

知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价

储杨阳¹, 杨龙^{1*}, 周媛¹, 王喜龙², 王嗣禹¹, 张敏¹

(1. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 采集了停车场、道路旁、居民区及产业园区 4 种不同用地类型的生物滞留设施的 0~10 cm 表层土壤, 分析了 8 种重金属污染物(As、Hg、Cd、Cr、Pb、Cu、Ni 和 Zn)的累积含量, 并对重金属累积的影响因素、污染水平、潜在生态风险和人体健康风险进行了分析和评估。结果表明, 8 种重金属污染物的累积含量存在较大的差异, $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为 8.92、0.25、0.10、31.56、14.81、21.27、23.69 和 62.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, As 和 Hg 的含量平均值分别达到了土壤背景值的 1.26 和 5.21 倍; 相关性分析表明, 8 种重金属含量均与土壤有机质含量呈现较强正相关, 除 Hg 之外均与土壤 pH 值呈现正相关, 除 As 外与磷含量呈现正相关。内梅罗综合指数以及潜在生态风险指数的分析结果表明, 除 Hg 之外的其他 7 种重金属的污染水平及生态风险较低, 受 Hg 污染的影响, 生物滞留设施重金属综合污染水平以及生态风险较高, Hg 对土壤环境存在一定的潜在威胁。4 类设施重金属非致癌风险在可接受范围内, 致癌风险值均在 $10^{-6} < \text{CR} < 10^{-4}$ 范围内, 其中 As 为主要的风险因子。4 种不同用地类型中, 停车场和道路旁生物滞留设施的污染物累积含量、污染水平、生态风险及人体健康风险均远高于居民区和产业园区。

关键词: 生物滞留设施; 重金属累积; 分布特征; 风险评价; 调控建议

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3608-15 DOI: 10.13227/j.hjkk.202107218

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems

CHU Yang-yang¹, YANG Long^{1*}, ZHOU Yuan¹, WANG Xi-long², WANG Si-yu¹, ZHANG Min¹

(1. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Topsoil samples (0-10 cm) from four bioretention systems with different land-use types were collected, including parking lot, roadside, residential area, and industrial park systems. The accumulation contents of As, Hg, Cd, Cr, Pb, Cu, Ni, and Zn were analyzed and evaluated, as were the influencing factors, pollution level, potential ecological risk, and human health risk. The results showed that there were significant differences in the accumulated contents of eight heavy metals. The average $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Hg})$, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Ni})$, and $\omega(\text{Zn})$ were 8.92, 0.25, 0.10, 31.56, 14.81, 21.27, 23.69, and 62.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, and the average contents of As and Hg were 1.26 and 5.21 times the soil background values, respectively. Correlation analysis showed that the contents of the eight heavy metals were positively correlated with soil organic matter, pH value (except Hg), and phosphorus content (except As). The results of the Nemerow Comprehensive Pollution Index and Hakanson Potential Ecological Index showed that the pollution level and ecological risk of the other seven heavy metals were relatively low, whereas the pollution level and ecological risk of Hg reached the level of severe pollution and strong ecological risk, respectively. Affected by Hg, the comprehensive pollution level and ecological risk were relatively high; thus, Hg was a potential threat to the soil environment. The non-carcinogenic risks of heavy metals in the four systems were acceptable, but the carcinogenic risks were all beyond 10^{-6} though lower than 10^{-4} , which indicated that these four systems had a certain carcinogenic risk, in which As was the main risk factor. Among these four land-use types, the accumulated pollutant contents, pollution levels, ecological risk, and human health risk of parking lots and roadside bioretention systems were much higher than those of residential areas and industrial parks.

Key words: bioretention systems; heavy metal accumulation; distribution characteristics; risk assessment; maintenance suggestions

生物滞留设施是指在地势较低的区域, 通过植物、土壤和微生物系统蓄渗、净化径流雨水的设施, 包括雨水花园和生物滞留池等, 是应用最为广泛的海绵设施之一^[1~3]。生物滞留设施的竖向结构从上至下一般为植被层、蓄水层、覆盖层、种植土层、填料层和排水层, 每层的组成及常规厚度如图 1 所示。有研究表明, 雨水径流中作为重要的面源污染之一, 含有大量的重金属、氮磷和有机物等污染物^[4,5], 生物滞留设施则具有降低雨水径流流速, 削减径流量和净化雨水等多重作用^[6,7]。降雨过程中, 雨水流过密集的植物, 然后下渗至土壤以及过滤填料, 经过植物-微生物-土壤-填料的共同作用, 经过拦截、渗透、

沉降、蒸发、蒸腾、过滤、吸收、同化、吸附和微生物等作用过程对雨水进行滞留和净化^[8], 之后由底部的排水层收集, 输送至下游水系或者地下水, 改善水循环。

有研究发现, 生物滞留设施对于雨水径流中的有机物、氮磷以及重金属等多种污染物均具有较好的去除效果^[9,10], 然而, 随着污染物的去除, 径流中

收稿日期: 2021-07-26; 修订日期: 2021-11-19

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划项目(2019-K-142); 中国城市建设研究院有限公司青年基金项目(YQ22S21022); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG02011)

作者简介: 储杨阳(1994~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为生物滞留设施和环境功能材料, E-mail: chuyangyangnju@163.com

* 通信作者, E-mail: yanglong@ccid.cn

大量污染物尤其是重金属伴随着一系列物理、化学和生物反应逐渐累积在设施中,不仅会导致设施污染物去除效率下降,出水水质变差,还会影响设施中植物的生长,甚至危害人体健康^[11].然而由于目前运行年限较长的生物滞留设施较为有限,且采样及分析十分复杂,关于在实际运行中的生物滞留设施污染物累积的过程、影响因素和风险的研究较少,仅有少数的学者报道了生物滞留设施中污染物的累积状况. Costello 等^[12]的研究发现,运行仅 7 a 后,生物滞留设施中的重金属含量即达到了植物损伤阈值. Al-Ameri 等^[13]调查分析了运行 9~16 年的生物滞留设施,发现 0~10 cm 表层土壤中的重金属累积含量已经超过本国土壤环境质量标准.生物滞留设施污染物累积分布特征和风险评价研究有助于揭示生物滞留设施在长期运行后的污染物累积状况,从而指导生物滞留设施的建设、运行、管理和维护,对于进一步降低污染物累积的生态风险和人体健康风险,具有重要意义.

本研究采集了停车场、道路旁、居民区和高新产业园区这 4 种常见用地类型生物滞留设施 0~10 cm 表层土壤,测定了重金属的累积含量,并分析了其与土壤有机质含量、pH 值和磷含量的相关关系.



图 1 生物滞留设施结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of bioretention systems

表 1 生物滞留设施基本状况

Table 1 Basic information of four bioretention systems

名称	类型	运行年限/a	基质类型	基质厚度/cm
博大停车场	停车场	7	种植土+砂石	80
科创十七街	道路旁	8	种植土+人工填料	60~80
紫荆雅园	居民区	6	种植土+砂石	60~80
百世金谷	产业园区	6	玻璃轻石	60

1.1.2 采样点位置

在生物滞留设施进水口附近设置采样点(采样点位置如图 3),采用 5 点采样法采样,分别采集 5 个分样点 0~10 cm 的表层土壤(图 3 为 5 点中心点),充分混合得到约 500 g 的混合样品,放入密封

袋保存,并记录其地理位置,并在设施周围无径流汇入绿地采集土壤样品作为背景值(图 3 中未标出).将土样自然风干后,用镊子剔除样品中的树枝、植物根茎、石块等物质,研磨过筛备用.博大大厦停车场[图 3(a)]共采集 5 个样品点及周围无径流汇入绿

1 材料与方法

1.1 样品采集

1.1.1 采样生物滞留设施分布及基本状况

本研究于 2020 年 10 月 20 日采集了博大大厦停车场、科创十七街道路旁、武夷花园紫荆雅园居民区和百世金谷产业园区这 4 种不同用地类型的生物滞留设施,采样生物滞留设施地理位置如图 2.

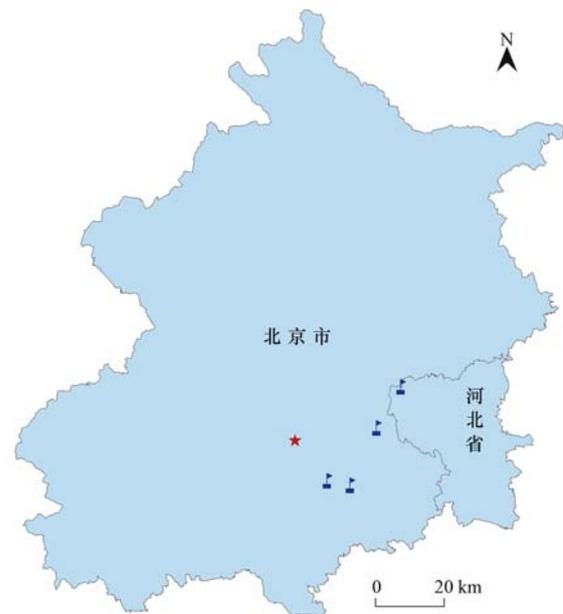


图 2 采样生物滞留设施地理位置

Fig. 2 Location of the sampled bioretention systems

4 个设施的用地类型、运行年限、结构及填料组成等基本状况,如表 1 所示.设施填料在填埋之前均进行了反复清洗,本身含有的重金属含量较低,同时在设施周围无径流汇入绿地,采集土壤样品作为背景值.

袋保存,并记录其地理位置,并在设施周围无径流汇入绿地采集土壤样品作为背景值(图 3 中未标出).将土样自然风干后,用镊子剔除样品中的树枝、植物根茎、石块等物质,研磨过筛备用.博大大厦停车场[图 3(a)]共采集 5 个样品点及周围无径流汇入绿

地背景点 1 个,科创十七街道路旁[图 3(b)]共采集 4 个样品点及 1 个背景点,武夷花园紫荆雅园居民区[图 3(c)]共采集 4 个样品点及 1 个背景点和百世金谷产业园区[图 3(d)]共采集 3 个样品点及 1 个背景点,共 16 个样品点及 4 个周围无径流汇入绿地背景点,每个采样点测定平行样品。

1.2 样品检测

土壤风干、分拣、研磨和过筛之后,分别测定总氮、总磷、有机质、pH 值及重金属砷、汞、铬、镉、铅、铜、镍和锌的含量,检测方法及参考的检测标准如表 2 所示,样品的准备及测定步骤均严格按照检测标准。其中,土壤样品的标准物质及回收率见表 3。

1.3 污染物风险评价

1.3.1 内梅罗指数法

内梅罗综合污染指数法采用兼顾单元素污染指数平均值和最大值的方法,不仅能反映出各重金属元素的平均污染水平,又能突出高浓度重金属污染



(a) 博大停车场, (b) 科创十七街道路旁, (c) 武夷花园紫荆雅园居民区, (d) 百世金谷产业园区

图 3 生物滞留设施中采样点位置分布

Fig. 3 Distribution of sampling points in bioretention systems

表 2 土壤样品检测项目、检测方法及参考标准

Table 2 Analytical methods for soil samples test methods and reference standards

检测项目	检测方法	参考检测标准
总氮	凯氏定氮	国家环境保护标准: HJ 717-2014
总磷	碱熔-钼锑抗分光光度法	国家环境保护标准: HJ 632-2011
有机质	重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法	国家农业行业标准: NY-T 1121. 6-2006
pH 值	浸提-电位法	国家农业行业标准: NY-T 1377-2007
铬、镉、铅、铜、镍和锌	王水提取-电感耦合等离子体质谱法	国家环境保护标准: HJ 803-2016
汞和砷	原子荧光法	国家环境保护标准: GB/T 22105. 2-2008

表 3 土壤样品的标准物质及加标回收率

Table 3 Standard substance and recovery rate of soil samples

检测项目	标准物质编号	标准值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	实测值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	评价	
标准物质	铜	GBW07404 (GSS-4)	40 ± 3	41	合格
	锌	GBW07404 (GSS-4)	210 ± 13	210	合格
	镍	GBW07404 (GSS-4)	64 ± 5	67	合格
	铬	GBW07404 (GSS-4)	370 ± 16	372	合格
	铅	GBW07404 (GSS-4)	58 ± 5	59	合格
	汞	GBW07404 (GSS-4)	0.59 ± 0.05	0.60	合格
	砷	GBW07404 (GSS-4)	58 ± 6	60.3	合格
	镉	GBW07404 (GSS-4)	0.35 ± 0.06	0.36	合格
检测项目	加标量/ μg	回收率/%	标准要求/%	评价	
加标回收率	镍	2.0	82.8	70 ~ 125	合格
	铜	2.0	84.2	70 ~ 125	合格
	铅	2.0	84.0	70 ~ 125	合格
	砷	2.0	92.2	70 ~ 125	合格
	镉	0.02	77.3	70 ~ 125	合格

物污染状况^[14],其表达式如下:

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

$$P_N = \sqrt{(P_{iave}^2 + P_{imax}^2)}/2 \quad (2)$$

式中, P_i 为单因子污染指数; C_i 为土壤重金属 i 的实测含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_s 为重金属地球化学背景值,

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_{iave} 为重金属平均污染指数; P_{imax} 为污染程度最大的重金属污染指数,分级标准如表 4 所示。

1.3.2 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价方法综合了不同重金属的生态效应,环境效应和毒理学等多方面性质^[15,16],被

表 4 内梅罗污染指数分级标准

级别	单因子污染指数 (P_i)	综合潜在生态风险指数 (P_N)	污染程度
1	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重度污染

表 5 重金属潜在生态风险指数分级标准

级别	单种重金属的潜在生态 风险指数(E_i)	潜在生态风险等级	综合潜在生态 风险指数(RI)	潜在生态风险等级
1	$E_i < 40$	轻度生态风险	$RI < 150$	轻度生态风险
2	$40 \leq E_i < 80$	中等生态风险	$150 \leq RI < 300$	中等生态风险
3	$80 \leq E_i < 160$	强生态风险	$300 \leq RI < 600$	强生态风险
4	$160 \leq E_i < 320$	很强生态风险	$RI \geq 600$	很强生态风险
5	$E_i \geq 320$	极强生态风险		

= Pb = 5 > Cr = 2 > Zn = 1^[16-18]; E_i 为单种重金属的潜在生态风险指数, RI 为多种重金属的综合潜在生态风险指数, 其评价指标与具体风险分级如表 5 所示。

1.3.3 人体健康风险评价

采用美国环保署(EPA)推荐的人体健康风险评价模型, 主要分为暴露剂量计算和暴露风险评价两个步骤。暴露剂量计算是根据人体特征(体重和年龄等)来计算不同暴露途径下接触污染物质的剂量, 主要包含手口途径、皮肤接触和呼吸摄入这 3 种, 3 种暴露途径的日平均暴露量计算方法如下:

$$ADI_{\text{手口}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$ADI_{\text{皮肤}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$ADI_{\text{呼吸}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{PEF}} \quad (7)$$

式中, ADI 为日均暴露量; C 为土壤重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; EF 为土壤暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露

广泛应用于重金属生态风险评价中, 计算公式如下:

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

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

式中, C_i 为土壤重金属 i 的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_s 为重金属地球化学背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; T_i 为毒理学响应因子, 各重金属 T_i 为 Hg = 40 > Cd = 30 > Cu = Ni

年限, a; BW 为体重, kg; AT 为重金属平均暴露时间, d; IngR 为土壤摄入频率, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; ABS 为皮肤吸收因子, SA 为皮肤暴露表面积, cm^2 ; AF 为皮肤粘着度, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$; InhR 为呼吸频率, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; PEF 为灰尘排放因子, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于成年人和儿童在生理和行为上的差异, 本研究将人群分为儿童(0 ~ 18 岁)和成人两组分别评估和分析健康风险, 上述计算公式中两类人群的各参数取值如表 6 所示。

人体健康风险分为致癌健康风险和非致癌健康风险, 本研究中 8 种重金属元素对人体都有慢性非致癌风险, As、Cd、Cr、Pb 和 Ni 同时还具有致癌风险^[21]。非致癌及致癌健康风险的计算公式如下:

$$HQ_i = \sum_{j=1}^3 (ADI_{ij} / \text{RfD}_{ij}) \quad (8)$$

$$HI = \sum_{i=1}^8 HQ_i \quad (9)$$

$$\text{CR}_i = \sum_{j=1}^3 ADI_{ij} \times \text{SF}_{ij} \quad (10)$$

式中, HQ_i 为重金属的非致癌风险商, HI 为多种重金属的总非致癌风险指数, RfD_{ij} 为非致癌重金

表 6 健康风险评价公式参数取值^[19,20]

暴露途径	人群	EF	ED	BW	AT 致癌	AT 非致癌	IngR	ABS	SA	AF	InhR	PEF
手口途径	儿童	350	6	15	70 × 365	ED × 365	200	— ¹⁾	—	—	—	—
	成人	350	30	70	70 × 365	ED × 365	100	—	—	—	—	—
皮肤接触	儿童	350	6	15	70 × 365	ED × 365	—	0.001 (As 0.03)	2 800	0.07	—	—
	成人	350	30	70	70 × 365	ED × 365	—	0.001 (As 0.03)	5 700	0.2	—	—
呼吸吸入	儿童	350	6	15	70 × 365	ED × 365	—	—	—	—	7.5	1.36×10^9
	成人	350	30	70	70 × 365	ED × 365	—	—	—	—	15	1.36×10^9

1) “—”表示无此参数数据

属不同暴露途径的参考剂量, CR_i 为致癌风险值, SF_{ij} 为致癌重金属不同暴露途径的致癌斜率. 本文选取的各重金属的 RfD_{ij} 和 SF_{ij} 参考值如表 7 所示.

1.3.4 指数评价标准

基于中国土壤背景值^[22,23]、北京市土壤背景

值^[24,25]、《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)和北京市《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11 811-2011)等为参考值,本研究分析各生物滞留设施中的重金属累积状况、污染程度和潜在风险,具体数值如表 8 所示.

表 7 重金属不同暴露途径的参考剂量和致癌斜率

Table 7 Reference dose and carcinogenic slope factors of different exposure routes of heavy metals

重金属	RfD			SF		
	手口途径	皮肤接触	呼吸吸入	手口途径	皮肤接触	呼吸吸入
As	0.000 3	0.000 123	0.000 3	1.5	3.66	15.1
Hg	0.000 3	0.000 021	0.000 085 7	— ¹⁾	—	—
Cd	0.001	0.000 01	0.001	—	—	6.3
Cr	0.003	0.000 06	0.000 028 6	—	—	42
Pb	0.003 5	0.000 525	0.003 5	—	0.008 5	—
Cu	0.04	0.012	0.04	—	—	—
Ni	0.02	0.005 4	0.02	—	—	0.84
Zn	0.3	0.06	0.3	—	—	—

1) “—”表示无此参数数据

表 8 生物滞留设施重金属污染评价标准/ $mg \cdot kg^{-1}$

Table 8 Evaluation criteria for heavy metal pollution of bioretention systems/ $mg \cdot kg^{-1}$

重金属 污染物	中国土壤 背景值 ^[22,23]	北京市土壤 背景值 ^[24,25]	土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控 标准(试行)(GB 36600-2018)筛选值		北京市《场地土壤环境风险评价 筛选值》(DB11 811-2011)		
			第一类用地	第二类用地	住宅用地	公园与绿地	工业/商服用地
			砷	11.2	7.09	20	60
汞	0.065	0.048	8	38	10	10	14
镉	0.097	0.119	20	65	8	9	150
铬	61	29.8	— ¹⁾	—	250	800	2 500
铅	26	24.6	400	800	400	400	1 200
铜	22.6	18.7	2 000	18 000	600	700	10 000
镍	26.9	26.8	150	90	50	80	300
锌	74.2	57.5	—	—	3 500	5 000	10 000

1) “—”表示该标准无此重金属数据

2 结果与讨论

2.1 生物滞留设施重金属累积现状

采集生物滞留设施土壤样品中的重金属含量如图 4 所示,其中, $\omega(As)$ 、 $\omega(Hg)$ 、 $\omega(Cd)$ 、 $\omega(Cr)$ 、 $\omega(Pb)$ 、 $\omega(Cu)$ 、 $\omega(Ni)$ 和 $\omega(Zn)$ 的平均值分别为 8.92、0.25、0.10、31.56、14.81、21.27、23.69 和 62.75 $mg \cdot kg^{-1}$,除了 Cd、Ni 和 Pb 之外,其余 5 种重金属含量均高于北京市土壤背景值,As 和 Hg 的含量平均值分别达到了土壤背景值的 1.26 倍和 5.21 倍.另外,8 种重金属在生物滞留设施表面的累积含量均低于北京市《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11 811-2011)中的公园与绿地标准.

为比较 4 种不同用地类型的生物滞留设施的重金属累积状况,将 4 个设施 8 种重金属含量平均值和设施背景采样点重金属含量分别进行了对比,如图 5 所示.

从图 5 可以看出,停车场及道路旁生物滞留设施的 8 种重金属的含量平均值及累积含量均远远高于居民区和产业园区.道路旁及停车场中的汽车尾气、扬尘、油料泄漏、橡胶轮胎磨损、机动车机件磨损、汽车散热器和沥青或水泥路面磨损等,排放大量的重金属污染物^[26],这些污染物伴随着大气沉降、雨水径流和道路径流的冲刷进入生物滞留设施,经过复杂的物理、生物和化学过程累积在生物滞留设施中.其中,百世金谷产业园区因为投入运行时间较短,入园企业数量不多,且入园企业绝大多数为高新企业,因此重金属累积含量较低.

8 种重金属元素中,Hg 和 As 的生物滞留设施表面累积含量相较于其他重金属更高.有研究表明,工业燃煤、采石、冶金、生活燃煤和交通等过程中所释放的微颗粒经过大气沉降进入土壤是土壤 Hg 和 As 富集的主要原因之一^[27].据报道,我国煤炭中 $\omega(Hg)$ 在 0.003 ~ 10.5 $mg \cdot kg^{-1}$,而 $\omega(As)$ 在 2 ~ 82

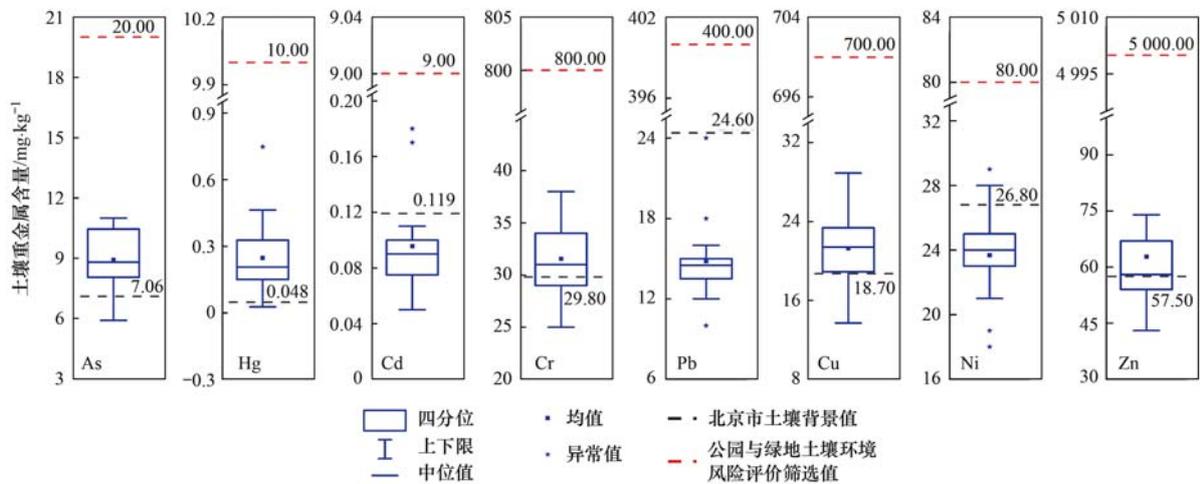
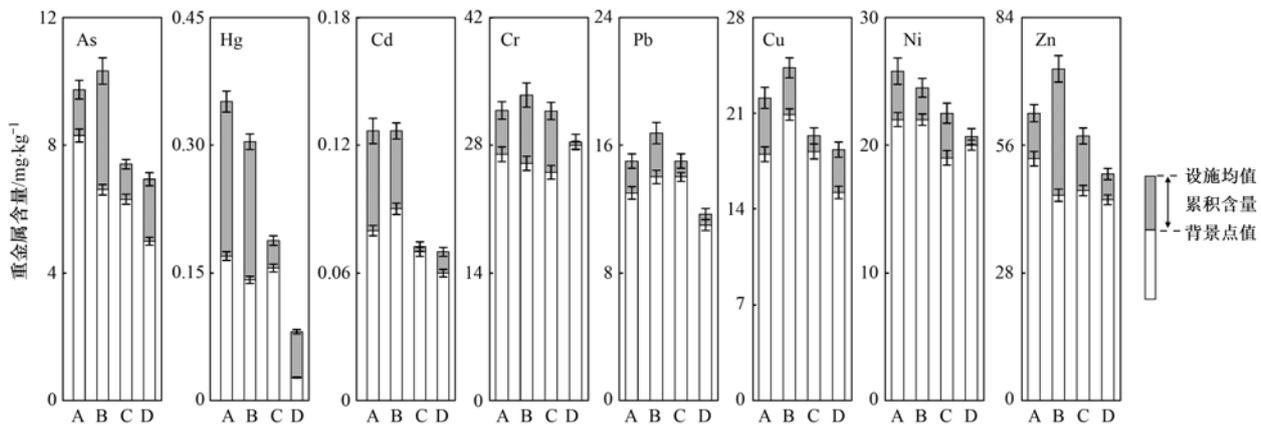


图4 生物滞留设施重金属含量箱体图

Fig. 4 Boxplots for the heavy metal concentrations in the bioretention systems



A 表示博大停车场, B 表示科创十七街道路旁, C 表示武夷花园紫荆雅园居民区, D 表示百世金谷产业园区

图5 4种生物滞留设施8种重金属累积含量

Fig. 5 Accumulation contents of eight heavy metals in four bioretention systems

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[28], 煤炭中的汞和砷在露天堆放中会直接释放一部分到大气中, 在燃煤过程中产生的飞灰和灰渣中也含有大量的 As 和 Hg 污染物^[29]. 张萌^[30]的研究通过源解析分析发现, 太原市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 As 和 Hg 主要来源于人为污染, 煤炭燃烧和汽车尾气是主要污染源. 除了燃煤和交通之外, As 经常以伴随元素的方式存在于多种重金属矿中, 因此在重金属矿开采与冶炼过程中均可能造成周边土壤的 As 污染. 含 As 化合物如洛克沙肿等还常被作为饲料添加剂用于养殖业中, 如果动物排泄物被用作绿化肥料, 这些含砷化合物及其代谢产物也会进入生物滞留设施中^[31]. 近年来, 随着研究区域内采石场和冶金企业等的陆续关闭, 工业及农村的燃煤锅炉改造、煤改气等措施实行^[32,33], 污染已经有所降低, 但是由于前期的污染, 土壤中仍然积累着一定量的污染物. 另外, 邻近区域内所产生的 As 和 Hg 污染物也可伴随大气迁移、沉降等过程迁移至研究区域内的生物滞留设施中. 重金属 Pb 的累积含量较文献

报道有所降低^[34], Pb 为主要交通源重金属之一, 但是随着近年来含铅汽油的逐步禁止, 尾气及扬尘颗粒中的铅含量逐渐降低, 因此生物滞留设施表面铅的累积含量不高.

4 种不同用地类型的生物滞留设施中 Hg 的累积含量存在较大的差异: 道路旁 > 停车场 >> 产业园区 > 居民区. 这是由于, 用地类型的不同导致了污染物来源的不同, 道路旁和停车场均具有较大的车流量, 因此汽车尾气中携带的 Hg 污染物将会伴随着大气迁移、沉降等过程迁移累积至生物滞留设施的土壤中. Ozaki 等^[35]的研究采集了从日本长野县竹部三加谷国家公园到松本市的路边土壤和灰尘, 在公共汽车站、隧道、松本立交桥和松本站东出口处观察到较高浓度的 As、Hg 和 Pb, 这 4 个地点受到汽车的强烈影响, 汽车尾气排放是造成较高浓度的原因. 钱建平等^[36]的研究发现, 汽车尾气污染是公路剖面汞污染的主要来源, 并且伴随着与公路距离的增加, 土壤 Hg 含量逐渐降低, 另外, 有研究人员对

收集了使用 0 号柴油的机动车排气管中的尾气样品,分析发现排气管颗粒物中的 $\omega(\text{Hg})$ 高达 $0.343 \sim 9.920 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,表明面汽车尾气中含有较高含量的 Hg 污染物.汽车尾气 Hg 污染是由于燃油中含有 Hg 元素导致,Won 等^[37]的研究对汽油、柴油和液化石油气(LPG)车辆排放的 Hg 进行了分析,3 种不同燃料的原始 $\rho(\text{Hg})$ 分别为: $(571.1 \pm 4.5) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (汽油)、 $(185.7 \pm 2.6) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (柴油)和 $(1230.3 \pm 23.5) \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (液化石油气).因此,汽车尾气排放是导致道路旁及停车场生物滞留设施中 Hg 累积含量较高的原因.不同用地类型生物滞留设施由于污染物来源的差异重金属累积含量也存在较大差异.

2.2 生物滞留设施重金属累积相关性分析

2.2.1 8 种重金属之间的相关性

不同重金属之间的相关性常作为判别重金属是否具有共同来源的依据之一,有显著正相关关系的

重金属通常认为有相似的来源^[38].对各重金属元素进行 Pearson 相关分析($P < 0.01$),结果显示(表 9),Pb、Cu、Cr 和 Zn 这 4 种元素两两之间存在较强的相关关系,尤其是 Pb 和 Zn 之间呈现强正相关,表明这 4 种元素可能来源于相同的来源;As、Cr 和 Cd 三者之间也存在显著正相关,表明这 3 种元素可能有部分相似的来源,但 Hg 与其他 7 种重金属之间均无显著正相关,说明 Hg 与其他重金属可能拥有不同的来源.含汞污染物在燃料燃烧、采矿、冶炼和垃圾焚烧等过程产生后被排放到大气中,随着大气扩散和迁移转化,并经过大气沉降、雨水冲刷和道路径流等过程最终进入到生物滞留设施中,因此来源更复杂.

2.2.2 重金属含量与土壤 pH 值、有机质和磷含量的相关关系

(1) 有机质含量 生物滞留设施表层土壤累积

表 9 生物滞留设施累积重金属含量相关性矩阵¹⁾

Table 9 Pearson's correlation matrix for heavy metal accumulation contents in the bioretention systems

	As	Hg	Cd	Cr	Pb	Cu	Ni	Zn
As	1.000							
Hg	0.172	1.000						
Cd	0.532 *	0.198	1.000					
Cr	0.523 *	0.082	0.571 *	1.000				
Pb	0.412	0.195	0.173	0.739 **	1.000			
Cu	0.469	0.249	0.434	0.765 **	0.768 **	1.000		
Ni	0.646 **	0.161	0.353	0.531 *	0.400	0.586 *	1.000	
Zn	0.379	0.080	0.222	0.691 **	0.956 **	0.766 **	0.332	1.000

1) * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著, ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著

重金属含量与有机质含量关系如图 6 所示,可以看出,8 种重金属含量均与土壤有机质含量呈现较强的正相关,其中,Pb 和 Cu 的相关性最强,相关系数分别为 0.624 和 0.575.这与前人的研究相似;Johnson 等^[39]的研究发现生物滞留设施土壤中的 Zn 和 Cu 含量与其腐殖酸含量呈正相关关系.Costello^[12]的研究分析了 25 个运行 0~7 a 的生物滞留设施土壤介质中 Cu、Pb 和 Zn 的含量,发现与土壤中的有机质含量显著正相关.Paus 等^[40]的研究收集了运行了 2~8 a 的 6 个生物滞留设施中土壤/介质样品,发现对 Cd 和 Zn 的吸附量随着土壤/介质中有机质含量的增加而增加.土壤尤其是表层土壤中含有大量的有机质,如富里酸和腐殖酸等,这些有机质含有的羧基、羟基和巯基等官能团易与重金属发生络合或螯合作用,从而影响重金属的迁移转化过程.因此,有机质含量是影响重金属累积过程和含量的一个重要因素.

(2)pH 值 生物滞留设施表层土壤重金属累积含量与 pH 值关系如图 7 所示,可以看出,除 Hg

之外的重金属含量均与土壤 pH 值呈现正相关.土壤 pH 对于重金属含量及迁移转化的影响是非常复杂的,首先 pH 变化会影响重金属的形态变化,随着土壤 pH 值的增加,可溶性重金属逐渐转化为不溶性沉淀物.此外,土壤 pH 值变化还会影响土壤重金属在颗粒上的吸附-解析、与有机质之间的络合-螯合以及氧化还原等过程.随着土壤 pH 升高,土壤中黏土矿物、水合氧化物和有机质表面所携带的负电荷增多,静电吸引力和活性点位显著增多,促进了静电吸附和结合更紧密的专性吸附过程,另一方面,土壤中 H^+ 浓度的降低,有效降低了其与重金属离子的竞争吸附作用,因此促进了土壤颗粒对重金属离子的吸附作用^[41].土壤 H^+ 浓度的降低还会使得其与重金属离子在有机质配体吸附点位上的竞争效应发生变化,进而增强有机质与重金属络合物及螯合物的稳定性,提升重金属累积含量^[42].pH 值的变化也会改变土壤有机质的构象,继而影响重金属和土壤之间的相互作用^[43].最后,土壤 pH 的升高会导致土壤氧化还原电位的降低,致使土壤中的重金属

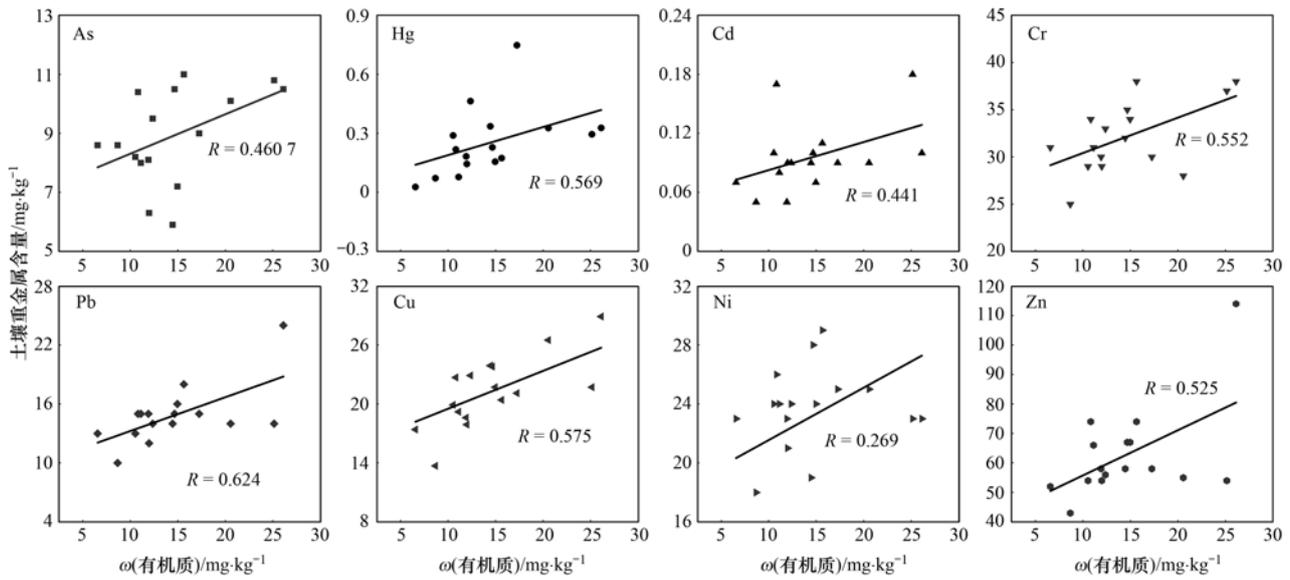


图6 生物滞留设施表层土壤有机质含量与重金属含量相关性拟合

Fig. 6 Correlation fit of organic matter contents and heavy metal contents in topsoil of bioretention systems

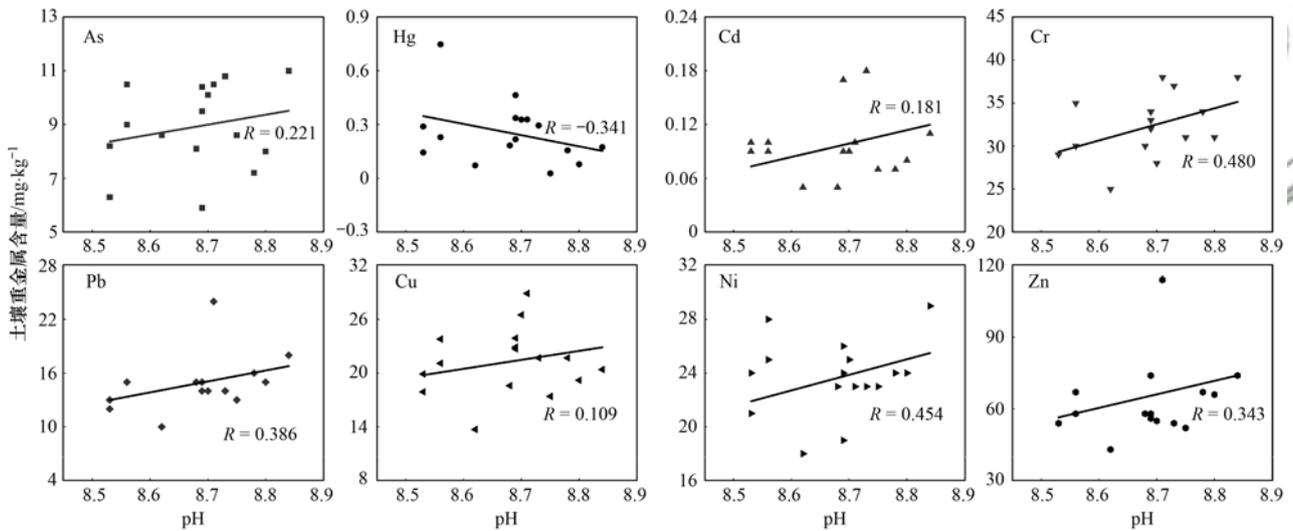


图7 生物滞留设施表层土壤 pH 与重金属含量相关性拟合

Fig. 7 Correlation fit of pH values and heavy metal contents in topsoil of bioretention systems

在还原条件下转变为低价不溶性状态,从而降低了其迁移能力,提升了在生物滞留设施表层的累积含量^[44]。

而土壤中 Hg 的含量与土壤 pH 呈现负相关,这可能是因为,随着 pH 值的升高,OH 浓度也增加,Hg 从 Hg^{2+} 转化为 $\text{Hg}(\text{OH})\text{Cl}$,土壤中的矿物高岭石、含水铁氧化物、二氧化硅等颗粒此时表面带负电荷,对 $\text{Hg}(\text{OH})\text{Cl}$ 或 $\text{Hg}(\text{OH})$ 的静电吸引作用较 Hg^{2+} 降低,对 Hg 吸附量随之降低,土壤表层汞的累积量随之降低。

(3) 磷含量 生物滞留设施表层土壤累积重金属含量与磷含量关系如图 8 所示,除 As 之外的 7 种重金属含量均与土壤有机质含量呈现正相关。这也与前人的研究相似,Johnson 等^[39]的研究从运行 11a

的生物滞留系统中收集了土壤/基质样本,发现重金属 Cu 和 Zn 累积含量与磷含量之间存在很强的正相关关系。有机磷和无机磷含量都会影响重金属的积累。有机磷含量与有机质含量相关,会通过络合及螯合作用影响重金属的积累。无机磷是植被和微生物的基本元素,土壤中无机磷含量将会影响植物及微生物的生长代谢过程从而影响重金属的积累。此外,无机磷可与重金属阳离子形成磷酸盐沉淀,从而影响重金属的迁移转化过程。而 As 在碱性土壤中通常以砷酸根的形式存在,不会与磷酸发生反应,且砷与磷位于同一主族,性质相似,在土壤颗粒表面的吸附存在竞争效应,因此土壤中砷含量与磷含量呈现负相关关系。生物滞留设施土壤介质中磷含量的变化也是影响重金属的累积的重要因素。

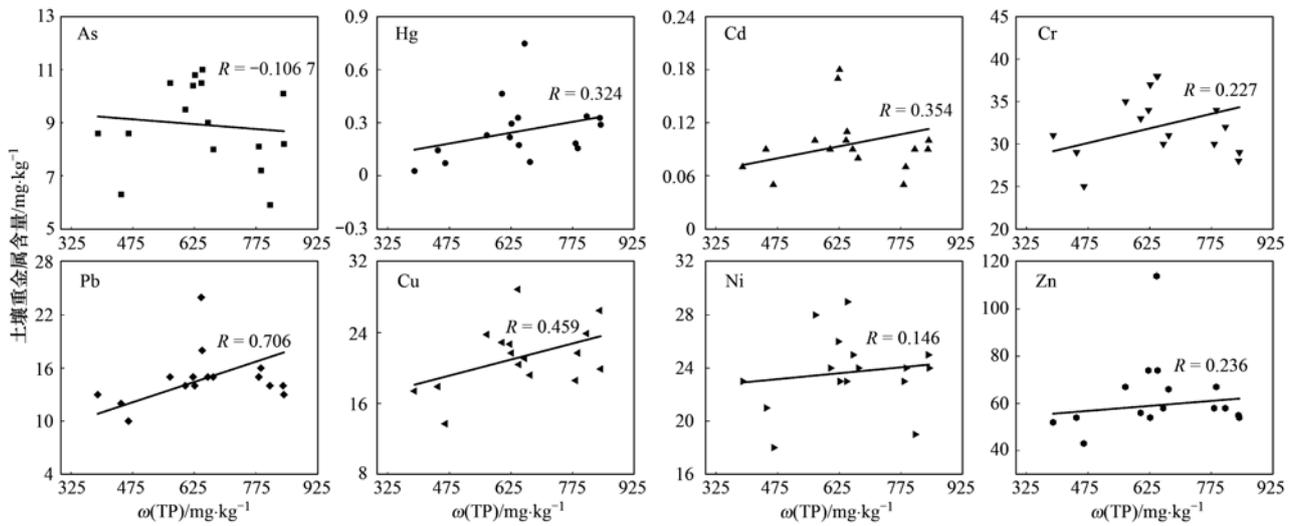


图 8 生物滞留设施表层土壤磷含量与重金属含量相关性拟合

Fig. 8 Correlation fit of phosphorus content and heavy metal contents in topsoil of bioretention system

2.3 生物滞留设施重金属累积风险评价

2.3.1 内梅罗综合指数法评价

基于全国土壤背景值,采用内梅罗综合指数法对4种生物滞留设施重金属污染程度进行风险评价,结果如图9所示.可以看出,8种重金属中,Hg的污染风险等级最高,50%的采样点均处于重度污染,31%处于中度污染,13%处于轻度污染,仅6%的采样点处于清洁状态.而除Hg之外的其他7种重金属As、Cd、Cr、Pb、Cu、Ni和Zn的污染水平较低,基本处于清洁和尚清洁状态,仅有少部分处于轻污染状态.受Hg污染的影响,生物滞留设施重金属综合污染水平较高,38%处于重度污染,31%处于中度污染,19%处于轻度污染,仅13%处于尚清洁状态,对土壤环境存在一定的潜在威胁.

4种不同用地类型的生物滞留设施中,博大停车场及科创十七街的污染风险等级更高,两个设施所有的采样点污染水平均处于中度污染以上等级,其中,博大停车场60%的采样点,科创十七街50%

的采样点的综合污染指数处于重度污染等级,而紫荆雅园仅25%处于重度污染,25%处于中度污染.百世金谷产业园区由于企业入住率较低,且大都为高新企业,因此污染水平较低,采样点均处于轻度污染或尚清洁水平.可以看出,不同用地类型的污染程度存在较大的差异,用地类型会直接影响生物滞留设施中重金属的种类与含量,一般来说,居民区的污染程度要远低于道路、停车场以及产业园区等地区.

2.3.2 潜在生态风险评价

在分析了内梅罗综合指数的基础上,为探究生物滞留设施的生态风险现状,采用Hakanson潜在生态风险评价方法对4种生物滞留设施潜在生态风险进行了分析(如图10).可以看出,不同重金属的生态风险指数不同,重金属As、Cd、Cr、Pb、Cu、Ni和Zn基本处于轻度生态风险,而Hg的生态风险远高于其他重金属,其中13%的采样点处于极强生态风险,44%处于很强生态风险,25%处于强生态风

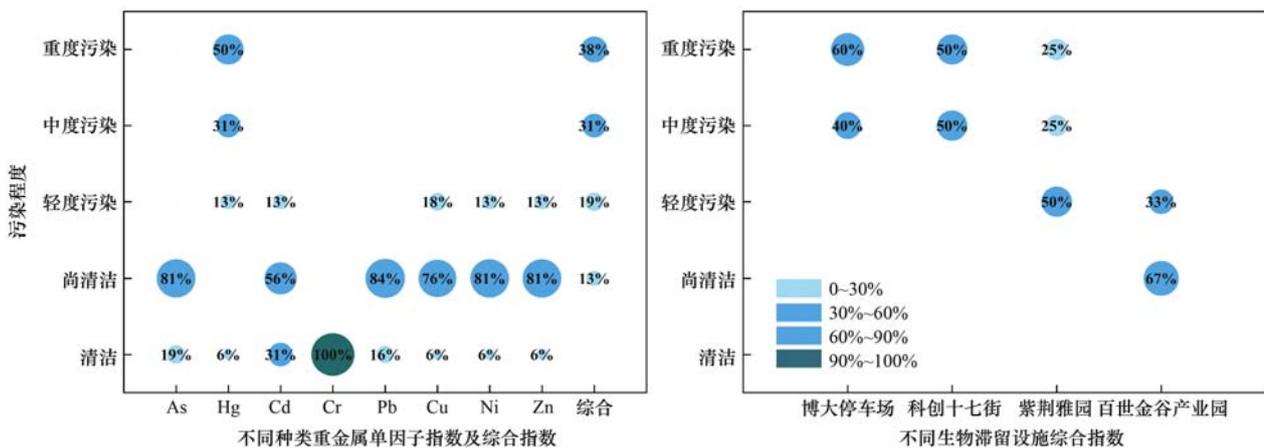


图 9 4类生物滞留设施不同重金属内梅罗指数

Fig. 9 Nemerow index of heavy metals in four bioretention systems

险,仅 6% 处于轻度生态风险. 受到 Hg 污染的影响, 6% 采样点的综合指数处于很强的生态风险, 25% 处于强生态风险,这与内梅罗综合指数的评价结果较为一致. 而 4 种不同用地类型的生物滞留设施中, 博大停车场和科创十七街的生态风险远高于紫荆雅园和百世金谷产业园区, 其中博大停车场中 20% 采样点处于很强生态风险, 20% 处于强生态风险, 科创十七街 50% 处于强生态风险, 而紫荆雅园和百世

金谷产业园基本处于中等风险及轻度风险. 从内梅罗综合指数以及 Hakanson 潜在生态风险综合指数可以看出,汞是造成生态风险增加的主要污染物,其来源可能为垃圾焚烧发电厂、工业燃煤和生活燃煤等过程中所产生的污染. 而 4 种生物滞留设施由于用地类型不同,汞污染的程度也不相同,居民区的污染显著低于道路旁、停车场等区域,对汞污染的控制是降低生态风险的关键.

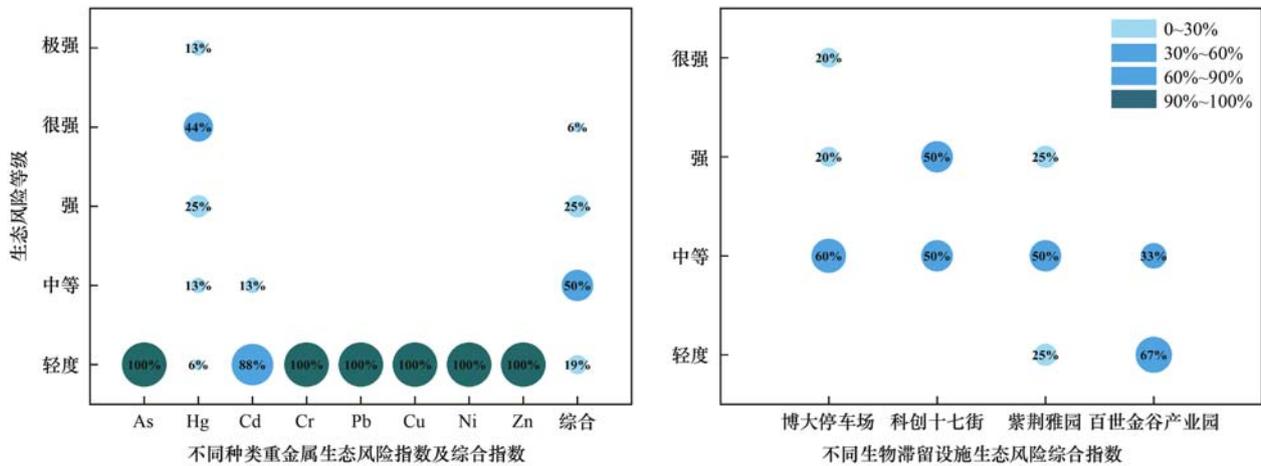


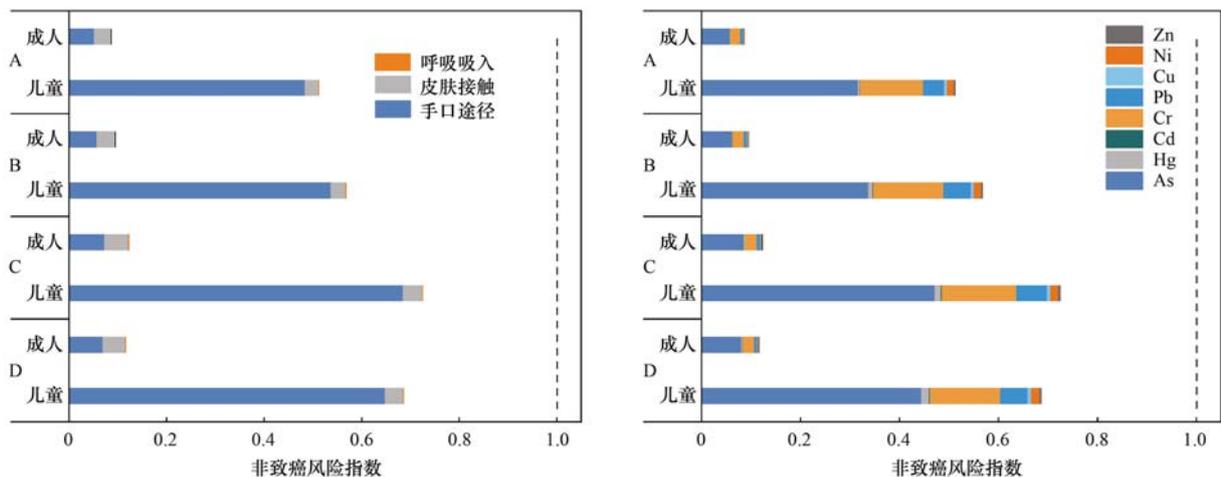
图 10 4 类生物滞留设施不同重金属生态风险指数

Fig. 10 Hakanson potential ecological index of heavy metals in four bioretention systems

2.3.3 人体健康风险评价

参考 EPA 的规定以及我国相关的研究,HI 值越大,对人体产生的非致癌风险健康风险程度越高,若 HI 大于 1,表示存在潜在人体健康风险^[45]. 对 4 种不同用地类型生物滞留设施中儿童和成人的非致癌风险进行了分析,如图 11 所示. 可以看出,虽然 4 类生物滞留设施的儿童、成人的总非致癌风险指数 HI 均小于 1,但儿童的非致癌风险均远高于成人,且 HI 接近 1.0,表明存在一定的非致癌风险. 这与前人

的研究相一致. 有研究发现,在同等浓度的污染物暴露下,儿童由于其体重轻、免疫力低且新陈代谢快等身体特征而具有更高的敏感性^[46]. 另外,博大停车场和科创十七街儿童和成人的非致癌风险均高于紫荆雅园以及百世金谷产业园,这是由于不同用地类型的生物滞留设施的重金属污染浓度、种类及来源存在很大差异. 从摄入途径上看,成人与儿童均为:手口途径 > 皮肤吸入 >> 呼吸吸入,且儿童来自于手口途径的比例更高,也是非致癌风险指数高于成



A 表示百世金谷产业园, B 表示武夷花园紫荆雅园居民区, C 表示科创十七街道路旁, D 表示博大停车场,下同

图 11 4 类生物滞留设施非致癌风险指数

Fig. 11 Non-carcinogenic risk index of heavy metals in four bioretention systems

人的主要因素,这与儿童喜欢室外活动和吮指等生活习性有关^[47,48].从重金属种类来看,As、Cr、Pb 对非致癌风险的贡献较大,尤其是As,这与生物滞留设施表面累积的As含量较高有关.

对设施中重金属的致癌风险进行进一步分析,如图12所示.当区域土壤重金属致癌风险值 $CR < 10^{-6}$,则认为该区域重金属致癌风险水平是人体可接受的,当 $10^{-6} < CR < 10^{-4}$,则该区域土壤存在一定的致癌风险;若 $CR > 10^{-4}$,则该区域土壤重金属污染对人体健康的影响较大^[49].4类生物滞留设施的土壤重金属致癌风险值均在 $10^{-6} < CR < 10^{-4}$ 范围内,其中,As贡献了90%以上的致癌风险,具有一定的致癌风险.与非致癌风险不同,成人和儿童的致癌风险较为相近,而设施当中,博大停车场以及科创十七街的致癌风险仍然高于紫荆雅园及百世金谷产业园区.综合非致癌风险和致癌风险评价结果,可以看出As是人体健康风险的主要风险因子,应当加强对生物滞留设施As污染的控制.

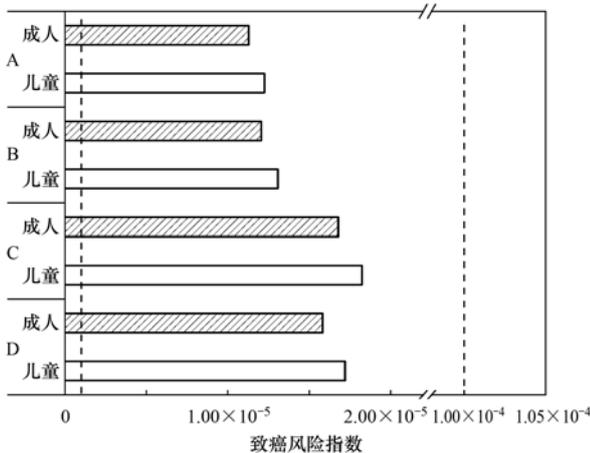


图12 4类生物滞留设施致癌指数

Fig. 12 Carcinogenic risk index of heavy metals in four bioretention systems

3 运行管理建议

由生物滞留设施表面重金属含量分析,以及生

态风险和人体健康风险的评价结果表明,Hg和As是4类生物滞留设施生态风险和人体健康风险的主要威胁,且不同用地类型的污染物累积含量和风险等级存在较大差异.生物滞留设施运行管理维护方法及频率的选取、污染物累积削减和控制应考虑生物滞留设施的用地类型,可通过超富集植物种植、表层土壤更换以及高效填料使用等手段能够有效削减重金属尤其是汞和砷的累积,降低生态及人体健康风险,延长使用年限,促进生物滞留设施有效地发挥其“绿色功能”.

3.1 超富集植物的种植

超富集植物的种植可以吸收超过一般植物100倍以上的重金属污染物,通过定期收割可有效地降低设施中的重金属累积含量,降低生态风险和人体健康风险.有研究表明,超富集植物如蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)等能够有效富集土壤中的Hg和As污染物^[50],陈同斌等^[51]的研究发现,在 $\omega(\text{As})$ 为 $9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤中,蜈蚣草地下部分和地上部分对As的生物富集系数分别高达71和80,其叶片的As富集量可高达 $5070 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;钱晓莉^[52]的研究发现,蜈蚣草具有较强的Hg富集能力,根部和地上部分的Hg富集量分别达 $(130 \pm 9.4) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(70 \pm 39) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高出节节草、酸模和白茅等其它Hg耐性植物1~2个数量级.除蜈蚣草外,部分超富集植物也被发现可以同时富集多种重金属(表10),能够适应生物滞留设施多种重金属污染物共存的环境,满足同时去除多种重金属污染物的需求,如东南景天(*Sedum alfredii* Hance)能够同时超富集Cd、Zn和Co,富集Pb,并具有高浓度Cu强耐性^[53,54];柔毛堇菜(*Viola principis* H. de Boiss)能够超富集Cd、Pb和As^[55,56];宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)能够超富集Cd和Pb,富集Zn、Cu和Fe^[57,58].考虑到种植成本及景观效果,在重金属污染较为严重的生物滞留设施中,可按照气温、降雨量等气候条件选取适合的多金属超富集植物,与景观作物搭配种植,待

表10 多重金属超富集植物^[11]

Table 10 Summary of multi-metal hyperaccumulators

序号	植物种类	富集的多重金属	文献
1	东南景天(<i>Sedum alfredii</i> Hance)	超富集Cd、Zn和Co,富集Pb,高浓度Cu强耐性	[53,54]
2	柔毛堇菜(<i>Viola principis</i> H. de Boiss)	超富集Cd、Pb和As	[55,56]
3	宝山堇菜(<i>Viola baoshanensis</i>)	超富集Cd和Pb,富集Zn、Cu和Fe	[57,58]
4	蜈蚣草(<i>Pteris vittata</i> L.)	超富集As,富集Pb和Sb,Zn强耐性	[55,59]
5	三叶鬼针草(<i>Bidens pilosa</i> L.)	超富集Cd和Pb	[60,61]
6	秃疮花属(<i>Dicranostigma</i>)	超富集Pb、Zn和Cd	[62]
7	李氏禾(<i>Leersia hexandra</i> Swartz)	超富集Cr,富集Cu	[63,64]
8	圆锥南芥(<i>Arabis paniculata</i> L.)	超富集Pb、Zn和Cd	[65,66]
9	斑茅幼叶[<i>Saccharum arundinaceum</i> (Retz.) Jeswiet]	超富集Cu,富集Zn、Pb和Cd	[67]
10	匍匐南芥(<i>Arabis alpina</i>)	超富集Pb和Zn	[68,69]

生物滞留设施污染物水平降至无风险状态,即可停止超富集植物的种植。

3.2 更换表层土壤

Hg 和 As 的污染一般来源于燃煤、冶金和交通等,近年来随着采石场的陆续关闭、工业及农村的燃煤锅炉改造、煤改气等措施的使用,污染已经有所降低,但是土壤中可能残存着一定的污染物。有研究表明,土壤重金属的累积含量随着土壤深度的增加显著降低^[70,71],并且生物滞留设施表层土壤污染物暴露于人体的途径和可能性要显著高于底层土壤,因此可通过表层土壤的更换来降低生物滞留设施重金属污染物的含量,从而降低生态风险和人体健康风险,更换的深度和频率可结合当地的污染状况进行确定。

3.3 高效填料的使用

有研究表明,部分性能优异的填料由于本身粒径、化学组分和孔隙度等性质,不仅能够高效去除雨水径流中的重金属污染物,还能够促进微生物,植物对于重金属污染物的吸收,从而降低生物滞留设施土壤介质中重金属污染物的累积^[72],但目前相关的研究较少,仍需对内在的机制进行进一步地探究。

4 结论

(1)8 种重金属中 As 和 Hg 的含量分别达到了背景值的 1.26 和 5.21 倍。博大停车场及科创十七街道路旁生物滞留设施中的 8 种重金属的累积含量均远远高于紫荆雅园居民区和百世金谷产业园区。相关性分析表明,8 种重金属含量均与土壤有机质含量呈现较强正相关,除 Hg 外均与土壤 pH 值呈现正相关,除 As 外与磷含量呈现正相关。

(2)内梅罗综合指数以及潜在生态风险指数的分析结果表明,除 Hg 之外的其他 7 种重金属 As、Cd、Cr、Pb、Cu、Ni 和 Zn 的污染水平及生态风险较低,Hg 对土壤环境存在一定的潜在威胁;博大停车场和科创十七街的污染水平及生态风险均远高于紫荆雅园和百世金谷产业园区。

(3)人体健康风险评价结果表明,儿童的非致癌风险均远高于成人,且 HI 接近 1,存在一定的非致癌风险,暴露途径上,手口途径 > 皮肤吸入 >> 呼吸吸入,As、Cr、Pb 对非致癌风险的贡献较大。博大停车场以及科创十七街的致癌风险均高于紫荆雅园及百世金谷产业园区。综合考虑非致癌风险和致癌风险评价结果,可以看出 As 是人体健康风险的主要风险因子,应当加强对生物滞留设施 As 污染的控制。

(4)运行管理上,可通过超富集植物种植、表层

土壤更换以及高效填料使用等手段能够有效削减重金属尤其是 As 和 Hg 的累积,降低生态及人体健康风险,延长使用年限。

致谢:在采样和实验样品分析中得到北京建筑大学宫永伟教授、北京市环境保护科学研究院李国傲和朱慧敏等大力协助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 陈垚,李欣芮,郑爽,等. 前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 263-273.
Chen Y, Li X R, Zheng S, et al. Influence of antecedent dry days on nitrogen removal in bioretention systems [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 263-273.
- [2] Xiong J Q, Zhou J J, Li J Q, et al. Removal of nitrogen from rainwater runoff by bioretention cells filled with modified collapsible loess [J]. Ecological Engineering, 2020, 158, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.106065.
- [3] 李芬芬,蔡志文,冯萃敏,等. 生物滞留池处理径流雨水的研究现状与展望[J]. 应用化工, 2021, 50(2): 455-460.
Li F F, Cai Z W, Feng C M, et al. Research status and prospect of bioretention to treatment runoff rainwater [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(2): 455-460.
- [4] 徐宇婕,龚明敏,毕军鹏,等. 宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3275-3284.
Xu Y J, Gong Y M, Bi J P, et al. Analysis of rainwater runoff pollution characteristics of various typical underlying surfaces in Ningbo [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3275-3284.
- [5] 陈梦瑶,杜晓丽,于振亚,等. 北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1709-1715.
Chen M Y, Du X L, Yu Z Y, et al. Characteristics of chemical fractions of dissolved organic matter in road runoff in Beijing [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1709-1715.
- [6] 林修咏,王书敏,李强,等. 防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4539-4546.
Lin X Y, Wang S M, Li Q, et al. Water quality and three-dimensional fluorescence of stormwater runoff from lined bioretention field cells [J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4539-4546.
- [7] 宫曼莉,左俊杰,任心欣,等. 透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4096-4104.
Gong M L, Zuo J J, Ren X X, et al. Evaluation of effect of urban non-point source pollution control on porous asphalt-bioretention combined roads [J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4096-4104.
- [8] Li H, Davis A P. Heavy metal capture and accumulation in bioretention media [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(14): 5247-5253.
- [9] 李立青,刘雨情,杨佳敏,等. 生物滞留对城市地表径流磷的去除途径[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3150-3157.
Li L Q, Liu Y Q, Yang J M, et al. Urban runoff phosphorus removal pathways in bioretention systems [J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3150-3157.
- [10] 李立青,胡楠,刘雨情,等. 3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 1881-1888.
Li L Q, Hu N, Liu Y Q, et al. Effects of three bioretention

- configurations on dissolved nitrogen removal from urban stormwater[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1881-1888.
- [11] Chu Y Y, Yang L, Wang X C, *et al.* Research on distribution characteristics, influencing factors, and maintenance effects of heavy metal accumulation in bioretention systems: critical review[J]. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2021, **7**(2), doi: 10.1061/JSWBAY.0000930.
- [12] Costello D M, Hartung E W, Stoll J T, *et al.* Bioretention cell age and construction style influence stormwater pollutant dynamics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135597.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [16] 熊秋林, 赵佳茵, 赵文吉, 等. 北京市地表土重金属污染特征及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2211-2221.
Xiong Q L, Zhao J Y, Zhao W J, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in topsoil of Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2211-2221.
- [17] 白冬锐, 张涛, 包峻松, 等. 苏州古城区河道底泥的重金属污染分布及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3206-3214.
Bai D R, Zhang T, Bao J S, *et al.* Pollution distribution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3206-3214.
- [18] 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 等. 雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an new district[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [19] 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.
- [20] 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, Lü 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.
- [21] 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 等. 北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 997-1003.
Zhang X, Zhao X M, Meng X J, *et al.* Particle size distribution and human health risk assessment of heavy metals in atmospheric particles from Beijing and Xinxiang during summer[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 997-1003.
- [22] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1991, **12**(4): 12-19.
Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. *Environmental Science*, 1991, **12**(4): 12-19.
- [23] 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 等. 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3913-3923.
Tang S Q, Liu X J, Yang K, *et al.* Migration, transformation characteristics, and ecological risk evaluation of heavy metal fractions in cultivated soil profiles in a typical carbonate-covered area[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3913-3923.
- [24] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 117-122.
Chen T B, Zheng Y M, Chen H, *et al.* Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(1): 117-122.
- [25] 李春兰, 徐谦. 北京土壤中汞的背景值及其区域差异[J]. *环境科学丛刊*, 1984, (9): 49-55.
- [26] 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 等. 基于PCA/APCS和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(6): 1014-1022.
Chen D Q, Xie Z Y, Zhang Y J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(6): 1014-1022.
- [27] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖流域大气降尘重金属的污染和健康风险[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(6): 1645-1653.
Zhang Z Y, Jilili A, Jiang F Q. Pollution and potential health risk of heavy metals in deposited atmospheric dusts in Ebinur Basin, northwest China[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1645-1653.
- [28] 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 等. 民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1502-1511.
Yan Q, Kong S F, Liu H B, *et al.* Emission factors of heavy metals in size-resolved particles emitted from residential coal combustion[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1502-1511.
- [29] 张成, 张雅惠, 王永敏, 等. 重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 495-501.
Zhang C, Zhang Y H, Wang Y M, *et al.* Chaeacteeistics of meecuey emissions feom coal-fieed powee plants in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 495-501.
- [30] 张萌. 太原市大气PM_{2.5} 砷、汞及PAHs的污染特征研究[D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [31] 黄连喜, 魏岚, 姚丽贤, 等. 洛克沙酮代谢物在土壤中的累积及其植物有效性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(5): 1079-1088.
Huang L X, Wei L, Yao L X, *et al.* Accumulation of roxarsone metabolites in soil and availability to plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(5): 1079-1088.
- [32] 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 等. 典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4455-4461.
Zhang J S, Wu J H, Lü R H, *et al.* Influence of typical desulfurization process on flue gas particulate matter of coal-fired

- boilers [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (10): 4455-4461.
- [33] 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 等. 超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征[J]. *环境科学*, 2020, **41** (1): 98-105.
Wang R F, Ma D W, Jiang S Y, *et al.* Fine particulate emission characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (1): 98-105.
- [34] 杜晓丽, 梁卉, 朱英杰, 等. 博大大厦停车场生物滞留系统重金属累积污染风险评价[J]. *环境工程*, 2019, **37** (7): 93-98.
Du X L, Liang H, Zhu Y J, *et al.* Risk assessment of heavy metals in bioretention of the parking lot of Boda mansion [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37** (7): 93-98.
- [35] Ozaki H, Watanabe I, Kuno K. As, Sb and Hg distribution and pollution sources in the roadside soil and dust around Kamikochi, Chubu Sangaku National Park, Japan [J]. *Geochemical Journal*, 2004, **38** (5): 473-484.
- [36] 钱建平, 张力, 张爽, 等. 桂林市公路大气-土壤-生物系统汽车尾气汞污染研究 [A]. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第 14 届学术年会论文摘要专刊 [C]. 南京: 《高校地质学报》编辑部, 2013. 472-473.
- [37] Won J H, Park J Y, Lee T G. Mercury emissions from automobiles using gasoline, diesel, and LPG [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41** (35): 7547-7552.
- [38] 张起源, 刘谓承, 赵建刚, 等. 广东沿海沉积物重金属含量及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38** (12): 4653-4660.
Zhang Q Y, Liu X C, Zhao J G, *et al.* Contents and risk assessment of heavy metal sediments in Guangdong coastal areas [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38** (12): 4653-4660.
- [39] Johnson J P, Hunt W F. Evaluating the spatial distribution of pollutants and associated maintenance requirements in an 11 year-old bioretention cell in urban Charlotte, NC [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **184**: 363-370.
- [40] Paus K H, Morgan J, Gulliver J S, *et al.* Assessment of the hydraulic and toxic metal removal capacities of bioretention cells after 2 to 8 Years of service [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, **225** (1), doi: 10.1007/s11270-013-1803-y.
- [41] 王成文, 许模, 张俊杰, 等. 土壤 pH 和 Eh 对重金属铬(VI)纵向迁移及转化的影响 [J]. *环境工程学报*, 2016, **10** (10): 6035-6041.
Wang C W, Xu M, Zhang J J, *et al.* Influence of soils pH and Eh on vertical migration and transformation of Cr(VI) [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10** (10): 6035-6041.
- [42] 陈楠. 土壤 pH 对镉在土壤—水稻系统中的迁移、积累与分布的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
- [43] Chu Y Y, Zhang X Y, Yu X F, *et al.* Antimony removal by a magnetic TiO₂/SiO₂/Fe₃O₄ nanosphere and influence of model dissolved organic matter [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.cej.2021.129783.
- [44] Rózański S Ł, Castejón J M, Fernández G G. Bioavailability and mobility of mercury in selected soil profiles [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75** (13), doi: 10.1007/s12665-016-5863-3.
- [45] 常静. 城市地表灰尘—降雨径流系统污染物迁移过程与环境效应 [D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [46] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuijp 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.
- [47] Chabukdhara M, Nema A K. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **87**: 57-64.
- [48] Ma J, Pan L B, Wang Q, *et al.* Estimation of the daily soil/dust (SD) ingestion rate of children from Gansu Province, China via hand-to-mouth contact using tracer elements [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40** (1): 295-301.
- [49] 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 等. 电镀厂周边环境中重金属分布特征及人体健康暴露风险评价 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (9): 3447-3456.
Guo P R, Lei Y Q, Zhou Q L, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in environmental samples around electroplating factories and the health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (9): 3447-3456.
- [50] 刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (8): 3056-3061.
Liu Q X, Yan X L, Liao X Y, *et al.* Effects of soil moisture on phytoremediation of As-contaminated soils using As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (8): 3056-3061.
- [51] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征 [J]. *科学通报*, 2002, **47** (3): 207-210.
- [52] 钱晓莉. 典型汞矿区耐性植物及汞富集机制研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [53] Xv L L, Ge J, Tian S K, *et al.* A Cd/Zn Co-hyperaccumulator and Pb accumulator, *Sedum alfredii*, is of high Cu tolerance [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114401.
- [54] Yang X E, Long X X, Ye H B, *et al.* Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance) [J]. *Plant and Soil*, 2004, **259** (1-2): 181-189.
- [55] Wan X M, Lei M, Yang J X. Two potential multi-metal hyperaccumulators found in four mining sites in Hunan Province, China [J]. *CATENA*, 2017, **148**: 67-73.
- [56] Lei M, Chen T B, Huang Z C, *et al.* Simultaneous compartmentalization of lead and arsenic in co-hyperaccumulator *Viola principis* H. de Boiss.: an application of SRXRF microprobe [J]. *Chemosphere*, 2008, **72** (10): 1491-1496.
- [57] 张军, 陈功锡, 杨兵, 等. 宝山堇菜多金属吸收特征和耐性策略 [J]. *生态环境学报*, 2011, **20** (6-7): 1133-1137.
Zhang J, Chen G X, Yang B, *et al.* Multi-metal uptake properties and tolerance strategies of *Viola baoshanensis* [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20** (6-7): 1133-1137.
- [58] Wu C, Liao B, Wang S L, *et al.* Pb and Zn accumulation in a Cd-hyperaccumulator (*Viola baoshanensis*) [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2010, **12** (6): 574-585.
- [59] 谢景千, 雷梅, 陈同斌, 等. 蜈蚣草对污染土壤中 As、Pb、Zn、Cu 的原位去除效果 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30** (1): 165-171.
Xie J Q, Lei M, Chen T B, *et al.* Phytoremediation of soil co-contaminated with arsenic, lead, zinc and copper using *Pteris vittata* L.: a field study [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30** (1): 165-171.
- [60] 湛金吾, 孙一铭, 王凤英, 等. 三叶鬼针草毛状根的诱导及其对重金属 Cd、Pb 蓄积 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35** (5): 1596-1602.
Chen J W, Sun Y M, Wang F Y, *et al.* Induction and

- accumulation of cadmium and lead by hairy root of *Bidens pilosa* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1596-1602.
- [61] 王天顺, 陈伟, 蒋文艳, 等. 螯合剂对鬼针草 Cd、Zn、Pb 和 Cu 吸收累积的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, **32**(8): 1932-1937.
- Wang T S, Chen W, Jiang W Y, *et al.* Effects of chelators on uptake and accumulation of Cd, Zn, Pb and Cu in *Bidens pilosa* L. [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, **32**(8): 1932-1937.
- [62] 石润, 吴晓芙, 李芸, 等. 应用于重金属污染土壤植物修复中的植物种类[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, **35**(4): 139-146.
- Shi R, Wu X F, Li Y, *et al.* Plant species applied in phytoremediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, **35**(4): 139-146.
- [63] 张学洪, 陈俊, 李海翔, 等. 铬超富集植物李氏禾对铜的富集特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(2): 521-524.
- Zhang X H, Chen J, Li H X, *et al.* Characteristics of copper uptake by Cr-hyperaccumulator *Leersia hexandra* Swartz [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(2): 521-524.
- [64] 陈俊, 王敦球, 张学洪, 等. 李氏禾修复重金属 (Cr Cu Ni) 污染水体的潜力研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(4): 1514-1518.
- Chen J, Wang D Q, Zhang X H, *et al.* The ability of *Leersia hexandra* swartz to remediate heavy metals (Cr, Cu, Ni) contaminated waters[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(4): 1514-1518.
- [65] Tang Y T, Qiu R L, Zeng X W, *et al.* A new found Pb/Zn/Cd hyperaccumulator-*Arabis paniculata* L. [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, **44**(4): 135-136.
- [66] Zeng X W, Ma L Q, Qiu R L, *et al.* Responses of non-protein thiols to Cd exposure in Cd hyperaccumulator *Arabis paniculata* Franch[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, **66**(2): 242-248.
- [67] 黄红英, 徐剑, 白音, 等. 不同土壤生境下斑茅对重金属的富集特征[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(4): 961-966.
- Huang H Y, Xu J, Bai Y, *et al.* Enrichment of heavy metals in *Saccharum arundinaceum* (Retz.) Jeswiet in different soil habitats[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 961-966.
- [68] Sharma V K, Li X Y, Wu G L, *et al.* Endophytic community of Pb-Zn hyperaccumulator *Arabis alpina* and its role in host plants metal tolerance[J]. *Plant and Soil*, 2019, **437**(1-2): 397-411.
- [69] Li Z R, Colinet G, Zu Y Q, *et al.* Species diversity of *Arabis alpina* L. communities in two Pb/Zn mining areas with different smelting history in Yunnan Province, China[J]. *Chemosphere*, 2019, **233**: 603-614.
- [70] 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.
- [71] Gilbreath A, McKee L, Shimabuku I, *et al.* Multiyear water quality performance and mass accumulation of PCBs, mercury, methylmercury, copper, and microplastics in a bioretention rain garden [J]. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2019, **5**(4), doi: 10.1061/JSWBAY.0000883.
- [72] 汤民, 张进忠, 张丹, 等. 土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3569-3576.
- Tang M, Zhang J Z, Zhang D, *et al.* *In situ* immobilization of Pb and Cd in orchard soil using soil ameliorants[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3569-3576.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)