

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价

李军^{1,2}, 李开明^{1*}, 王晓槐¹, 焦亮², 臧飞³, 毛潇萱⁴, 杨云钦¹, 台喜生¹

(1. 兰州城市学院城市环境学院, 兰州 730070; 2. 西北师范大学甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070; 3. 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020; 4. 兰州大学资源环境学院甘肃省环境污染预警与控制重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 为研究城市滨河公园景区地表积尘和周边绿地土壤重金属污染状况及潜在生态风险和健康风险, 选择兰州市黄河风情线沿线的游园、广场和主题公园为研究区, 分别采集了 27 个地表积尘和 26 个周边绿地表土样品。采用地累积指数(I_{geo})、单因子污染指数(P_i)、内梅罗综合污染指数(P_N)和改进的潜在生态风险指数(RI)评估 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 这 8 种重金属污染特征和潜在生态风险程度, 并利用暴露风险模型进行健康风险评价。结果表明, 研究区地表积尘和周边绿地土壤 As 含量的平均值略低于甘肃省土壤元素背景值, 但地表积尘的其余元素均高于甘肃省和兰州市元素背景值, 而周边绿地除 Cr 和 Ni 元素略低于甘肃省和兰州市的背景值之外, 其余 Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 含量的平均值却高于两者的背景值。地累积指数和单因子污染指数显示, 研究区地表积尘受到 Cr、Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 的污染, 沿途绿地土壤存在不同程度的 Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 的污染。内梅罗综合污染指数表明, 研究区地表积尘和周边绿地土壤的综合污染程度为轻度至重度污染。潜在生态风险指数表明, 研究区地表积尘和周边绿地土壤的主要潜在生态危害元素是 Cd 和 Hg, 其余元素的潜在生态风险指数值均低于 40, 为轻微生态危害。健康风险评估显示, 手口摄入是研究区地表积尘和周边绿地土壤重金属暴露的最主要途径, 且对成人和儿童均不构成非致癌和致癌健康风险。

关键词: 积尘; 土壤; 重金属污染; 生态风险; 健康风险; 黄河风情线

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3475-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202206166

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

LI Jun^{1,2}, LI Kai-ming^{1*}, WANG Xiao-huai¹, JIAO Liang², ZANG Fei³, MAO Xiao-xuan⁴, YANG Yun-qin¹, TAI Xi-sheng¹

(1. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 4. Key Laboratory for Environmental Pollution Prediction and Control, Gansu Province, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to investigate the contamination levels of dust and its surrounding green land soil heavy metal pollution and potential ecological and health risks in the scenic areas of urban waterfront parks, the gardens, squares, and theme parks of the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou were selected as the research area, using 27 dust samples and 26 soil samples from its surrounding green lands. The contamination characteristics and potential ecological risks of eight heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, and Pb) were evaluated using the geo-accumulation index (I_{geo}), single-factor pollution index (P_i), Nemerow integrated pollution index (P_N), and improved potential ecological risk index (RI). The human health risk assessment was also evaluated using the exposure risk model. The results showed that the average concentrations of the other heavy metals in the surface dusts were higher than the background values of Gansu Province and Lanzhou City, except that the As mean concentrations in the surface dusts and the surrounding green land soils were slightly lower than the Gansu Province background values. For its surrounding green land soils, the mean concentrations of the other heavy metals (Cu, Zn, Cd, Hg, and Pb) exceeded the soil background values of Gansu Province and Lanzhou City, whereas the Cr and Ni mean concentrations were lower than their corresponding soil background values of Gansu Province and Lanzhou City. The geo-accumulation and single-factor pollution indices demonstrated that a slight to moderate pollution of Cr, Cu, Zn, Cd, Hg, and Pb occurred in surface dusts, and Cu, Zn, Cd, Hg, and Pb appeared in varying degrees of contamination levels in its surrounding green land soils. The Nemerow integrated pollution index analysis manifested that the overall contamination status of the study areas was between slightly and heavily polluted. The potential ecological risk index suggested that Cd and Hg were recognized as significant pollutant elements and that the RI of the other heavy metals were all below 40, presenting slight ecological risk. The health risk assessment indicated that ingestion was the dominant exposure pathway for heavy metals from the surface dusts and the surrounding green land soils, and no carcinogenic and noncarcinogenic risks posed threats to adults and children.

Key words: dusts; soils; heavy metal pollution; ecological risk; health risk; Yellow River Custom Tourist Line

城市道路地表积尘和土壤重金属污染及其人体健康风险评价是当前环境地球科学领域研究的热点问题之一^[1,2]。受工业和交通等人类频繁活动的影响, 城市地表积尘和土壤扬尘是引起城市环境污染问题最广泛的重要污染物载体, 特别是重金属污染

收稿日期: 2022-06-14; 修订日期: 2022-07-26

基金项目: 甘肃省科技计划项目(21JR1RA319); 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室开放课题项目(GORS202102); 国家自然科学基金项目(41661014)

作者简介: 李军(1984~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤重金属污染与评价, E-mail: lijunrock@163.com

* 通信作者, E-mail: lkm_wd@126.com

问题^[3,4]. 携带重金属元素的地表积尘或土壤扬尘经手口摄入、呼吸吸入或皮肤接触等主要暴露途径进入人体, 直接对人体健康造成危害^[5,6]. 因此, 开展当前及未来社会发展情境下城市地表积尘及土壤重金属污染与人体健康风险评估研究, 既可为提升公众及政府对人体健康风险的防范能力和环境与健康相关政策的制定提供科学依据, 又对保障区域生态安全、公众健康和维持社会可持续发展具有重要现实意义.

城市旅游景区属于典型的人群密集公众场所. 特别是在旅游旺季, 高度密集和快速流动的人群所引起的地表扬尘是可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($PM_{2.5}$)、气态污染物和病原微生物等有毒物质的重要载体^[7], 对景区公共生态安全与人员健康均存在潜在的健康风险. 当前, 虽然已有国内外学者开展了四川省九寨沟景区^[8]、泰山景区^[9]、黄山景区^[10,11]、西湖景区^[12]、喀纳斯景区^[13]、波兰奥伊楚夫国家公园^[14]和伊拉克库尔德斯坦 Halgurd-Sakran 国家公园^[15]等著名国家自然保护区或郊外旅游景区的道路积尘和土壤重金属污染与评价的相关研究, 但与丰富的城市矿区^[16]、工业园区^[17]及其遗址^[18]、农田^[19]、公园^[20,21]和学校^[22,23]等地表积尘和土壤重金属污染与评价研究相比, 有关旅游景区的研究仍相对较少, 特别是与城市滨河公园景区道路地表积尘和沿途绿地土壤的重金属污染风险评价相结合的研究较为缺乏.

黄河风情线是兰州市的核心景区, 也是目前中国最大的开放式城市滨河公园. 近年来, 随着黄河风情线观光旅游业的蓬勃发展, 景区沿线交通繁忙, 游

客人数日益增加, 商业活动愈发频繁. 不断加剧的人类活动对黄河风情线沿线生态环境造成了一定的影响. 为此, 本研究通过探究黄河风情线沿线地表积尘及周边绿地土壤中能够引起环境污染且具有生物毒性及对人类健康具有潜在危害的 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的含量、污染状况及其潜在生态风险和人体健康风险, 旨在为保障兰州黄河风情线游客的绿色出行和身体健康、守护黄河风情线沿线生态环境和建设绿色生态旅游城市提供科学依据与支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兰州市($35^{\circ}58' \sim 37^{\circ}02'N$, $102^{\circ}58' \sim 104^{\circ}57'E$)位于中国西部的甘肃省, 是黄河穿城而过的唯一省会城市. 兰州市属于温带大陆性气候, 年主导风向为西北风, 年均温度为 $11.1^{\circ}C$, 年均降水量为 $341.2 mm$ ^[24]. 分布在黄河兰州段南北两岸的黄河风情线核心段西起兰州市西固区, 东至兰州市城关区, 全长 $47.5 km$. 沿途建设有音乐喷泉和游览健身步道等旅游设施, 并串联了中山铁桥、黄河母亲雕塑、龙源和水车博览园等广场、游园和主题公园(图 1). 沿线种植有常绿草坪, 银杏和针叶松等阔叶乔木, 金叶女贞和紫叶矮樱等小灌木及丰花月季和丁香等花卉, 形成了乔木成林、灌木成丛和花卉成片的绿化格局. 黄河风情线因城市文明与自然风景完美交融, 被誉为兰州的“外滩”, 既是兰州市民文化娱乐和休闲健身的重要场所, 也是南来北往的游客观光旅游的主要目的地之一.

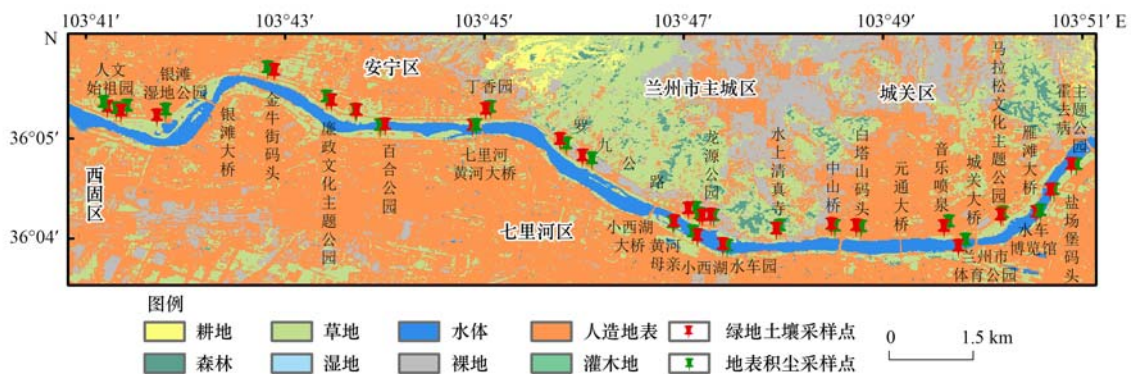


图 1 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of surface dusts and its surrounding greenbelt soil sampling sites in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

1.2 样品采集与实验分析

根据黄河风情线沿途游园、广场和主题公园的分布情况和人流量大小(图 1), 于 2021 年 7 月连续一周以上晴朗无风的天气之后, 进行样品的收集工

作. 采用“之”字形布点法, 利用塑料毛刷刷取黄河风情线人行步道及其石柱护栏上的积尘, 每个采样区域的积尘样品是由研究场地中人流量较大的 6 ~ 8 处刷取的样品混合而成, 约重 $250 g$, 之后密封于

标有采样时间、地点和样品编号的聚乙烯样品袋中.同时,采用“梅花形”布点法,利用木铲挖取 5 个相距 500 m 左右,深度为 0~20 cm 的附近绿地土壤样品,并混合为一个重约 2 kg 的样品.随之封装于布制样品袋中,并记录样品编号、采样地点、定位坐标和采样点植被等基本信息.共采集 27 个地表积尘和 26 个绿地土壤样品,具体采样点位置如图 1 所示.

将采集的积尘与土壤样品带回实验室,除去树叶残渣、瓦片碎石等杂物后,经自然风干、玛瑙研钵研磨等前处理过程之后,过 100 目的尼龙筛.之后利用 HNO₃-HF-HCl 混酸微波消解法消解待测样品,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo X Series 2, 美国)测定样品中的 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量,其检出限分别为:0.4、1.0、0.2、2.0、0.02 和 2.0 μg·g⁻¹.利用原子荧光光谱仪(XGY-1011A, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 中国)测定 As 和 Hg 的含量,其检出限分别为:0.2 μg·g⁻¹和 0.005 μg·g⁻¹.测试过程中加入国家标准土壤样品(GBW 07449)和空白样进行质量控制,各重金属元素的加标回收率在 90%~102%之间,质控平行样量为总样品量的 20%.重金属元素的分析测定在中国科学院长春应用化学研究所完成.

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法(index of geo-accumulation, I_{geo})

是德国科学家 Müller^[25]提出的一种定量评价沉积物中重金属污染程度的方法,后被广泛应用于土壤及灰尘重金属污染评价研究^[26].其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \times B_i)] \tag{1}$$

式中, C_i 和 B_i 分别为研究区样品重金属元素 i 的实测值和兰州土壤背景值,mg·kg⁻¹^[27]; K 为常数,通常取值 1.5.由 I_{geo} 值所对应的重金属污染等级如表 1 所示.

1.3.2 单因子指数法

单因子指数(P_i)法是一种可以全面反映土壤中各种重金属平均污染水平的方法^[28].其计算表达式为:

$$P_i = C_i / B_i \tag{2}$$

式中, P_i 和 C_i 分别为重金属元素 i 的单因子污染指数和实测值,mg·kg⁻¹; B_i 为重金属元素 i 的兰州市土壤背景值,mg·kg⁻¹^[27]. P_i 值所对应重金属的污染程度及等级情况如表 1 所示.

1.3.3 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数(P_N)法是一种可以全面反映土壤或沉积物中多种重金属平均污染水平的评价方法^[29].其计算公式为:

$$P_N = \sqrt{(P_{iave}^2 + P_{imax}^2) / 2} \tag{3}$$

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数; P_{iave} 和 P_{imax} 分别为重金属元素 i 的单因子污染指数平均值和最大值.由 P_N 值所对应的重金属污染等级如表 1 所示.

表 1 积尘与土壤重金属污染评价方法的分级标准¹⁾

Table 1 Classification criteria of heavy metal pollution assessment method in dusts and soils

评价方法	数值范围	污染程度	评价方法	数值范围	污染程度	评价方法	数值范围	污染程度
地累积指数 (I_{geo})	$I_{geo} \leq 0$	无污染	单因子指数 (P_i)	$P_i \leq 1$	无污染	内梅罗综合污染 指数(P_N)	$P_N \leq 0.7$	无污染
	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度污染		$1 < P_i \leq 2$	潜在污染		$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁污染
	$1 < I_{geo} \leq 2$	中度污染		$2 < P_i \leq 3$	轻度污染		$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
	$2 < I_{geo} \leq 3$	偏重污染		$3 < P_i \leq 6$	中度污染		$2.0 < P_N \leq 3.0$	中重污染
	$3 < I_{geo} \leq 4$	重度污染		$P_i > 6$	重度污染		$P_N > 3.0$	重度污染
	$I_{geo} > 4$	严重污染		—	—		—	—

1) “—”表示无相关内容或数据,下同

1.4 重金属污染风险评价方法

1.4.1 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(potential ecological risk index, RI)是瑞典科学家 Håkanson 基于多元素协同作用、重金属毒性水平、重金属污染浓度等因素提出的一种评价土壤或沉积物中重金属污染的方法^[30].其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times P_i \tag{4}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{5}$$

式中, P_i 为单因子污染指数,由公式(2)计算得出. E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数,本研究中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的参考值依次为 2、5、5、1、10、30、40 和 5^[31,32]. RI 为重金属总的潜在生态风险指数.为了保证评价结果的准确性和可靠性,本研究中 E_r^i 和 RI 的分级标准已根据重金属污染物的种类和数量进行了相应地改进与调整^[33].由 E_r^i 和 RI 的计算结果所对应的重金属污染等级如表 2 所示.

表 2 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属潜在生态风险水平的分级标准

Table 2 Classification division standard of heavy metal potential ecological risks in dusts and the surrounding greenbelt soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

评价方法	污染程度与数值范围				
	轻微风险	中等风险	较强风险	很强风险	极强风险
生态风险指数(E_i)	≤ 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
总潜在生态风险指数(RI)	≤ 110	110 ~ 220	220 ~ 440	—	> 440

1.4.2 健康风险评价法

参照美国国家环保署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)健康风险评价模型^[34],并结合我国的人群特点和场地特征修正风险评估参数^[35],对研究区附近的人群进行健康风险评价,评价主要分为暴露剂量计算和健康风险表征两个部分。

不同暴露途径下的暴露剂量计算公式分别如下所示:

$$CDI_{ing} = \frac{C_i \times IngR \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (6)$$

$$CDI_{inh} = \frac{C_i \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (7)$$

$$CDI_{derm} = \frac{C_i \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AF} \quad (8)$$

式中, CDI_{ing} 、 CDI_{inh} 和 CDI_{derm} 分别为手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径的重金属*i*的日均暴露量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, C_i 为重金属元素的实测量, $mg \cdot kg^{-1}$.公式(6)~(8)的其他参数含义及取值以及对于成人和儿童不同暴露途径摄入剂量相关暴露参数的定义及数值见表3。

表 3 不同暴露途径下的健康风险模型参数值^[35-37]

Table 3 Parameter values of health risk assessment under the different exposure pathways

参数	含义	单位	数值	
			成人	儿童
IngR	手-口摄入量(积尘)	$mg \cdot d^{-1}$	100	200
IngR	手-口摄入量(土壤)	$mg \cdot d^{-1}$	20	50
InhR	呼吸摄入量(积尘)	$m^3 \cdot d^{-1}$	14.5	7.5
InhR	呼吸摄入量(土壤)	$m^3 \cdot d^{-1}$	16	7.6
ED	暴露时间	a	24	6
EF	暴露频率	$d \cdot a^{-1}$	350	350
BW	平均体重	kg	56.8	15.9
AT	平均暴露时间(致癌)	d	365 × 70	
AT	平均暴露时间(非致癌)	d	365 × ED	
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.001	0.001
SA	皮肤暴露表面积	cm^2	5 075	2 448
AF	皮肤黏着度	$mg \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1}$	0.07	0.2
CF	单位转换因子	无量纲	1×10^{-6}	1×10^{-6}
PEF	悬浮颗粒沉降因子	$m^3 \cdot kg$	1.36×10^9	1.36×10^9

根据重金属元素的致癌性特征,可将健康风险表征分为非致癌风险和致癌风险.其中非致癌风险的计算公式为:

$$HI = \sum HQ_i = \sum_{i=1}^n CDI_i / RfD_i \quad (9)$$

式中,HI为非致癌风险指数,无量纲; HQ_i 为重金属*i*的非致癌风险指数,无量纲; RfD 为非致癌性重金属不同暴露途径的参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; *i*为某一种重金属元素; *n*代表重金属的数目.通常情况下,当 $HI \leq 1$ 时,不存在健康风险或风险较小;当 $1 < HI \leq 10$ 时,则存在非致癌健康风险;当 $HI > 10$ 时,表明存在慢性中毒^[36,37].

致癌风险的计算公式为:

$$CR = \sum R_i = \sum_{i=1}^n CDI_i \times SF_i \quad (10)$$

式中,CR为致癌风险指数,无量纲; R_i 为重金属*i*的致癌风险值,无量纲; SF 为致癌斜率因子, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; *n*为重金属的数目.一般而言,当 $CR < 10^{-6}$ 时,表明不存在致癌风险或风险较小;当 $10^{-6} \leq CR < 10^{-4}$ 时,表明是可接受的正常致癌风险;当 $CR \geq 10^{-4}$ 时,表明存在较高的致癌风险.不同重金属在不同暴露途径下的*RfD*和*SF*取值见表4。

1.5 数据处理与制图

采用SPSS 19.0和Microsoft Excel 2019进行土壤重金属含量的描述性统计及其污染指数和生态风

险指数的计算和分析,运用 Origin 2020b 和 ArcGIS 10.7 进行图件的绘制与编辑.

表 4 研究区重金属不同暴露途径下的 RfD 和 SF 参考值^[38]

Table 4 Values of reference dose for non-carcinogenic metals (RfD) and slope factors for carcinogenic metals (SF) under the different exposure pathways

元素	RfD _{手口}	RfD _{呼吸}	RfD _{皮肤}	SF _{手口}	SF _{呼吸}	SF _{皮肤}
Ni	2×10^{-2}	9×10^{-5}	5.40×10^{-3}	1.70	8.4×10^{-1}	4.25×10
Cu	4×10^{-2}	4×10^{-2}	1.20×10^{-2}	—	—	—
Zn	3×10^{-1}	3×10^{-1}	6×10^{-2}	—	—	—
Cd	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-5}	3.8×10^{-1}	6.30	3.8×10^{-1}
Pb	3×10^{-3}	3.52×10^{-3}	5.25×10^{-4}	8.50×10^{-3}	4.20×10^{-2}	—
Cr	3×10^{-3}	2.86×10^{-5}	6×10^{-5}	5×10^{-1}	4.02×10	2×10
As	3×10^{-4}	3×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.50	1.51×10	3.66
Hg	3×10^{-4}	8.57×10^{-5}	2.10×10^{-5}	—	—	—

2 结果与分析

2.1 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属描述统计特征

兰州市黄河风情线地表积尘和周边绿地土壤重金属测定结果如表 5 所示,地表积尘重金属 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 的平均值分别为: 78.75、36.17、54.33、246.53、12.30、1.36、0.07 和 65.77 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与甘肃省土壤元素背景值^[39]和兰州市土壤元素背景值^[27]相比,除 As 含量的平均值略低于甘肃省背景值之外,其余重金属含量的平均值均远高于两者的背景值,特别是 Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量的平均值是甘肃省和兰州市背景值的 2 倍以上(表 5),说明研

究区地表积尘存在一定程度的重金属超标. 重金属污染变异系数(coefficient of variance, CV)是衡量重金属元素在研究区域中分布均匀性和变异程度的统计量^[40],污染物变异系数越大,说明人类活动的参与度越高^[41]. 以 CV 值的大小为标准,可将土壤或积尘重金属变异性分为弱变异(0~15%)、中等变异(15%~35%)和高度变异(>36%)^[38]. 由表 5 可知,研究区地表积尘中各重金属的 CV 值由大到小依次为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Ni}$. 其中 Ni 和 As 属弱变异,表明它们的含量空间分布相对均匀,而其余 Cr、Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 的 CV 值范围为 35%~76%,表现为高度变异性特征,表明这些重金属空间分布不均匀且受人类活动影响较大.

表 5 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属描述性统计结果

Table 5 Descriptive statistics of heavy metals in surface dusts and the surrounding greenbelt soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
地表积尘	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	198.56	53.42	97.53	418.78	18.2	2.45	0.13
	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	49.47	22.66	18.26	48.84	8.3	0.15	0.04
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	78.75	36.17	54.33	246.53	12.3	1.36	0.07
	变异系数/%	35.15	16.27	41.62	36.93	24.72	48.99	36.12
绿地土壤	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	81.88	36.15	40.77	169.95	14.2	0.88	0.33
	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	49.31	22.66	18.07	47.01	8.7	0.13	0.01
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	61.00	30.29	26.45	91.53	11.5	0.33	0.09
	变异系数/%	9.65	9.42	17.21	31.87	10.92	47.18	98.09
参考值	甘肃省土壤元素背景值 ^[37] / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	70.20	35.20	24.10	68.50	12.60	0.12	0.02
	兰州市土壤元素背景值 ^[27] / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	63.85	30.34	21.92	55.73	10.46	0.175	0.028
	建设用地风险筛选值 ^[42] / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	—	900	18 000	—	60	65	38

绿地土壤重金属 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 的平均值分别为: 61.00、30.29、26.45、91.53、11.50、0.33、0.09 和 28.33 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 其中 Cr 和 Ni 含量的平均值略低于甘肃省和兰州市的背景值,而 As 含量的平均值在略低于甘肃省背景值的同时,却略高于兰州市背景值, Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 含量的平均值均高于甘肃省和兰州市的背景值(表 5),表明绿

地土壤存在一定程度的 Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 的超标. 研究区沿途绿地土壤重金属的 CV 值由大到小依次为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Ni}$ (表 5). 其中 Cd 和 Hg 的 CV 值高于 36%,为高度变异元素,特别是 Hg 的 CV 值高达 98.09%,说明空间分布差异大,受人类活动影响大. Cu、Zn 和 Pb 的 CV 值在 15%~35%之间,属于中等变异元素,而 Cr、Ni、Cu 和 As 的 CV 值均低于 15%,表现为弱变异性特

征,说明它们空间分布变异不显著,受外界影响小.此外,研究区沿线的广场、绿地及主题公园属于国家土壤环境质量建设用地(GB 36600-2018)的第二类用地^[42],其周边绿地土壤重金属含量均低于污染风险筛选值(表5),说明绿地土壤质量健康安全,其污染风险可以忽略.

2.2 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染评价

2.2.1 地累积指数评价

兰州市黄河风情线地表积尘和周边绿地土壤重金属 I_{geo} 评价结果如图2所示.由图2(a)可知,其 I_{geo} 的平均值由高到低依次为: $Cd > Zn > Pb > Hg >$

$Cu > Cr > Ni > As$. 基于 I_{geo} 的分级标准,积尘重金属 Cr、Ni 和 As 总体上处于清洁无污染状态,但仍有 7.4%、11.1% 和 14.8% 的采样区域为轻度污染[图2(a)]. 虽然 Cu、Hg 和 Pb 的 I_{geo} 平均值分别为 0.59、0.70 和 0.85,为轻度污染状态,但仍有 37.0%、25.9% 和 44.4% 的研究区域达到了中度污染等级[图2(a)]. 此外,Zn 的 I_{geo} 平均值为 1.41,整体上表现为中度污染状态;Cd 的 I_{geo} 平均值为 2.10,处于偏重污染状态,还有 3.7% 和 14.8% 的研究区域的污染等级为轻度污染和重度污染. 总体而言,除了 Cr、Ni 和 As 之外,Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 均存在着不同程度的污染.

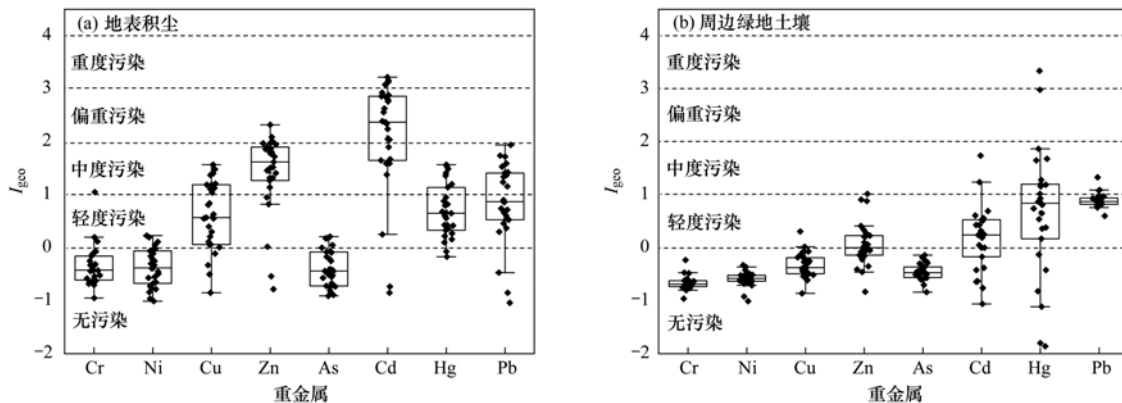


图2 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属含量地累积指数箱型图

Fig. 2 Boxplot of the geo-accumulation index (I_{geo}) of heavy metals in surface dusts and the surrounding greenbelt soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

由图2(b)可知,绿地土壤重金属 I_{geo} 的平均值由高到低依次为: $Pb > Hg > Cd > Zn > Cu > As > Ni > Cr$. 其中 Cr、Ni、Cu 和 As 的 I_{geo} 平均值均小于 0,处于清洁无污染状态,其余 Zn、Cd、Hg 和 Pb 的 I_{geo} 平均值在 0 ~ 1 之间,为轻度污染状态[图2(b)]. 但从整体来看,除了 Cr、Ni 和 As 全域为清洁无污染之外,其余元素均存在不同程度的污染,特别是 Cd、Hg 和 Pb,分别有 7.7%、26.9% 和 11.5% 的研究区域为中度污染等级. 此外,还有 3.8% 和 3.8% 的研究区域的 Hg 分别处于偏重污染和重度污染状态. 因此,研究区绿地土壤重金属 Cd、Hg 和 Pb 存在一定程度的污染,需引起相关部门重视,但同时也要关注重金属 Cu 和 Zn 的污染问题.

2.2.2 单因子污染指数评价

兰州市黄河风情线沿途地表积尘 P_i 分析数据显示,Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的 P_i 范围分别为: 0.77 ~ 3.11、0.75 ~ 1.76、0.83 ~ 4.45、0.88 ~ 7.51、0.80 ~ 1.74、0.83 ~ 13.98、1.33 ~ 4.46 和 0.24 ~ 1.65. 由 P_i 值分类标准的污染率组分图3(a)可知,Ni、As 和 Pb 均属于潜在或无污染状态. Cr 除了 3.7% 的研究区域为重度污染之外,其

余的研究区域均为潜在或无污染状态. Cu 处于中度、轻度和潜在污染状态的研究区域比例分别为 37%、22.3% 和 40.7%. 与 Cu 的污染程度相似,Hg 在 26%、44.4% 和 29.6% 的研究区域分别属于中度、轻度和潜在污染状态[图3(a)]. Zn 和 Cd 分别在 44.40% 和 70.40% 的研究点处于重度污染状态,其余 55.6% 和 29.6% 的研究样点为中-轻度及潜在或无污染状态. 总体而言,地表积尘重金属 Cu、Hg、Zn 和 Cd 均存在着不同程度的污染,还需关注 Cr 污染.

研究区周边绿地土壤重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的 P_i 范围分别为: 0.77 ~ 1.28、0.75 ~ 1.19、0.82 ~ 1.86、0.84 ~ 3.05、0.84 ~ 1.36、0.72 ~ 5.01、0.72 ~ 3.54 和 0.01 ~ 2.45. 由 P_i 值的污染率组分图3(b)可知,Cr、Ni、Cu 和 As 均处于潜在或无污染状态. 对于 Zn、Cd 和 Hg 而言,Zn 处于中度和轻度污染区域的比例分别为 3.8% 和 7.7%,Cd 和 Hg 属于重度污染状态的研究区域比例为 3.8% 和 11.50%,中度污染的比例为 3.8% 和 26.90%,轻度污染的占比为 30.8% 和 26.90%,其余区域均处于潜在或无污染状态[图3

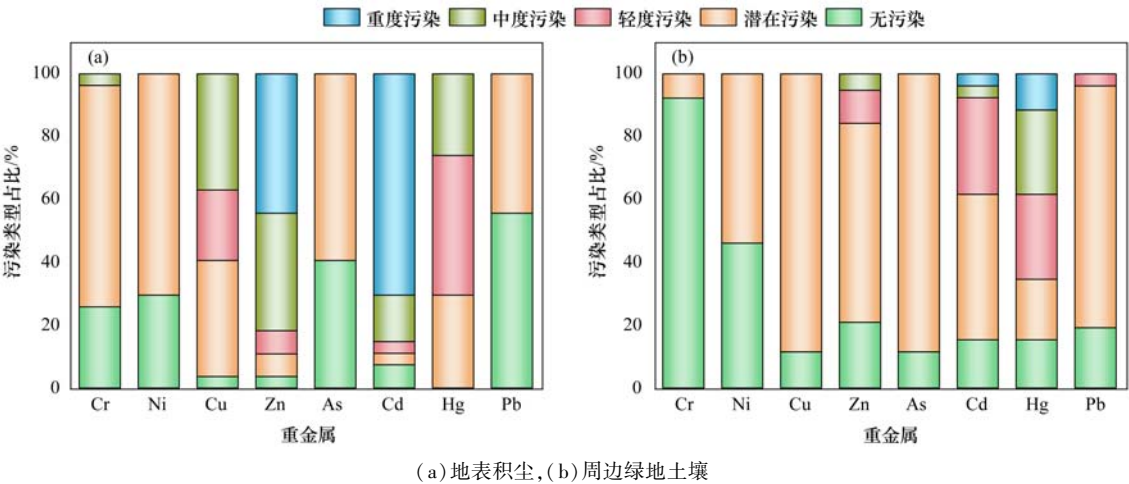


图3 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属单因子污染率

Fig. 3 Proportion of single factor pollution index (P_i) of heavy metals in surface dusts and the surrounding greenbelt soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

(b)]. Pb 除了 3.9% 的研究区域为轻度污染之外, 其余的研究区域均属于潜在或无污染状态. 由此可见, 研究区绿地土壤重金属 Cd、Zn 和 Hg 存在一定程度的污染, 但同时也需要注意 Pb 污染.

2.2.3 内梅罗综合污染指数评价

兰州市黄河风情线沿途地表积尘 P_N 评价结果显示, 其 P_N 值在 1.47 ~ 11.31 之间, 平均值为 4.33, 达到重度污染等级. 各元素综合污染程度由重到轻依次为: Cd > Zn > Pb > Hg > Cu > Cr > Ni > As (图4), 其中 Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 处于重度污染状态, Cr 与 Ni 和 As 分别为中度和轻度污染状态. 研究区周边绿地土壤 P_N 值在 1.10 ~ 10.99 之间, 平均值为 3.00, 为中度污染等级. 不同元素综合污染程度由重到轻依次为: Hg > Cd > Zn > Pb > Cu > As > Cr > Ni (图4), 其中 Cd 和 Hg 处于重度污染状态, Zn 为中度污染, Cr、Ni、Cu、As 和 Pb 为轻度污染状态.

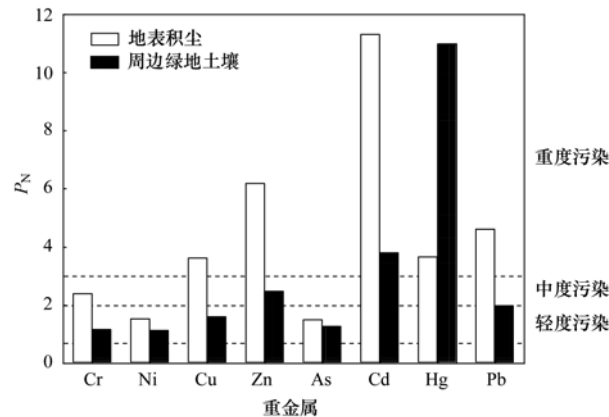


图4 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属内梅罗综合污染评价结果

Fig. 4 Results of Nemerow integrated pollution index (P_N) of heavy metals in surface dusts and the surrounding greenbelt soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

总体而言, 地表积尘重金属 Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 与周边绿地土壤 Cd 和 Hg 元素为研究区最严重的污染元素, 与 I_{geo} 和 P_i 评价结果略有差异. 这是由于内梅罗综合污染指数法重点凸显了污染程度最严重元素对环境的影响, 导致其评价结果明显高于其他方法, 且评价结果与实际污染状况略有差异^[43]. 然而, 对于研究区毒性强和危害大的重金属元素 (如 Cd、Zn 和 Hg) 要引起关注和重视.

2.3 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属潜在生态风险评价

研究区地表积尘重金属的潜在生态风险评价结果显示, 地表积尘重金属单项潜在生态风险指数 (E_r^i) 的平均值由高到低为: Cd > Hg > Pb > Cu > As > Ni > Zn > Cr, 其分布范围见表6. 从单个重金属的生态风险等级比例来看, 地表积尘重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 的 E_r^i 值均低于 40 (表6), 为轻微生态风险; Cd 的 E_r^i 值分布于 24.92 ~ 419.40 之间, 存在轻微至极高生态风险, 以极高和高生态风险为主, 分别占样点量的 29.6% 和 40.7%, 其次为占比 18.5% 的较高生态风险样点, 此外, 还存在 7.4% 的轻微和 3.7% 的中等生态风险样点; Hg 的 E_r^i 值为 64.43 ~ 174.45, 存在中等至高生态风险, 以较高生态风险为主, 占比为 40.7%. 因此, 研究区沿途地表积尘主要潜在生态危害重金属元素是 Cd 和 Hg. 就地表积尘重金属的总潜在生态指数 (RI) 而言, 其值分布于 143.73 ~ 657.76 之间, 表明存在较高和极高的生态风险, 分别占总样点的 52% 和 37%.

绿地土壤重金属 E_r^i 的平均值由大到小为: Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn. 由表6可知, 单个重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 的 E_r^i 值均小于 40, 存在轻微生态风险; Cd 的 E_r^i 值范围为 21.58 ~

150.2,存在轻微至较高生态风险,以中等风险为主,占总样点量的69%,其次是占总样点量23%的轻微风险,还存在少量(8%)较高生态风险等级的样点;Hg的 E_r^i 值在17.22~607.36之间,存在轻微至极高生态风险,以较高生态风险为主,占比46%,其次是占比分别为19%和15%的中等生态风险和轻微生态风险,还存在有12%的高生态风险和8%的极

高生态风险样点.由此可知,Cd和Hg也是研究区沿途周边绿地表层土壤主要的潜在生态危害重金属元素.对于绿地土壤重金属的RI而言,其值为71.47~698.91,说明存在中等至极高的生态风险,以中等生态风险为主,占比为69%,其次为占比23%的较高生态风险样点.此外,还存在少量(8%)的极高生态风险样点.

表6 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属潜在生态风险指数分级统计

Table 6 Classification statistics of potential ecological risk index of heavy metals in surface dusts and the surrounding greenbelt soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

生态危害 指数	分布范围		地表积尘各生态风险等级样点量					绿地土壤各生态风险等级样点量					
	地表积尘	绿地土壤	轻微	中等	较高	高	极高	轻微	中等	较高	高	极高	
E_r^i	Cr	1.55 ~ 6.22	0.43 ~ 2.15	27	0	0	0	0	26	0	0	0	0
	Ni	3.73 ~ 8.80	3.73 ~ 5.96	27	0	0	0	0	26	0	0	0	0
	Cu	4.17 ~ 20.88	4.12 ~ 7.61	27	0	0	0	0	26	0	0	0	0
	Zn	0.88 ~ 7.51	0.84 ~ 3.05	27	0	0	0	0	26	0	0	0	0
	As	8.07 ~ 17.37	8.36 ~ 13.58	27	0	0	0	0	26	0	0	0	0
	Cd	24.92 ~ 419.40	21.58 ~ 150.2	2	1	5	11	8	6	18	2	0	0
	Hg	64.43 ~ 174.45	17.22 ~ 607.36	0	7	17	3	0	4	5	12	3	2
	Pb	1.20 ~ 9.49	0.07 ~ 12.24	27	0	0	0	0	26	0	0	0	0
RI	143.73 ~ 657.76	71.47 ~ 698.91	0	3	14	0	10	0	18	6	0	2	

2.4 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属健康风险评价

2.4.1 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属非致癌健康风险评价

研究区地表积尘及周边绿地土壤重金属非致癌健康风险评价结果如表7所示.从暴露途径对人体健康的影响来看,地表积尘和周边绿地土壤同一重金属元素对成人的非致癌健康风险除Cr和Ni表现为:手口摄入>皮肤接触>呼吸吸入之外,其余元素均表

现为:手口摄入>呼吸吸入>皮肤接触;对儿童的非致癌健康风险除Cr表现为:呼吸吸入>皮肤接触>手口摄入之外,其余元素均表现为:手口摄入>呼吸吸入>皮肤接触,表明手口摄入途径是主要暴露途径.此外,在3种暴露途径下,地表积尘和周边绿地土壤各单项重金属除对成人和儿童造成的非致癌暴露风险(HQ)值均小于1.这说明兰州市黄河风情线地表积尘和周边绿地土壤各单项土壤重金属在3种暴露途径下对人体健康尚不存在非致癌风险.

表7 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属的非致癌健康风险评价¹⁾

Table 7 Exposure pathway and non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals from the surface dusts and the surrounding greenbelt soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

类型	重金属	HQ手口摄入		HQ皮肤接触		HQ呼吸吸入		HI	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
地表积尘	Cr	4.43×10^{-2}	3.17×10^{-1}	4.72×10^{-6}	8.73×10^{-6}	2.83×10^{-11}	1.40×10^{-10}	4.43×10^{-2}	3.17×10^{-1}
	Ni	3.05×10^{-3}	2.18×10^{-2}	7.23×10^{-5}	1.34×10^{-4}	4.02×10^{-5}	1.98×10^{-4}	3.17×10^{-3}	2.21×10^{-2}
	Cu	2.29×10^{-3}	1.64×10^{-2}	4.89×10^{-7}	9.03×10^{-7}	2.72×10^{-5}	1.34×10^{-4}	2.32×10^{-3}	1.65×10^{-2}
	Zn	1.39×10^{-3}	9.91×10^{-3}	4.44×10^{-7}	8.20×10^{-7}	2.46×10^{-5}	1.21×10^{-4}	1.41×10^{-3}	1.00×10^{-2}
	As	6.92×10^{-2}	4.95×10^{-1}	7.38×10^{-6}	1.36×10^{-5}	6.00×10^{-4}	2.95×10^{-3}	6.98×10^{-2}	4.97×10^{-1}
	Cd	2.30×10^{-3}	1.64×10^{-2}	2.45×10^{-7}	4.52×10^{-7}	8.16×10^{-4}	4.02×10^{-3}	3.11×10^{-3}	2.04×10^{-2}
	Hg	3.94×10^{-4}	2.81×10^{-3}	1.47×10^{-7}	2.72×10^{-7}	2.00×10^{-5}	9.84×10^{-5}	4.14×10^{-4}	2.91×10^{-3}
	Pb	3.70×10^{-2}	2.64×10^{-1}	3.36×10^{-7}	6.21×10^{-7}	7.51×10^{-4}	3.70×10^{-3}	3.78×10^{-2}	2.68×10^{-1}
绿地土壤	Cr	6.87×10^{-3}	6.13×10^{-2}	4.04×10^{-6}	6.85×10^{-6}	2.20×10^{-11}	1.08×10^{-10}	6.87×10^{-3}	6.13×10^{-2}
	Ni	5.11×10^{-4}	4.57×10^{-3}	6.68×10^{-5}	1.13×10^{-4}	3.36×10^{-5}	1.66×10^{-4}	6.12×10^{-4}	4.85×10^{-3}
	Cu	2.23×10^{-4}	1.99×10^{-3}	2.63×10^{-7}	4.46×10^{-7}	1.32×10^{-5}	6.51×10^{-5}	2.37×10^{-4}	2.06×10^{-3}
	Zn	1.03×10^{-4}	9.20×10^{-4}	1.82×10^{-7}	3.08×10^{-7}	9.15×10^{-6}	4.50×10^{-5}	1.12×10^{-4}	9.65×10^{-4}
	As	1.29×10^{-2}	1.16×10^{-1}	7.61×10^{-6}	1.29×10^{-5}	5.61×10^{-4}	2.76×10^{-3}	1.35×10^{-2}	1.18×10^{-1}
	Cd	1.11×10^{-4}	9.95×10^{-4}	6.55×10^{-8}	1.11×10^{-7}	1.98×10^{-4}	9.74×10^{-4}	3.09×10^{-4}	1.97×10^{-3}
	Hg	1.01×10^{-3}	9.05×10^{-4}	2.09×10^{-7}	3.54×10^{-7}	2.57×10^{-5}	1.27×10^{-4}	1.27×10^{-4}	1.03×10^{-3}
	Pb	3.19×10^{-3}	2.85×10^{-2}	1.60×10^{-7}	2.71×10^{-7}	3.24×10^{-4}	1.59×10^{-3}	3.51×10^{-3}	3.01×10^{-2}

1)地表积尘情境下成人和儿童对应的HI分别为 1.62×10^{-1} 和1.15;绿地土壤情境下成人和儿童对应的HI分别为 2.53×10^{-2} 和 2.21×10^{-1}

由表 7 可知,在手口摄入、皮肤接触和呼吸吸入这 3 种暴露途径下,研究区地表积尘及周边绿地土壤各重金属对成人和儿童的总非致癌健康风险指数(HI)均小于 1,表明研究区地表积尘和绿地土壤的各重金属对成人和儿童均不存在健康风险.而研究区地表积尘和绿地土壤的所有重金属对成人和儿童的 HI 除地表积尘对儿童的 HI 略高于 1 之外,其余均小于 1.这说明地表积尘重金属除对儿童存在可忽略的非致癌健康风险之外,绿地土壤重金属对成人和儿童及地表积尘对成人均不存在健康风险.此外,儿童的 HI 值均高于成人.

2.4.2 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属致癌健康风险评价

研究区地表积尘及周边绿地土壤重金属 Cr、Ni、As、Cd 和 Pb 的致癌健康风险评估结果如表 8 所示.由表 8 可知,在手口摄入、皮肤接触和呼吸吸

入这 3 种暴露途径下,研究区地表积尘及周边绿地土壤各重金属对成人和儿童的致癌风险(*R*)均未超过致癌风险量级水平(1.0×10^{-4}),说明研究区各重金属不具有致癌健康风险.从暴露途径来看,不论对成人还是儿童,手口摄入为研究区各重金属造成成人和儿童致癌风险的主要途径.就总致癌风险指数(CR)而言,兰州市黄河风情线地表积尘和周边绿地土壤重金属对成人的 CR 值的范围分别为 $3.07 \times 10^{-7} \sim 3.56 \times 10^{-5}$ 和 $1.64 \times 10^{-8} \sim 6.21 \times 10^{-6}$ (表 8),平均值分别为 1.68×10^{-5} 和 2.85×10^{-6} ;对儿童的 CR 值分别在 $5.44 \times 10^{-7} \sim 6.36 \times 10^{-5}$ 和 $3.47 \times 10^{-8} \sim 1.33 \times 10^{-5}$ 之间(表 8),相应地平均值分别为 2.57×10^{-5} 和 5.79×10^{-6} ,且儿童的 CR 值高于成人.以上结果均低于致癌风险量级水平(1.0×10^{-4}),说明不存在致癌风险.

表 8 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属的致癌健康风险评价

Table 8 Carcinogenic health risk assessment of heavy metals from the surface dusts and the surrounding greenbelt soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

类型	重金属	<i>R</i> _{手口摄入}		<i>R</i> _{皮肤接触}		<i>R</i> _{呼吸吸入}		CR	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
地表积尘	Cr	2.28×10^{-5}	4.07×10^{-5}	1.95×10^{-7}	9.02×10^{-8}	3.24×10^{-6}	3.99×10^{-6}	2.62×10^{-5}	4.48×10^{-5}
	Ni	3.56×10^{-5}	6.36×10^{-5}	1.87×10^{-9}	8.66×10^{-10}	1.75×10^{-9}	2.15×10^{-9}	3.56×10^{-5}	6.36×10^{-5}
	As	1.07×10^{-5}	1.91×10^{-5}	1.07×10^{-5}	5.29×10^{-9}	6.91×10^{-9}	9.92×10^{-8}	2.14×10^{-5}	1.92×10^{-5}
	Cd	2.99×10^{-7}	5.34×10^{-7}	5.29×10^{-10}	2.44×10^{-10}	7.36×10^{-9}	9.06×10^{-9}	3.07×10^{-7}	5.44×10^{-7}
	Pb	3.24×10^{-7}	5.78×10^{-7}	1.70×10^{-10}	7.87×10^{-11}	—	—	3.24×10^{-7}	5.78×10^{-7}
绿地土壤	Cr	3.53×10^{-6}	7.88×10^{-6}	1.67×10^{-7}	7.08×10^{-8}	2.51×10^{-6}	3.09×10^{-6}	6.21×10^{-6}	1.10×10^{-5}
	Ni	5.96×10^{-6}	1.33×10^{-5}	1.73×10^{-9}	7.35×10^{-10}	1.47×10^{-9}	1.80×10^{-9}	5.96×10^{-6}	1.33×10^{-5}
	As	2.00×10^{-6}	4.46×10^{-6}	1.18×10^{-8}	5.02×10^{-9}	6.46×10^{-9}	9.28×10^{-8}	2.02×10^{-6}	4.56×10^{-6}
	Cd	1.45×10^{-8}	3.24×10^{-8}	1.42×10^{-10}	6.01×10^{-11}	1.79×10^{-9}	2.20×10^{-9}	1.64×10^{-8}	3.47×10^{-8}
	Pb	2.79×10^{-8}	6.22×10^{-8}	8.10×10^{-11}	3.44×10^{-11}	—	—	2.80×10^{-8}	6.23×10^{-8}

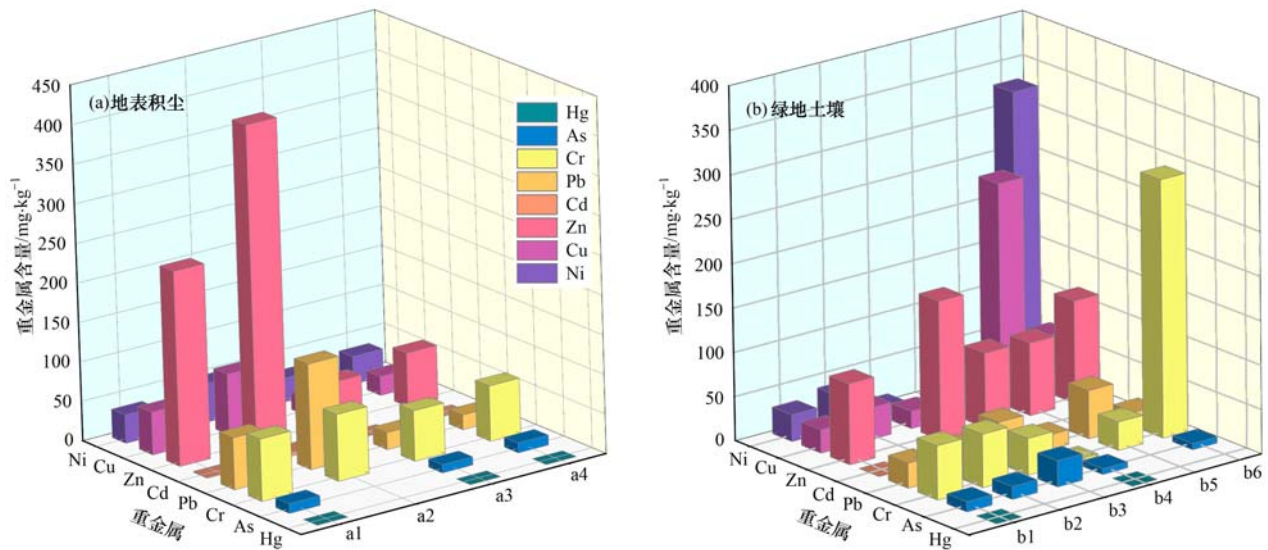
3 讨论

3.1 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属含量特征分析

从重金属含量水平来看,研究区地表积尘重金属除 Hg 含量的平均值略低于周边绿地土壤之外,其余元素含量的平均值均高于周边绿地土壤重金属的平均值(表 5 和图 5).这表明研究区周边绿地种植的绿地草坪、花卉及高矮不等的灌木和乔木所形成的不同植物类群垂直格局分形特征,可能吸收或阻滞了周边的道路扬尘或大气降尘,从而降低了绿地土壤的污染风险^[44].同时,研究区除地表积尘 As 及周边绿地土壤 As 和 Ni 含量的平均值略低于甘肃省土壤元素背景值之外,其余重金属含量的平均值均远高于甘肃省和兰州市的土壤背景值(表 5 和图 5).这是因为甘肃省^[39]和兰州市土壤背景值^[27]是 20 世纪 80 年代末期和九十年代初期的研究结果,

研究区经过近 30 年的城市化发展,人类活动的影响导致重金属的累积势必会高于背景值.此外,研究区地表积尘及周边绿地土壤重金属平均值均低于兰州市大气降尘^[45]、兰州市主城区大气降尘^[46]、兰州市主城区公园和城市表层土壤元素平均值^[21,46](图 5).虽然兰州黄河风情线景观带位于兰州市内,但与主城区日常繁忙的交通、密集的人流和活跃的商业活动相比,人类活动的影响相对较小,所以表现出较低的特征.

与国内外著名景区和国家公园土壤重金属含量平均值相比,研究区沿线绿地土壤重金属含量平均值表现出有高有低的特征(图 5).例如研究区绿地土壤 Cu 含量的平均值在低于喀纳斯^[13]和西湖景区^[12]的 Cu 含量平均值的同时,却高于黄山景区^[11];但 Cr 含量的平均值均高于这 3 个景区.然而,Cr 和 Cu 含量的平均值却远低于伊拉克 Halgurd-Sakran 国家公园^[15](图 5).这一方面与当地元素背



a1 研究区地表积尘元素平均值, a2 兰州市大气降尘元素平均值, a3 兰州市土壤元素背景值, a4 甘肃省土壤元素背景值; b1 研究区绿地土壤元素平均值, b2 兰州市主城区公园表土元素平均值, b3 黄山景区土壤元素平均值, b4 喀纳斯景区土壤元素平均值, b5 西湖风景区土壤元素平均值, b6 伊拉克 Halgurd-Sakran 国家公园土壤元素平均值

图5 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属平均值与其他记录对比

Fig. 5 Mean values of heavy metals in surface dusts and the surrounding greenbelt soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou and other records

景值的高低有关,另一方面也与公园和景区所在地的人类活动强度有关。

3.2 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征分析

研究区地表积尘及周边绿地土壤重金属 I_{geo} 、 P_i 和 P_N 评价结果表明, Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 为研究区需关注的污染元素。一般情况下,土壤中重金属来自于岩石风化成土过程中的自然源和人类活动引起的人为源^[47]。城市地表积尘重金属主要来自周围土壤、道路铺筑物、机动车、工业排放和大气沉降等^[2]。兰州黄河风情线是依托于黄河两岸自然风光并以南北滨河路为主的市内滨河景观公园,沿线绿地土壤已是风化成土的产物,所以研究区地表积尘和绿地土壤重金属污染与人为源有关。有研究表明,城市土壤和灰尘重金属 Cu、Zn 和 Pb 源自于汽车尾气排放、刹车片磨损和轮胎摩擦等交通活动^[48], Cu、Hg 和 Pb 的富集与城市化过程有关^[49], Cd 的赋存与电力输送、燃煤发电和冶金工业有关^[49,50]。兰州以西的白银、嘉峪关和金昌等地是国家重要的有色金属材料基地,并建设有区域燃煤电厂。长期的采矿、冶炼和燃煤发电等工业过程引起大气中 Cu、Cd 和 Hg 含量较高^[47,51]。同时,兰州市是一个典型的河谷型城市,其大气逆温层稳定,污染物不易扩散,来自黄土高原和西部沙漠地区沙尘外源输入影响严重^[46,52]。加之西北地区沙尘暴天气频发^[53],沙尘暴天气过程将嘉峪关、金昌等地的地面尘土、沙

粒及气溶胶通过远距离传输的方式,搬运到兰州地区^[54],从而影响了兰州地区表土和积尘的重金属污染物含量。此外,兰州市工业企业较多,烟尘排放量大,加之兰州市机动车保有量快速增加、南北滨河路交通活动繁忙^[46]。因此,受工业和交通等频繁的人类活动及扬尘大气传输的综合影响,导致兰州黄河风情线沿线地表积尘和绿地表土出现部分重金属污染的现象。近期,黄文等^[45]对兰州市 2010 年 4 月至 2018 年 3 月期间的大气降尘重金属源解析结果也证实了笔者的论断。综上可知,研究区地表积尘和绿地土壤重金属均受工业源、交通源和外源输入的影响,但具体的定量化贡献源还需进一步研究。

此外, Cd 和 Hg 是研究区沿途积尘和周边绿地土壤主要的潜在生态危害重金属元素。这与来自全国 71 座城市土壤重金属生态风险评价结果相一致^[46],但 Hg 含量较高的原因一方面与研究区较低的背景值有关,另一方面也与西北地区表土 Hg 含量相对较高有关^[55]。

3.3 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属健康风险评价分析

从健康风险评价来看,虽然手口摄入途径是造成成人和儿童非致癌和致癌健康风险的主要暴露途径,但研究区地表积尘和周边绿地土壤各单项重金属对成人和儿童造成的非致癌暴露风险(HQ)值与总非致癌健康风险指数(HI)均低于安全阈值1,说明不具有人体非致癌健康风险。同时,儿童的健康风

险值均高于成人.这与国内不同场景下的几乎所有研究结果相一致^[47],也与兰州主城区大气颗粒物的健康风险评价研究结果相同^[56].这主要是因为儿童的行为和生理特征比成人对环境污染物的敏感性更高,从而导致儿童更容易摄入含重金属的土壤或灰尘细颗粒物,增加暴露风险^[57].此外,研究区地表积尘和周边绿地土壤重金属 Cr、Ni、As、Cd 和 Pb 在手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触的暴露途径下,对成人和儿童均不存在致癌健康风险.

4 结论

(1)研究区地表积尘重金属含量差异大,除 As 之外,其余元素存在一定的超标,且 Cr、Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 具有强变异性,周边绿地土壤除 Cr 和 Ni 之外,其余元素也存在超标现象,且 Cd 和 Hg 的变异性强.

(2)地累积指数评价结果显示,研究区地表积尘及周边绿地土壤重金属 Cr、Ni 和 As 为清洁无污染,Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 均存在着不同程度的污染.单因子污染指数显示,地表积尘重金属 Ni、As 和 Pb 处于潜在或无污染状态,Cu、Zn、Cd 和 Hg 均存在着不同程度的污染,需关注 Cr 污染;沿途绿地土壤重金属 Cr、Ni、Cu 和 As 为潜在或无污染状态.Zn、Cd 和 Hg 存在一定程度的污染,但也需要注意 Pb 污染.内梅罗综合污染指数评价显示,研究区地表积尘和周边绿地土壤各重金属均存在不同程度的污染.

(3)研究区地表积尘和周边绿地土壤重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 的潜在生态风险指数值均低于 40,为轻微生态危害,Cd 和 Hg 是兰州市黄河风情线沿途地表积尘和周边绿地土壤的主要潜在生态危害元素.

(4)健康风险评估表明,手口摄入是研究区地表积尘和周边绿地土壤重金属健康风险的主要暴露途径.重金属对成人和儿童造成的 HQ 与 HI 及 R 和 CR 均不存在健康风险,儿童的健康风险值高于成人.此外,综合分析认为兰州市黄河风情线地表积尘和绿地土壤 Cr、Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 的超标可能与工业源、交通源和长距离外源输入的影响有关,需引起关注.

参考文献:

- [1] Ma J J, Yan Y, Chen X J, *et al.* Incorporating bioaccessibility and source apportionment into human health risk assessment of heavy metals in urban dust of Xiamen, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **228**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112985.
- [2] 李廷昆,冯银厂,毕晓辉,等.城市扬尘污染主要成因与精淮治尘思路[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1323-1331.
- [3] Li T K, Feng Y C, Bi X H, *et al.* Main problems and refined solutions of urban fugitive dust pollution in China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1323-1331.
- [4] Chen S Y, Zhang X R, Lin J T, *et al.* Fugitive road dust PM_{2.5} emissions and their potential health impacts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(14): 8455-8465.
- [5] Wang Y L, Tsou M C M, Pan K H, *et al.* Estimation of soil and dust ingestion rates from the stochastic human exposure and dose simulation soil and dust model for children in Taiwan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(17): 11805-11813.
- [6] Murray C J L, Aravkin A Y, Zheng P, *et al.* Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019 [J]. *The Lancet*, 2020, **396**(10258): 1223-1249.
- [7] 庞晓晨,韩新宇,史建武,等.昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 180-188.
- [8] Pang X C, Han X Y, Shi J W, *et al.* Pollution characteristics and health risk of heavy metals in fugitive dust around Zhaotong City[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 180-188.
- [9] Yan R H, Peng X, Lin W W, *et al.* Trends and challenges regarding the source-specific health risk of PM_{2.5}-bound metals in a Chinese megacity from 2014 to 2020 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(11): 6996-7005.
- [10] 许宇慧,唐亚,张朝生,等.四川省九寨沟景区道路灰尘及土壤重金属含量评价[J]. *山地学报*, 2010, **28**(3): 288-293.
- [11] Xu Y H, Tang Y, Zhang C S, *et al.* Contamination assessment of heavy metal in road dusts and soils of the Jiuzhaigou national scenic area in Sichuan, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, **28**(3): 288-293.
- [12] 王全辉,董元杰,邱现奎,等.泰山景区土壤重金属污染及其对土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(2): 181-184.
- [13] Wang Q H, Dong Y J, Qiu X K, *et al.* Soil heavy metal pollution and effect on the soil enzyme activity in Mount Tai scenic area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(2): 181-184.
- [14] 林跃胜,方凤满,魏晓飞,等.黄山景区土壤重金属分布特征及其潜在生态风险评价[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(2): 256-260.
- [15] Lin Y S, Fang F M, Wei X F, *et al.* Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils of Huangshan scenic[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(2): 256-260.
- [16] Huang J L, Wu Y Y, Li Y Y, *et al.* Do trace metal(loid)s in road soils pose health risks to tourists? A case of a highly-visited national park in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **111**: 61-74.
- [17] 张海珍,唐宇力,陆骏,等.西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1516-1522.
- [18] Zhang H Z, Tang Y L, Lu J, *et al.* Sources and spatial distribution of typical heavy metal pollutants in soils in Xihu scenic area[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1516-1522.
- [19] 王文栋,白志强,刘端,等.喀纳斯景区土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *水土保持通报*, 2018, **38**(6): 352-357.
- [20] Wang W D, Bai Z Q, Liu D, *et al.* Assessment of soil heavy

- metal pollution and its potential ecological risk in Kanas scenic area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38** (6): 352-357.
- [14] Mazurek R, Kowalska J B, Gašiorek M, *et al.* Pollution indices as comprehensive tools for evaluation of the accumulation and provenance of potentially toxic elements in soils in Ojców National Park[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, **201**: 13-30.
- [15] Hamad R, Balzter H, Kolo K. Assessment of heavy metal release into the soil after mine clearing in Halgurd-Sakran National Park, Kurdistan, Iraq [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(2): 1517-1536.
- [16] Liu H B, Qu M K, Chen J, *et al.* Heavy metal accumulation in the surrounding areas affected by mining in China: Spatial distribution patterns, risk assessment, and influencing factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **825**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154004.
- [17] Chen H R, Wang L, Hu B F, *et al.* Potential driving forces and probabilistic health risks of heavy metal accumulation in the soils from an e-waste area, southeast China[J]. *Chemosphere*, 2022, **289**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133182.
- [18] Peng J Y, Zhang S, Han Y Y, *et al.* Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **816**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151632.
- [19] Wang F F, Guan Q Y, Tian J, *et al.* Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor [J]. *CATENA*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104573.
- [20] Liu L L, Liu Q Y, Ma J, *et al.* Heavy metal (loid)s in the topsoil of urban parks in Beijing, China: Concentrations, potential sources, and risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114083.
- [21] 胡梦珺, 李春艳, 李娜娜, 等. 基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42** (5): 2457-2468.
- Hu M J, Li C Y, Li N N, *et al.* Using the matter-element extension model to assess heavy metal pollution in topsoil in parks in the main district park of Lanzhou city [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2457-2468.
- [22] 胡梦珺, 王佳, 张亚云, 等. 基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染[J]. *环境科学*, 2020, **41** (4): 1838-1846.
- Hu M J, Wang J, Zhang Y Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface dust of Lanzhou schools based on random forests[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1838-1846.
- [23] Han Q, Wang M S, Cao J L, *et al.* Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110157.
- [24] 兰州市统计局. 兰州统计年鉴—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Lanzhou Municipal Bureau of Statistics. *Lanzhou statistical yearbook-2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [25] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**: 108-118.
- [26] Zhang H W, Zhang F, Song J, *et al.* Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China [J]. *Environmental Research*, 2021, **202**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111702.
- [27] 卢子扬, 张崇德, 郝敬丹. 兰州地区土壤元素背景值的研究[J]. *环境研究*, 1987, (1): 17-21.
- [28] Karim Z, Qureshi B A, Mumtaz M. Geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in urban soils of Karachi, Pakistan[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 358-364.
- [29] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43** (9): 4756-4766.
- Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al.* Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
- [30] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [31] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31** (2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [32] Yuan G L, Sun T H, Han P, *et al.* Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: Typical urban renewal area in Beijing, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **136**: 40-47.
- [33] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. *地理研究*, 2020, **39** (6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [34] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I: human health evaluation manual supplemental Guidance [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [35] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [36] U. S. EPA. Soil screening guidance; technical background document [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1996.
- [37] U.S. EPA. Exposure factors handbook; 2011 edition [R]. Washington, DC: National Center for Environmental Assessment, 2011.
- [38] Luo H P, Wang Q Z, Guan Q Y, *et al.* Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **422**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126878.
- [39] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- China Environmental Monitoring Station. *Chinese soil element background value* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [40] Wang M S, Han Q, Gui C L, *et al.* Differences in the risk assessment of soil heavy metals between newly built and original parks in Jiaozuo, Henan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **676**: 1-10.
- [41] Ji Z H, Long Z W, Zhang Y, *et al.* Enrichment differences and source apportionment of nutrients, stable isotopes, and trace metal elements in sediments of complex and fragmented wetland

- systems[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **289**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117852.
- [42] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [43] 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 等. 有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4800-4809.
- Wang F, Huang Y H, Li R Z, *et al.* Contamination assessment and source apportionment of soil heavy metals in typical villages and towns in a nonferrous metal mining city[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4800-4809.
- [44] Altaf R, Altaf S, Hussain M, *et al.* Heavy metal accumulation by roadside vegetation and implications for pollution control[J]. *PLoS One*, 2021, **16**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0249147.
- [45] 黄文, 王胜利. 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 597-607.
- Huang W, Wang S L. Distribution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric deposition during heating and non-heating period in Lanzhou[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 597-607.
- [46] 李颖泉, 赵保卫, 牛武江, 等. 兰州市主城区大气降尘和表层土壤重金属污染特征与评价[J]. *安全与环境学报*, 2020, **20**(4): 1440-1448.
- Li Y Q, Zhao B W, Niu W J, *et al.* Special heavy metal pollution features in atmospheric dust-fall and top soil in main urban districts of Lanzhou [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, **20**(4): 1440-1448.
- [47] Zhou Y T, Aamir M, Liu K, *et al.* Status of mercury accumulation in agricultural soil across China: Spatial distribution, temporal trend, influencing factor and risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **240**: 116-124.
- [48] 李海雯, 陈振楼, 王军, 等. 基于 GIS 的上海城市灰尘重金属空间分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(5): 803-809.
- Li H W, Chen Z L, Wang J, *et al.* Research of spatial variability of heavy metal pollution of dust in Shanghai urban area based on the GIS[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(5): 803-809.
- [49] Khan S, Munir S, Sajjad M, *et al.* Urban park soil contamination by potentially harmful elements and human health risk in Peshawar City, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **165**: 102-110.
- [50] Liu J W, Chen Y J, Chao S H, *et al.* Emission control priority of PM_{2.5}-bound heavy metals in different seasons: A comprehensive analysis from health risk perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 20-30.
- [51] 李强, 姚万程, 赵龙, 等. 燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3781-3788.
- Li Q, Yao W C, Zhao L, *et al.* Evaluation of mercury pollution in soil of different land use types in coal-fired industrial area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3781-3788.
- [52] 陈超勤, 张静雅, 梁懿文, 等. 兰州市夏秋季大气降尘矿物组成特征及环境意义解析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, **55**(3): 326-332.
- Chen C Q, Zhang J Y, Liang Y W, *et al.* Interpretation of the environmental significance based on the minerals in Lanzhou dustfalls[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2019, **55**(3): 326-332.
- [53] 杨婕, 赵天良, 程叙耕, 等. 2000—2019 年中国北方地区沙尘暴时空变化及其相关影响因素[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(8): 2966-2975.
- Yang J, Zhao T L, Cheng X G, *et al.* Temporal and spatial variations of sandstorm and the related meteorological influences over northern China from 2000 to 2019 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 2966-2975.
- [54] Guan Q Y, Yang Y Y, Luo H P, *et al.* Transport pathways of PM₁₀ during the spring in northwest China and its characteristics of potential dust sources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117746.
- [55] Hu B F, Shao S, Ni H, *et al.* Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114961.
- [56] 程慧波, 王乃昂, 李晓红, 等. 兰州主城区大气颗粒物质量浓度及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(1): 348-360.
- Cheng H B, Wang N A, Li X H, *et al.* Mass concentration and health risk of atmospheric particulate matter in main urban district of Lanzhou[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(1): 348-360.
- [57] Timofeev I, Kosheleva N, Kasimov N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **242**: 279-289.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)