环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第45卷 第4期
2024年4月15日

目 次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ……杨清可，王磊，朱高立，李颖，范业婷，王雅竹（1869）
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ……郑琰，蒋雪梅，肖玉杰（1879）
基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ……张江艳（1888）
基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径：以南京某国家级开发区为例 ……李慧鹏，李荔，殷茵，何文太，宿杰，赵秋月（1898）
高校碳排放核算与分析：以北京A高校为例 ……曹睿，封莉，张立秋（1907）
北京市制造业减污降碳协同效应分析和驱动因素 ……俞珊，韩玉花，牟洁，张双，张增杰（1917）
碳排放权交易价格与全要素生产率：来自中国的证据 ……吴雪萍（1926）
中国城市$PM_{2.5}$和PM_{10}时空分布特征和影响因素分析 ……李江苏，段良荣，张天娇（1938）
2017~2021年苏皖鲁豫交界区域$PM_{2.5}$和O_3时空变化特征及影响因素 ……陈伟，徐学哲，刘文清（1950）
疫情管控期西安$PM_{2.5}$和O_3污染特征及成因分析 ……原晓红，张强，李琦，谢文豪，刘跃廷，樊亭亭，姜旭朋（1963）
苏南五市秋冬季$PM_{2.5}$化学组成特征和空间差异 ……冯蔚，丁峰，尚玥，谢鸣捷（1975）
湖北咸宁细颗粒物$PM_{2.5}$来源 ……罗怡，朱宽广，陈璞珑，田军，谢旻，战杨志豪，赵润琪（1983）
邢台氨减排对京津冀$PM_{2.5}$改善的溢出效益 ……边泽君，闻超玉，郎建垒，范晓菡，夏祥晨，周颖（1994）
聊城市冬季$PM_{2.5}$载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ……张敬巧，朱瑶，曹婷，燕丽，王淑兰，刘铮（2003）
高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ……郭淑政，叶春翔，林伟立，陈熠，曾立民，尹晴晴，刘雪莉（2011）
北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例：高新技术产业的环境影响
……王洁，姚震，王敏燕，陈速敏，龙腾，王海林，李红，郭秀锐，郝江虹，聂磊（2019）
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ……雷丽娟，张懿，罗伊娜，张潇，冯淼（2028）
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险 ……葛林科，李璇艳，曹胜凯，郑金帅，张蓬，朱超，马宏瑞（2039）
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ……王亮，邓雪娇，王潇磊，李明，刘奕尧，娄亚敏，涂响，张坤锋（2054）
藏东多曲河流域锶富集水化学特征及控制因素 ……李敬杰，连晟，王明国，张智印，张涛（2067）
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ……张炎炎，辛存林，郭小燕，张博，陈宁，史延飞（2080）
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ……孟令华（2096）
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ……张子燕，伏永朋，王宁涛，谭建民，刘亚磊（2107）
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ……王晓燕，韩双宝，张梦南，尹德超，吴玺，安永会（2118）
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ……刘楠，陈盟，高东东，吴勇，王橦橦（2129）
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ……许万璐，范一凡，钱新（2142）
抚仙湖子流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ……王延杰，梁启斌，王艳霞，侯磊，陈奇伯，王伟，李晓琳，高俊淑（2150）
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ……曲思彤，单苏洁，王崇铭，吴玲予，李大鹏，黄勇（2160）
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ……刘振海，张展华，袁语欣，朱盼盼，陈威，张彤（2171）
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ……孙漱玉，黄梦鑫，孔强，张焕新，刘继伟（2185）
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ……练建军，谢诗婷，吴培，孟冠华，陈波（2195）
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ……马锋锋，薛之一，赵保卫（2203）
土地利用影响下无定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ……郭善嵩，胡恩，丁一桐，张嘉渭，孙长顺，卢悦，潘保柱（2211）
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ……喻江，王淳，龙永，刘贵花，李春杰，范国权，于镇华（2223）
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ……刘双羽，蒙俊杰，邱小琮，周瑞娟，李霖（2233）
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ……郭有顺，余仲，郝文彬，孟凡刚（2246）
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ……胡健双，王燕，周政，汪雅琴，王秉政，李激（2259）
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ……郑亚平，张俊华，田惠文，朱航成，刘舒，丁亚鹏（2268）
基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ……叶淼，朱琳，刘旭东，黄勇，陈蓓蓓，李欢（2280）
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ……叶子壮，王松燕，陆潇，史多鹏，吕慎强，李嘉，杨泽宇，王林权（2292）
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ……王长远，马啸驰，郭德杰，刘新红，马艳，罗佳（2304）
土壤盐分变化对N_2O排放影响：基于Meta分析 ……黄艺华，佘冬立，史祯琦，胡磊，潘永春（2313）
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ……郑慧玲，郑辉峰（2321）
基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ……张哲，时振钦，朱文博，孙梓欣，赵体侠，邓文萍，刘志强（2332）
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ……徐凤璟，黄懿梅，黄倩，申继凯（2342）
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ……赵宇航，殷浩凯，胡雪纯，解文艳，刘志平，周怀平，杨振兴（2353）
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响
……鲁泽让，陈佳钰，李智贤，李永梅，罗志章，杨锐，田明洋，赵吉霞，范茂攀（2363）
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ……周波，李晓光，童思陈，吕旭波，郭朝臣，雷坤（2373）
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ……张欣悦，肖启涛，谢晖，刘臻婧，邱银国，罗菊花，徐向华，段洪涛（2385）
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ……柳晓婉，刘杏认，高尚洁，李贵春（2394）
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ……马义淑，曹亚鑫，牛敏，张明罡，程曼，文永莉（2406）
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ……张佳琦，潘瑜春，高世臣，赵亚楠，景胜强，周艳兵，郜允兵（2417）
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析
……李军，李旭，李开明，焦亮，台喜生，臧飞，陈伟，脱新颖（2428）
西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ……张海琳，张雨，王顶，谢军，张跃强，张宇亭，王洁，石孝均（2440）
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ……廖泽源，李杰芹，沈智杰，李彩霞，罗程钟，梅楠，张成，王定勇（2450）
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ……魏洪斌，罗明，向垒，查理思（2461）
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ……刘龙宇，杨世利，赵黄诗雨，常凯威，余江（2473）
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ……张瑶，王天齐，牛硕，杨阳，陈卫平（2479）

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析

李军[1,2], 李旭[1], 李开明[1*], 焦亮[2], 台喜生[1], 臧飞[3], 陈伟[1], 脱新颖[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)

摘要: 为甄别城市滨河公园景区绿地土壤重金属污染优先控制因子和污染源, 以兰州市黄河风情线大景区为研究区, 采集并测定64个绿地土壤样品重金属As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn的含量; 采用单因子污染指数法和污染负荷指数法量化重金属污染程度, 利用绝对因子得分-多元线性回归(APCS-MLR)模型对绿地土壤重金属进行源解析. 并运用APCS-MLR模型与综合生态风险指数和人体健康风险评价模型相耦合方法, 解析各污染源对生态风险和人体健康风险的贡献率. 结果表明, 除Cr和Ni之外, As、Cd、Cu、Hg、Pb和Zn的含量均值高于兰州市土壤元素背景值, 但所有元素含量均低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)的筛选值. 单因子污染指数结果显示, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn为无污染至轻微污染水平, 而Hg属于轻度污染. 污染负荷指数评价结果显示, 绿地土壤总体上属于轻度污染水平. 源解析表明, 绿地土壤重金属源自于交通源、自然-农业源和自然-工业源, 贡献率分别为34.79%、23.12%和18.49%. 特定源-综合生态风险指数结果表明, Cd和Hg为生态风险优先控制元素, 自然-工业源为优先控制污染源; 特定源-健康风险评价模型分析结果表明, As和Ni为人体健康优先控制元素, 自然-农业源为优先控制污染源.

关键词: 重金属; APCS-MLR模型; 源解析; 生态风险; 健康风险
中图分类号: X53;X825 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)04-2428-12 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.202304165

Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou

LI Jun[1,2], LI Xu[1], LI Kai-ming[1*], JIAO Liang[2], TAI Xi-sheng[1], ZANG Fei[3], CHEN Wei[1], TUO Xin-ying[1]
(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)

Abstract: In order to identify the priority control factors and pollution sources for heavy metal contamination in greenspace soil from urban riverfront park areas, the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou was selected as the research area. Sixty-four soil samples were collected and analyzed for the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn. The single-factor pollution index and pollution load index were applied to assess heavy metal pollution. Then, the absolute principal component score-multiple linear regression (APCS-MLR) model was used for source apportionment of heavy metals in greenspace soils. Finally, source-specific ecological and human health risks were quantified by combining the APCS-MLR model and comprehensive ecological risk index, as well as the human health risk assessment model. The results showed that all the average values for As, Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn concentrations, except for those of Cr and Ni, were higher than their soil background values in Lanzhou City, but all heavy metal contents were lower than the risk screening value for the Soil Environment Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Development Land (GB 36600-2018). The results of the single-factor pollution index revealed that As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were at levels of no contamination to low contamination, whereas Hg presented moderate contamination. The results of the pollution load index demonstrated that the overall level of heavy metal pollution in greenspace soils was mild. Source apportionment indicated that heavy metals in greenspace soils primarily originated from traffic sources, natural-agricultural sources, and natural- industrial sources, with contribution rates of 34.79%, 23.12%, and 18.49%, respectively. Source-specific ecological risk analysis showed that Cd and Hg were the priority control elements for ecological risk, and natural- industrial sources were identified as the priority sources for ecological risk. Source-specific human health risk analysis showed that As and Ni were the priority control elements for human health, and natural-agricultural sources were identified as the priority source for health risks in the study region.

Key words: heavy metals; APCS-MLR model; source apportionment; ecological risk; health risk

城市绿地是城市生态系统的重要组成部分, 具有为城市及其居民提供生态系统服务、增加游憩休息空间、稳定生态安全格局和厚植教育文化等功能[1~3]. 绿地土壤是城市绿地建设的重要载体, 也是保障绿地土壤生物和功能多样性及促进植物、人类和动物健康的基石[3~5]. 然而, 伴随着城市化进程的快速推进, 城市绿地面临的土壤环境污染问题日趋严重, 特别是铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、铅(Pb)和汞(Hg)等典型"城市重金属"元素已成为其主要污

收稿日期: 2023-04-19; **修订日期:** 2023-06-26
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);甘肃省高等学校科研项目(2023A-116)
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

染物[3,4].以上元素经由机动车轮胎的磨损、汽车尾气和工业“三废”的排放及大气降尘等过程蓄积于土壤之中，经长时间的累积从而出现不同程度的污染现象[3,4].由于重金属污染具有难降解性、不可逆性、隐蔽性和生物毒性等特点，在严重影响城市绿地植物和土壤动物及微生物健康生长的同时，也直接或者间接地给人类健康带来潜在的威胁[1,3].因此，开展城市绿地土壤重金属污染状况调查、风险评估和溯源解析研究，可为改善城市土壤环境质量、促进生态城市建设及满足居民日益增长的美好生活需求提供科技支撑，具有重要的理论与现实意义.

土壤重金属优先污染源的风险管控是土壤重金属污染精准防控的有效策略[6~8]，而重金属的溯源分析是优先污染源确定的前提.一直以来，国内外学者利用因子分析(factor analysis，FA)、聚类分析(cluster analysis，CA)和主成分分析(principal component analysis，PCA)等多元统计分析方法定性识别了土壤重金属污染的主要来源类型[1,9]，为推动土壤重金属污染源头治理提供了直接的科学证据.然而，定性的污染源判别无法满足当前精准治污的政策要求，具有一定的局限性.近年研究表明化学质量平衡法(chemical mass balance，CMB)、同位素法、主成分分析/因子分析-多元线性回归法(principal component analysis/factor analysis-multiple linear regression，PCA/FA-MLR)、绝对因子得分-多元线性回归法(absolute principal component score-multiple linear regression，APCS-MLR)和正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization，PMF)等受体模型可有效量化各污染源对重金属元素的贡献量[10~12]，为土壤重金属污染精准防治和精细化管控提供了强有力的科技支撑.然而，由于重金属污染来源迥异，不同重金属毒性差异显著且其对生态环境和人体健康的影响不同，进而会出现对重金属富集贡献量大的污染源并未对生态环境和人体健康构成污染风险的现象[6,13].为此，优先污染源的控制需以各污染源的风险贡献量为基础，而非各污染源对重金属总量的贡献量.近期研究发现通过源解析受体模型与生态-人体健康风险评价模型相耦合的特定源风险评估模型可计算出不同污染源中各重金属元素的贡献率，从而来量化不同污染源对生态和人体健康的风险[8,13,14].在有效地解决传统方法通过总量角度来评估风险局限性的同时，还可以精确量化不同重金属污染来源带来的潜在风险，可有效识别引发高风险的具体污染源和需优先控制的风险源，从而有助于污染风险的有效防控.

作为黄河流域生态保护和高质量发展的重要承载地之一，兰州是黄河上游重要中心城市.黄河风情线是兰州市最重要的滨水生态和文化休闲景观带，是兰州的城市名片.然而，兰州作为一个典型的河谷型工业城市，土壤污染现象较为严重[15~17].虽然已有研究对兰州黄河风情线周边绿地土壤重金属污染状况进行了调查与评价[18]，但对重金属污染来源及其相对贡献率尚不清楚.为此，本文以兰州黄河风情线绿地土壤为研究对象，在测定土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn等元素含量的基础上，分析重金属的污染特征；采用APCS-MLR模型定量解析重金属的污染源及其相对贡献，并结合综合生态风险指数和人体健康风险评估模型来定量解析不同污染源的生态和健康风险贡献率，从而确定优先污染因子和污染源，以期为兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染风险的精准管控和优先污染源控制提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

兰州市(35°58′~37°02′N，102°58′~104°57′E)位于甘肃中部黄河上游，是甘肃省省会城市，也是黄河唯一穿城而过的省会城市.气候上属温带大陆性半干旱气候，年平均气温在6~9℃，年平均降水量为300 mm左右，风力一般为1~4级[15].作为中国唯一的城市内黄河风情线，其核心段西起兰州市西固区，东至兰州市城关区，占地面积为22.87 km^2，全长约20 km.沿途建设有兰州黄河铁桥、黄河母亲雕像、马拉松文化公园和水车博览园等游园广场、城市主题公园和滨河健身步道，沿途建设有以乔灌草植物、常绿草坪、常绿树和落叶树为主要绿化植物的公共绿地，已成为中国最长的沿河开放式公园和绿色生态长廊，是兰州市民和外来游客观景、休闲、娱乐和健身的重要场所.近年来，随着城市工业化和区域经济一体化进程的不断加快，工业源、交通源和生活源排放的污染物日益增加[19].加之兰州特殊气象条件形成的大气逆温层，阻碍了污染物的扩散[20]，大量的重金属随大气降尘进入当地环境，从而对生态和居民健康存在较大风险[21].

1.2　样品采集与实验分析

根据黄河风情线沿途主题公园和游园广场绿地的分布情况及人流量的大小，在现场踏勘的基础上，于2020年7月连续7 d以上晴朗无风的天气之后，采用梅花形布点法采集周边绿地土壤样品，每个土壤样品是由相距500 m左右的5个挖取面积为25 cm×25 cm，深度为0～20 cm的表层土壤样品混合

而成，之后封装于布制样品袋中，采样量为2 kg，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.研究区域及采样点位置如图1，总计采集样品64个，采样过程中严格遵照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)的相关要求进行规范操作，避免相互交叉污染.

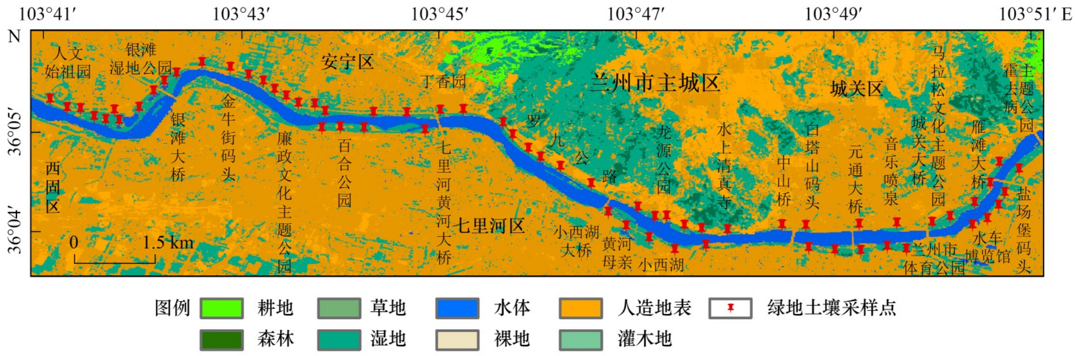


图1 兰州黄河风情线绿地土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites for greenspace soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

将采集的绿地土壤样品带回实验室，平铺于干净的纸上，掰成碎块并摊成厚约2 cm的薄层，置于阴凉通风处进行自然风干.之后弃去植物残渣、根系和碎石等杂物，并用木棍压碎，过孔径为0.149 mm的尼龙筛，用于土壤样品重金属总量的测定.土样的测定在中国科学院长春应用化学研究所完成.经氢氟酸-硝酸-高氯酸微波消解法消解之后，使用电感耦合等离子体质谱仪(Thermo X Series 2)测定样品中的Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量，检出限分别为：0.02、0.4、0.2、1.0、2.0和2.0 μg·g^{-1}.在测定土壤样品中As和Hg含量之前，先经硝酸-盐酸-水溶液体系消解，后用原子荧光光谱仪(XGY-1011A)测定，检出限分别为：0.2 μg·g^{-1}和0.005 μg·g^{-1}.为确保数据的准确性，实验测定以20%的平行样、空白样及土壤成分分析标准物质(GBW 07449)进行质量控制，分析误差在5%以内.所有元素的回收率均在90%~102%.

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法(single factor pollution index，P_i)是一种用于定量评价研究区土壤中单个重金属污染状况的方法[22]，其计算公式为：

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中，C_i为重金属i的实测含量，mg·kg^{-1}；S_i为元素i的兰州市土壤环境背景值[23]，mg·kg^{-1}. P_i的重金属污染程度分级标准如表1所示.

1.3.2 污染负荷指数法

污染负荷指数法(pollution load index， PLI)是一种用于定量评价研究区土壤多种重金属综合污染程度的方法[24]，其计算公式为：

$$\mathrm{PLI} = \sqrt[n]{P_1 \times P_2 \times \cdots \times P_n} \tag{2}$$

式中，PLI为研究点位的污染物负荷指数，n为重金属元素的数量.PLI的重金属污染程度分级标准如表1所示.

1.4 重金属特定源-风险评价模型

重金属特定源-风险评价模型是在绝对因子得分-多元线性回归(APCS-MLR)模型识别重金属污染来源并定量分析污染源贡献率的基础上，结合综合生态风险评价指数法和人体健康风险评价模型定量解析各污染源对生态风险和人体健康风险的贡献率.

1.4.1 APCS-MLR模型

APCS-MLR模型是一种主成分分析法与多元线性回归法相结合来定量解析污染物来源的受体模型[25]，即在通过主成分分析(PCA)获取绝对主因子得分(APCS)的基础上，再分别以APCS和各重金属含量作为自变量和因变量进行多元线性回归分析，之后利用回归系数计算各个因子所对应的污染源贡献率[25].具体计算步骤如下.

首先，利用公式(3)对重金属含量数据标准化：

$$X_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}}{\sigma_i} \tag{3}$$

式中，X_{ij}为重金属含量标准化值，无量纲；C_{ij}为第j个样品中重金属i的含量，mg·kg^{-1}；$\bar{C}$为重金属i的含量均值，mg·kg^{-1}；σ_i为重金属i的标准偏差.

接着，引入含量为0的人工样本，计算各重金属0含量样本的因子分数，计算公式为：

$$X_{0i} = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} = -\frac{\overline{C_i}}{\sigma_i} \tag{4}$$

最后，将每个样品的因子得分与含量为0的人工样本作减法，得到每个样本的APCS，并分别以APCS和各重金属含量作为自变量和因变量进行多元线性回归分析，根据公式计算源贡献率：

$$C_i = b_{j0} + \sum_{k=1}^{n}(b_{jk} \times \mathrm{APCS}_{jk}) \tag{5}$$

式中，b_{j0}为重金属j的多元线性回归常数；b_{jk}为污染源k对重金属j的回归系数，$b_{jk} \times \mathrm{APCS}_{jk}$为污染源$k$对$C_i$的贡献率，%.

此外，需要注意的是在APCS-MLR模型计算过程中，为防止贡献率可能会出现负值，从而影响污染源分配的准确性，需采用绝对值计算污染源的贡献率[26].

1.4.2 特定源-综合生态风险评价模型

特定源-综合生态风险评价模型是在APCS-MLR模型溯源结果的基础上，结合综合生态风险指数(Nemerow integrated risk index，NIRI)法[14]定量解析各污染源的生态风险.具体计算公式如下：

$$\mathrm{EIRI}_{ij}^{k} = \sqrt{\frac{(\mathrm{ER}_{ij\max}^{k})^2 + (\mathrm{ER}_{ij\mathrm{average}}^{k})^2}{2}} \tag{6}$$

式中，EIRI_{ij}^{k}为样品i中污染源k对多种元素的生态风险，$\mathrm{ER}_{ij\max}^{k}$和$\mathrm{ER}_{ij\mathrm{aveage}}^{k}$分别是同一样品中所有元素生态风险值的最大值和平均值.ER_{ij}^{k}的计算公式如下所示：

$$\mathrm{ER}_{ij}^{k} = \frac{C_{ij}^{k}}{B_i} \times T_r^i \tag{7}$$

式中，ER_{ij}^{k}为样品i中污染源k对元素j的生态风险；B_i为兰州市土壤元素背景值[23]；T_r^i为重金属的毒性响应系数，无量纲，本研究中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn的毒性响应系数别取值10、30、2、5、40、5、5和1[27].C_{ij}^{k}为样品i中污染源k对元素j的质量贡献，mg·kg^{-1}，其计算公式为：

$$C_{ij}^{k} = C_{ij}^{k*} \times C_i \tag{8}$$

式中，C_{ij}^{k*}为样品i中污染源k对元素j的贡献值，无量纲，C_i为样品i中重金属的实测值，mg·kg^{-1}.

基于ER_{ij}^{k}和EIRI_{ij}^{k}值的生态风险等级划分标准如表1所示[14,27].

表1　兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染和生态风险分级标准

Table 1　Classification division standard of heavy metal pollution and ecological risk in greenspace soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

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
	<1	无污染		<1	无污染		<40	轻微风险
	1~2	轻微污染		1~2	轻度污染		40~80	中等风险
P_i	2~3	轻度污染	PLI	2~3	中度污染	ER_{ij}^{k}或EIRI_{ij}^{k}	80~160	较强风险
	3~5	中度污染		>3	重度污染		160~320	很强风险
	>5	重度污染					>320	极强风险

1.4.3 特定源-健康风险评价模型

特定源-健康风险评价模型是基于APCS-MLR模型的溯源结果，利用美国环保署的人体健康风险模型来量化不同污染来源对人体健康风险贡献量的评价方法[28].各污染源的健康风险计算公式如下：

$$\mathrm{ADD}_{ij\mathrm{ing}}^{k} = \frac{C_{ij}^{k} \times \mathrm{IngR} \times \mathrm{ED} \times \mathrm{EF}}{\mathrm{BW} \times \mathrm{AT}} \times \mathrm{CF} \tag{9}$$

$$\mathrm{ADD}_{ij\mathrm{inh}}^{k} = \frac{C_{ij}^{k} \times \mathrm{InhR} \times \mathrm{EF} \times \mathrm{ED}}{\mathrm{PEF} \times \mathrm{BW} \times \mathrm{AT}} \tag{10}$$

$$\mathrm{ADD}_{ij\mathrm{dermal}}^{k} = \frac{C_{ij}^{k} \times \mathrm{SA} \times \mathrm{AF} \times \mathrm{ABS} \times \mathrm{ED} \times \mathrm{EF}}{\mathrm{BW} \times \mathrm{AF}} \times \mathrm{CF} \tag{11}$$

式中，$\mathrm{ADD}_{ij\mathrm{ing}}^{k}$、$\mathrm{ADD}_{ij\mathrm{inh}}^{k}$和$\mathrm{ADD}_{ij\mathrm{dermal}}^{k}$为在污染源$k$中样品$i$中$j$元素分别在手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径下的日均暴露量，mg·(kg·d)$^{-1}$；C_{ij}^{k}为样品i中污染源k对元素j的质量贡献，mg·kg^{-1}.其他参数的定义与取值见表2[29,30].

特定源-非致癌健康风险计算公式如下所示：

$$\mathrm{HI}_{ij}^{k} = \sum \mathrm{HQ}_{i,j}^{k} = \sum \frac{\mathrm{ADD}_{ij,p}^{k}}{\mathrm{RfD}_p} \tag{12}$$

式中，HQ_{ij}^{k}和HI_{ij}^{k}分别为样品i中元素j在污染源k中不同接触途径下的非致癌健康风险和总非致癌风险，p为暴露途径，RfD为参考剂量值，mg·(kg·d)$^{-1}$.当HQ_{ij}^{k}或$\mathrm{HI}_{ij}^{k} \leqslant 1$时，认为重金属污染物不存在非致癌风险；当$\mathrm{HQ}_{ij}^{k}$或$\mathrm{HI}_{ij}^{k} > 1$时，认为污染物存在非致癌风险[31].

特定源-致癌健康风险计算公式如下所示[29]：

$$\mathrm{CR}_{ij}^{k} = \sum \mathrm{CR}_{ij,p}^{k} = \sum \mathrm{ADD}_{ij,p}^{k} \times \mathrm{SF}_{i,p} \tag{13}$$

$$\mathrm{TCR}_{ij}^{k} = \sum \mathrm{CR}_{ij}^{k} \tag{14}$$

式中，CR_{ij}^{k}为样品i中来自污染源k对元素j的致癌风险值，TCR_{ij}^{k}为总致癌风险值，SF为致癌斜率因子，mg·(kg·d)$^{-1}$.当CR_{ij}^{k}或$\mathrm{TCR}_{ij}^{k} \leqslant 10^{-6}$时，认为不存在致癌风险；当$10^{-6} < \mathrm{CR}_{ij}^{k}$或$\mathrm{TCR}_{ij}^{k} \leqslant 10^{-4}$时，认为具有潜在致癌风险；当$\mathrm{CR}_{ij}^{k}$或$\mathrm{TCR}_{ij}^{k} > 10^{-4}$时，认为存在致癌风险[31].RfD和SF的取值见表3[18,32,33].

1.5 数据分析方法

采用SPSS 19.0和Microsoft Excel 2019对样本数据进行描述性统计分析，并利用SPSS 19.0软件进行PCA/APCS受体模型拟合分析，运用Origin 2020b和ArcGIS 10.7进行图件的绘制、编辑与处理.

表2 健康风险评价模型的暴露参数及其参考值

Table 2 Reference values for exposure parameter and its definition of health risk assessment model

参数	含义	单位	数值	
			成人	儿童
IngR	手口摄入频率	$mg \cdot d^{-1}$	100	200
InhR	呼吸吸入频率	$m^3 \cdot d^{-1}$	14.5	7.5
ED	暴露年限	a	24	6
EF	暴露频率	$d \cdot a^{-1}$	180	180
BW	平均体重	kg	56.8	15.9
AT(致癌)	平均暴露时间(致癌)	d	ED×365	ED×365
AT(非致癌)	平均暴露时间(非致癌)	d	70×365	70×365
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.01	0.01
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	$m^3 \cdot kg^{-1}$	$1.36×10^9$	$1.36×10^9$

表3 重金属不同暴露途径的参考剂量(RfD)和斜率系数(SF)

Table 3 Reference doses (RfD) and slope coefficient (SF) of different exposure pathways for heavy metals

重金属	$RfD/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$			$SF/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$		
	手口摄入	呼吸吸入	皮肤接触	手口摄入	呼吸吸入	皮肤接触
As	$3×10^{-4}$	$3×10^{-4}$	$1.23×10^{-4}$	1.50	1.51×10	3.66
Cd	$1×10^{-3}$	$1×10^{-3}$	$1×10^{-5}$	$3.8×10^{-1}$	6.3	$3.8×10^{-1}$
Cr	$3×10^{-3}$	$2.86×10^{-5}$	$6×10^{-5}$	$5.01×10^{-1}$	4.2×10	2
Cu	$4×10^{-2}$	$4.02×10^{-2}$	$1.2×10^{-2}$	—1)	—	—
Hg	$3×10^{-4}$	$8.57×10^{-5}$	$2.10×10^{-5}$	—	—	—
Ni	$2×10^{-2}$	$2.06×10^{-2}$	$5.4×10^{-3}$	1.7	$9.01×10^{-1}$	4.25×10
Pb	$3.5×10^{-3}$	$3.52×10^{-3}$	$5.25×10^{-4}$	—	—	—
Zn	$3×10^{-1}$	$3×10^{-1}$	$6×10^{-2}$	—	—	—

1)“—”表示无相关数据,下同

2 结果与讨论

2.1 兰州黄河风情线绿地土壤重金属含量描述性统计

兰州黄河风情线绿地土壤重金属测定结果如表4所示.从中可知，重金属含量平均值由高到低依次为：Zn>Cr>Ni>Pb>Cu>As>Cd>Hg.其中Hg、Cd、Zn、Pb、Cu和As含量平均值分别是兰州市土壤元素背景值[23]的2.37、1.48、1.40、1.22、1.14和1.06倍，表明绿地土壤存在一定程度的As、Cu、Zn、Cd、Hg和Pb的富集超标.然而，研究区所有绿地土壤样点的重金属含量均低于《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)中第二类建设用地(绿地与广场用地)的风险筛选值[34]，说明绿地土壤质量健康安全，为安全无污染风险等级.

重金属变异系数(coefficient of variance, CV)是一种量化研究区域样点重金属含量变异特征和离散程度的指标.重金属CV值越大，说明重金属含量受人类活动影响越显著[35].根据CV值的大小，分为低度变异(≤15%)、中度变异(15%<CV≤36%)和高度变异(>36%)[35].由表4可知，研究区绿地土壤重金属的CV值由大到小依次为：Hg>Cd>Zn>Pb>Cu>Ni>As>Cr.其中As和Cr为低度变异，Cu、Ni、Pb和Zn属于中度变异，Cd和Hg表现为高度变异特征(表2)，说明除了As、Cr和Ni含量在研究区绿地土壤分布较为均匀之外，其余元素均受到了人类活动的干扰，特别是Cd和Hg元素的空间含量差异显著，这或与不同绿地土壤样点所处地理位置的人类活动影响强度差异有关.

此外，与兰州市大气降尘重金属含量均值相比[21,36](表5)，研究区绿地土壤重金属含量均值均表现为较低的特征，这可能与黄河风情线种植的不同植物种群对道路扬尘和大气降尘所携带重金属具有缓冲和滞留等作用有关[18].与同为国内西北地区的银川市[37]和阿克苏市[38]的绿地土壤研究相比，研究区Cr含量均值相对较高，除As外，其余重金属含量均值也要高于银川市，说明兰州市工业活动和交通排放等污染相比于银川市和阿克苏市较为严重，另一方面也可能与当地逆温现

表 4　兰州黄河风情线绿地土壤重金属描述性统计结果

Table 4　Descriptive statistics of heavy metals in greenspace soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

项目	类型	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
绿地土壤	最大值/mg·kg^{-1}	14.37	0.88	81.88	40.77	0.43	38.47	53.13	169.95
	最小值/mg·kg^{-1}	8.23	0.02	42.43	15.87	0.01	11.72	17.18	38.13
	平均值/mg·kg^{-1}	11.10	0.26	59.69	24.89	0.07	28.80	26.38	77.78
	变异系数/%	13.43	53.91	11.90	19.29	103.06	16.73	26.49	31.81
参考值	兰州市土壤元素背景值[23]/mg·kg^{-1}	10.46	0.175	63.85	21.92	0.028	30.34	21.7	55.73
	第二类建设用地风险筛选值[34]/mg·kg^{-1}	60	65	—	18 000	38	900	800	—

象对污染物的抑制扩散有关[15]. 与其他地区同类研究相比，研究区Zn的含量均值高于南京市绿地土壤[4]，As、Cd和Ni的含量均值也高于北京市绿地土壤[39]，然而，相较于齐齐哈尔市[40]和上海市[41]的绿地土壤重金属含量均值，研究区重金属的含量均值均相对较低. 这可能与不同区域的城市产业结构差异和土壤背景值的地域性有关[42].

表 5　兰州黄河风情线绿地土壤重金属和兰州市大气降尘和国内其他城市绿地土壤重金属的对比/mg·kg^{-1}

Table 5　Comparison of heavy metals in greenspace soils in the Yellow River Custom Tourist Line and atmospheric dust in Lanzhou and in greenspace soils of other cities in China/mg·kg^{-1}

项目	城市	区域	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	文献
大气降尘	兰州市	西北	—	2.85	43.96	32.37	—	33.61	133.54	406.32	[36]
	兰州市	西北	—	3.89	95.61	84.25	—	43.13	133.78	379.84	[21]
绿地土壤	兰州市	西北	11.5	0.33	61.00	26.45	0.09	30.39	28.33	91.53	本研究
	北京市	华北	7.98	0.25	—	—	3.76	25.11	38.42	—	[39]
	上海市	东部	—	0.4	62.6	46.6	—	33.0	53.1	240.0	[41]
	南京市	东部	—	0.62	87.29	36.89	—	—	46.30	80.37	[4]
	银川市	西北	11.69	0.13	57.12	19.61	0.04	24.11	22.22	51.54	[37]
	阿克苏市	西北	—	—	33.58	89.66	—	—	79.29	106.12	[38]
	齐齐哈尔市	东北	57.96	—	267.74	151.38	0.61	—	156.5	103.92	[40]

2.2　兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染评价

兰州黄河风情线绿地土壤P_i和PLI评价结果显示，8种重金属的P_i平均值由大到小依次为：Hg(2.37) > Cd(1.47) > Zn(1.40) > Pb(1.25) > Cu(1.14) > As(1.06) > Ni(0.95) > Cr(0.93)，见图2. 由P_i平均值可知，Hg为轻度污染($2 < P_i \leqslant 3$)，Cd、Zn、Pb、Cu和As属于轻微污染($1 < P_i \leqslant 2$)，Ni和Cr为无污染($P_i \leqslant 1$). 具体而言，绿地土壤中Hg污染最为广泛，分别有占比为4.69%、20.31%、20.31%和20.31%的样点处于重度、中度、轻度和轻微污染状态，仍有34.38%的样点为无污染；其次是处于无-重度污染水平的Cd，分别有占比为1.56%、1.56%、18.75%和46.88%的样点处于重度、中度、轻度和轻微污染状态，还有31.25%的样点为无污染(图2)；接着是Zn，整体为无-中度污染，分别有1.56%、3.13%、81.25%和14.06%处于中度、轻度、轻微和无污染状态；再者为无-轻度污染的Pb(图2)，分别有3.13%和71.88%的样点为轻度和轻微污染，还有25.00%的样点为无污染；Cu、As、Ni和Cr均属于无-轻微污染(图2)，其中分别有占比为70.31%、71.88%、40.63%和20.31%的样点为轻微污染.

研究区绿地土壤重金属的PLI值介于0.69~2.20之间，平均值为1.20，总体上为轻度污染(图2). 其中处于中度、轻度和无污染的样点占比分别为28.13%、71.88%和28.12%，说明研究区绝大部分绿地土壤为轻度污染.

2.3　兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染源解析

采用APCS-MLR模型对研究区绿地土壤重金属污染进行定量源解析，将原始数据导入SPSS 26.0软件进行标准化处理后，进行Kaiser-Meyer-Olkin值(KMO = 0.831)和Bartlett's球体检验($P<0.001$)，结果表明该数据适用于PCA分析. 接着以主成分特征值大于1和前n个主成分累计解释总方差大于76%的原则共提取了3个主成分因子，分别解释了总方差的54.00%、12.12%和10.28%(表6). 接着将PCA分析的因子得分转化为绝对主因子得分(APCS)，再将各APCS与各重金属含量做多元线性回归，可得As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn的拟合度R^2分别为0.776、0.834、0.805、0.678、0.562、0.903、0.863和0.690，除Hg的拟合度较低外，其余元素均大于0.65，且各重金属元素预测含量与实测含量比值均接近于1，说明多元线性回归方程的拟合效果较好，

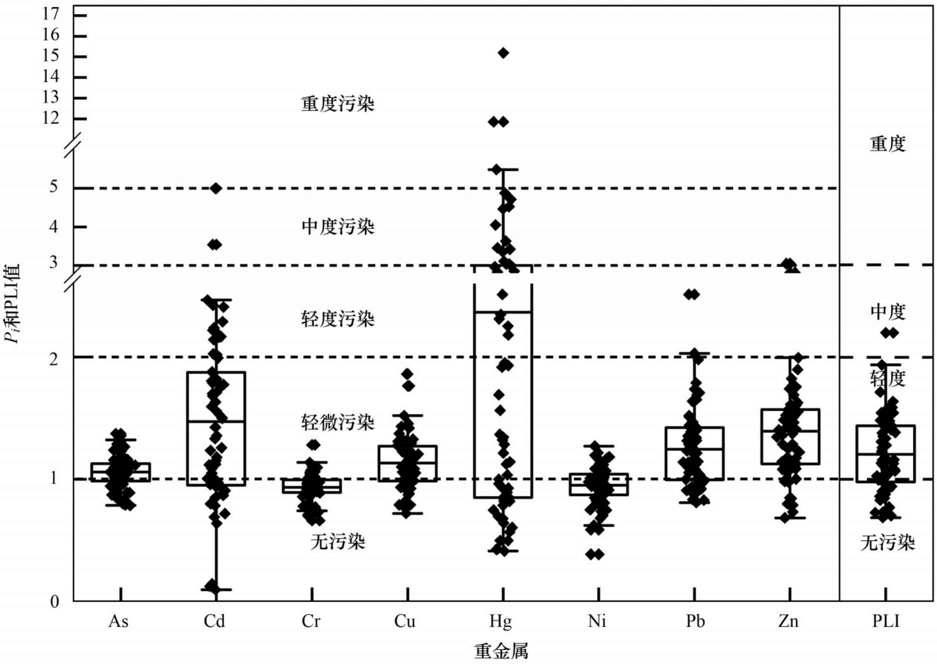


图 2 兰州黄河风情线绿地土壤重金属单因子指数和污染负荷指数箱型图

Fig. 2 Boxplot of single factor pollution index and pollution load index of heavy metals in greenspace soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

表 6 黄河风情线绿地土壤重金属含量因子分析结果

Table 6 Results of heavy metal factor analysis for greenspace soils from the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

项目		PCA1	PCA2	PCA3	APCS1	APCS2	APCS3
重金属	As	0.783	0.031	0.403	0.329	0.726	0.374
	Cd	0.854	−0.137	−0.294	0.853	0.272	0.179
	Cr	0.45	0.769	0.105	0.078	0.082	0.89
	Cu	0.803	−0.176	0.038	0.621	0.517	0.157
	Hg	0.602	0.447	−0.008	0.342	0.178	0.643
	Ni	0.681	−0.319	0.58	0.232	0.921	0.032
	Pb	0.839	−0.055	−0.396	0.884	0.159	0.238
	Zn	0.774	−0.152	−0.26	0.777	0.261	0.137
特征值		4.32	0.969	0.822	2.783	1.849	1.479
方差贡献率/%		54.005	12.117	10.277	34.79	23.118	18.49
累计贡献率/%		54.005	66.122	76.399	34.79	57.909	76.399

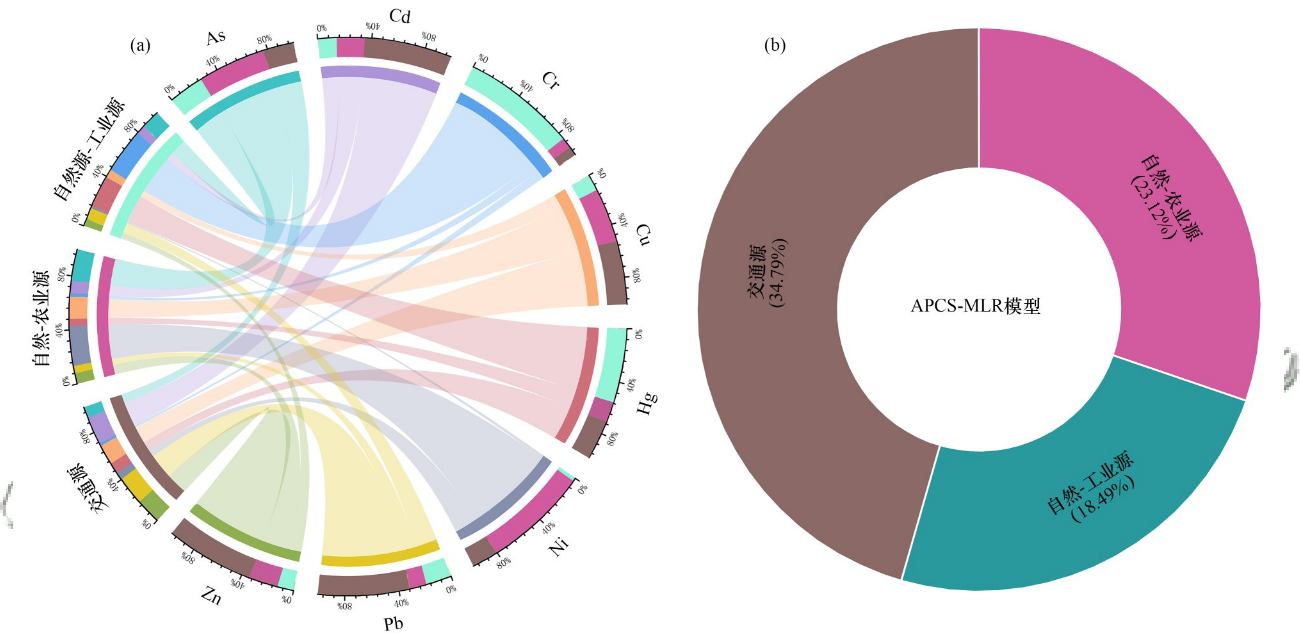
APCS-MLR模型的源解析结果整体较好.绿地土壤重金属的污染源贡献率图谱见图3.

APCS1中Pb、Cd、Zn和Cu的载荷较高，贡献率分别为88.4%、85.3%、77.7%和62.1%[图3(a)].其中Cd属于高度变异，Pb、Cu和Zn为中度变异，且前述分析表明绿地土壤存在一定程度的Cu、Zn、Cd和Pb的富集超标，说明APCS1可能受人类活动影响较大.有研究表明，机动车引擎、刹车片、镀锌部件和轮胎的磨损与腐蚀以及燃料燃烧和汽车尾气的排放等交通活动会向周边环境释放Cd、Pb、Cu和Zn元素[43, 44].兰州黄河风情线坐落于交通动脉的南北滨河路旁，交通繁忙、车流如织，部分核心景区和景点处在交通瓶颈地段，随着兰州市机动车保有量的快速增加，交通流量、道路扬尘密度和尾气排放量也随之剧增，道路交通活动产生的重金属颗粒经大气沉降和空气粉尘吸附作用，最终富集于周边绿地土壤中.因此，APCS1受道路交通的影响，可视为交通源.

APCS2载荷较高的元素为Ni、As和Cu，贡献率分别为92.1%、72.6%和51.7%[图3(a)].其中Cu属于中度变异，As和Ni为低度变异，Ni的含量均值略低于兰州市背景值，而As含量均值却略高于兰州市背景值(表4).说明APCS2受到了一定的人类活动影响.有研究表明Ni属于铁族元素，易与土壤中氧化物结合，其来源与成土母质关联密切[43].而农田土壤中杀虫剂和除草剂制品的使用、氮肥和磷肥等复合肥及有机肥的施用会引起As和Ni含量的增加[45].兰州黄河风情线是由滨河路绿色长廊沿线景点串联

而成的滨河风景区，景区管委会不定期地对沿线绿地植物进行喷施农药和施肥等绿化养护管理工作．虽然景区使用低毒、低残留农药和生物农药进行养护工作，但长期的施肥和杀虫除草剂的使用势必会引起绿地土壤中As含量的累积．因此，APCS2是自然-农业源．

APCS3的主要载荷元素为Cr和Hg，贡献率为89.0%和64.3%[图3(a)]．Cr的含量均值低于兰州市背景值，且Cr为低度变异，而Hg属于高度变异，表明APCS3受到了一定的人类活动影响．有研究发现土壤中Cr元素主要受成土母质和地球化学作用的影响，且其分布多与自然因素有关[43]．兰州市耕地土壤重金属溯源研究也认为兰州土壤Cr元素源自成土母质[46]．而土壤中Hg的累积与燃煤排放、有色金属冶炼和水泥生产等工业活动有关[43, 47]．研究区位于黄河上游最大的工业城市——兰州，石油、机械、电力和冶金等工业为兰州市的支柱产业，以上工业活动产生的烟尘、粉尘和废气等也会通过风力作用或雨水径流向周边环境扩散、沉降并最终蓄积于土壤中．除此之外，位于兰州以西的河西走廊地区的矿产开发、金属冶炼和燃煤发电等工业活动丰富而密集，加之河西走廊地区常年以西北风为主，工业活动产生的粉尘颗粒进入大气，在风力搬运作用下，进行长距离传输，最终通过大气干湿沉降进入土壤[18]．因此，APCS3代表了自然-工业源．



(a)源解析；(b)因子贡献率

图3　基于APCS-MLR模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属溯源解析

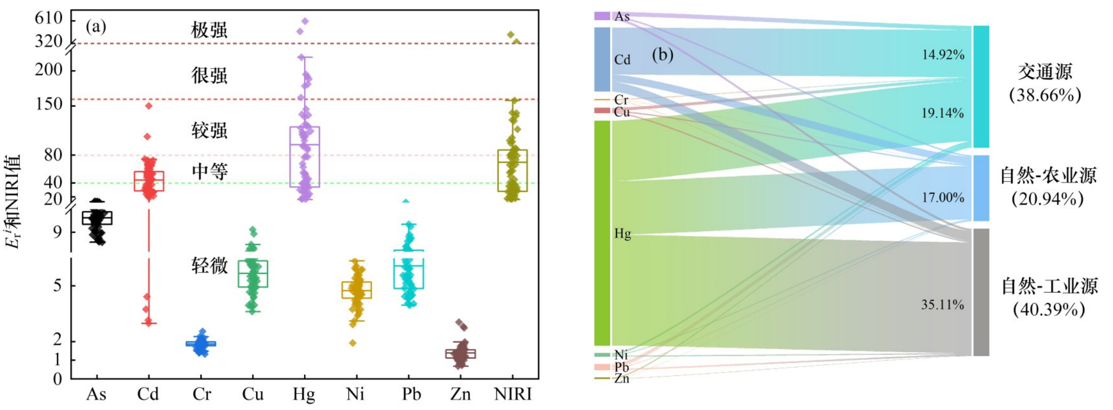
Fig. 3　Source apportionment for heavy metals from greenspace soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou based on the APCS-MLR model

综上所述，交通源对研究区绿地土壤重金属累计的贡献率最高，为34.79%；其次为自然-农业源，贡献率为23.12%；自然-工业源的贡献率最小，为18.49%[图3(b)]．

2.4　兰州黄河风情线绿地土壤重金属生态风险与特定源-综合生态风险评价

研究区绿地土壤重金属单项生态风险指数(E_r^i)和综合生态风险指数(NIRI)评价结果显示，E_r^i的平均值由高到低依次为：Hg(94.61)>Cd(44.18)>As(10.61)>Pb(6.08)>Cu(5.68)>Ni(4.75)>Cr(1.87)>Zn(1.40)[图4(a)]，除Cd和Hg分别存在中等和较强生态风险之外，其余重金属均为轻微生态风险．此外，绿地土壤重金属的NIRI值为16.18~433.89[图4(a)]，说明存在轻微至极高的生态风险，平均值为69.60，为中等生态风险．

基于特定源-综合生态风险评价模型的结果如图4(b)所示．绿地土壤重金属的3种污染源对研究区综合生态风险的贡献率由高到低依次为：自然-工业源(40.39%)>交通源(38.66%)>自然-农业源(20.94%)．由此可见，自然-工业源对生态风险的贡献率最高，这与APCS-MLR源解析结果存在差异．由APCS-MLR分析结果可知，具有高载荷Cr和Hg元素的自然-工业源是对重金属贡献最低的污染源，但却是对综合生态风险贡献最高的污染源，其次为具有高载荷Pb、Cd、Zn和Cu元素的交通源．这既与Cd和Hg是研究区绿地土壤主要的潜在生态危害元素有关，也与重



(a)生态风险评价;(b)不同污染源中重金属对综合生态风险的贡献率

图4 兰州黄河风情线绿地土壤重金属生态风险评价

Fig. 4 Ecological risk assessment of heavy metals from greenspace soils in the Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou

金属元素的毒性高低有关.由不同污染源的重金属对综合生态风险的贡献值分析可知,Cd和Hg的总风险占比超过90%,说明Cd和Hg是污染源生态风险的主要贡献元素.此外,Hg和Cd元素具有较高的毒性,远远高于其他污染元素的毒性系数,从而具有较高的生态风险[6,48].这也印证了具有高贡献率的污染源并不一定具有高的生态风险[6,48].综上,Cd和Hg为研究区绿地土壤生态风险优先控制污染元素,自然-工业源为优先控制污染源.

2.5 兰州黄河风情线绿地土壤重金属特定源-人体健康风险评价

特定源-人体健康风险评价模型的结果如表7所示.就非致癌风险而言,不同污染源对成人和儿童的总HI值分别为5.43×10^{-2}和8.55×10^{-2},均小于阈值1,表明不同污染源下的绿地土壤重金属对人体健康不存在非致癌健康风险.对于单个重金属元素而言,各污染源情境下的不同重金属元素对成人和儿童的HI值也均小于1,表明研究区绿地土壤重金属对成人和儿童不存在非致癌健康风险.对于致癌风险而言,不同污染源对成人和儿童的TCR值分别为2.17×10^{-4}和1.38×10^{-3},均高于致癌风险量级水平(1.0×10^{-4}),说明存在致癌风险,且儿童的风险要高于成人,这与儿童的体型、生理特征和行为习惯相关[48].从单个重金属元素来看,自然-农业源情境下的不同重金属元素对成人的TCR值超过阈值1×10^{-4},而3种污染源情境下的不同重金属元素对儿童的TCR值均超过阈值1×10^{-4}.表明在自然-农业源下的绿地土壤重金属暴露对成人存在较高致癌健康风险,而在各污染源情境下的绿地土壤重金属暴露对儿童均有较高致癌风险,其中Ni和Cr对成人存在显著致癌风险,Ni、Cr和As对儿童存在显著致癌风险.然而,由前述分析可知,研究区绿地土壤所有重金属含量均低于《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)中第二类建设用地(绿地与广场用地)的风险筛选值[34],意味着重金属对人体健康的风险可以忽略.而致癌风险评价模型结果却显示存在显著致癌性,这是由于致癌风险评价模型的结果一方面取决于土壤重金属的含量和生物有效性[49],另一方面也与评价模型中评估基础参数数据有密切的关系[50].由于本研究基于土壤重金属的总量来量化对人体健康的直接影响,并未考虑绿地植物对重金属的转归和人体对重金属的拮抗作用等间接因素,所以评价结果有一定的放大效应,但仍需引起关注并加强预警和防范.此外,本研究结果不仅证实了基于重金属总量的健康风险评价结果具有放大性,而且也说明了致癌风险模型中的评估基础参数在建设用地健康风险评价过程中需要调整,即未来还需进一步开展不同土地利用条件下和不同土壤类型情境下全面、系统和连续的暴露参数调查,不断完善和细化我国的健康风险评估暴露参数.

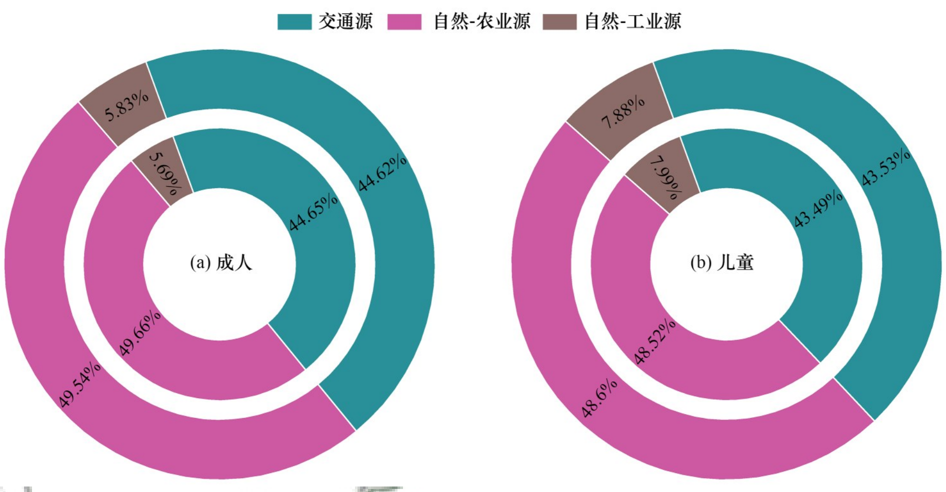
此外,3种污染源对成人和儿童的非致癌风险贡献率变化趋势一致(图5),均为:自然-农业源>交通源>自然-工业源.其中贡献较高的自然-农业源具有的载荷元素为As和Ni,相较于其他元素,As和Ni显然具有较低的参考剂量(RfD)和较高的斜率系数(SF),更易于产生健康风险[29].此外,具有较高毒性的As和Ni也不是污染较重的元素(图2),却是最高的健康风险贡献元素.这与不同重金属健康风险暴露参数不同和毒性系数的强弱及健康风险叠加累积效应等有关[51].此现象与石文静等[7]的研究结果相似,也进一步证实了污染程度严重的元素不一定就具有较高的健康风险[7,51].

由上可知,研究区绿地土壤重金属对成人和儿童不具有非致癌健康风险,但是As、Cr和Ni却对成人和儿童构成不同程度的致癌健康风险.为此,As

表 7　不同来源重金属对成人和儿童的特定源-健康风险评价

Table 7　Source-specific health risks of heavy metals from different sources for adults and children

类型	项目	成人				儿童			
		交通源	自然-农业源	自然-工业源	总和	交通源	自然-农业源	自然-工业源	总和
非致癌风险	As	8.98×10^{-3}	9.98×10^{-3}	1.47×10^{-3}	2.04×10^{-2}	1.56×10^{-2}	1.74×10^{-2}	2.56×10^{-3}	3.56×10^{-2}
	Cd	3.56×10^{-4}	2.64×10^{-4}	2.65×10^{-5}	6.46×10^{-4}	4.81×10^{-4}	3.57×10^{-4}	3.58×10^{-5}	8.74×10^{-4}
	Cr	1.19×10^{-2}	1.38×10^{-2}	1.12×10^{-3}	2.68×10^{-2}	1.70×10^{-2}	1.96×10^{-2}	1.59×10^{-3}	3.83×10^{-2}
	Cu	1.62×10^{-4}	1.72×10^{-4}	2.95×10^{-5}	3.64×10^{-4}	2.80×10^{-4}	2.98×10^{-4}	5.09×10^{-5}	6.28×10^{-4}
	Hg	1.02×10^{-4}	7.71×10^{-5}	4.74×10^{-5}	2.26×10^{-4}	1.63×10^{-4}	1.23×10^{-4}	7.58×10^{-5}	3.62×10^{-4}
	Ni	3.68×10^{-4}	4.06×10^{-4}	8.09×10^{-5}	8.55×10^{-4}	6.34×10^{-4}	6.99×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.47×10^{-3}
	Pb	2.25×10^{-3}	2.23×10^{-3}	3.05×10^{-4}	4.78×10^{-3}	3.78×10^{-3}	3.74×10^{-3}	5.13×10^{-4}	8.04×10^{-3}
	Zn	8.24×10^{-5}	6.93×10^{-5}	1.17×10^{-5}	1.63×10^{-4}	1.40×10^{-4}	1.18×10^{-4}	2.00×10^{-5}	2.78×10^{-4}
	总 HI	2.42×10^{-2}	2.70×10^{-2}	3.09×10^{-3}	5.43×10^{-2}	3.82×10^{-2}	4.24×10^{-2}	4.99×10^{-3}	8.55×10^{-2}
致癌风险	As	1.18×10^{-5}	1.31×10^{-5}	1.93×10^{-6}	2.68×10^{-5}	8.22×10^{-5}	9.13×10^{-5}	1.34×10^{-5}	1.87×10^{-4}
	Cd	8.98×10^{-8}	6.67×10^{-8}	6.68×10^{-9}	1.63×10^{-7}	6.34×10^{-7}	4.71×10^{-7}	4.72×10^{-8}	1.15×10^{-6}
	Cr	2.16×10^{-5}	2.49×10^{-5}	2.02×10^{-6}	4.85×10^{-5}	1.48×10^{-4}	1.70×10^{-4}	1.38×10^{-5}	3.31×10^{-4}
	Ni	6.09×10^{-5}	6.72×10^{-5}	1.34×10^{-5}	1.41×10^{-4}	3.71×10^{-4}	4.10×10^{-4}	8.16×10^{-5}	8.63×10^{-4}
	TCR	9.44×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.73×10^{-5}	2.17×10^{-4}	6.02×10^{-4}	6.72×10^{-4}	1.09×10^{-4}	1.38×10^{-3}



内圆表示不同污染源对非致癌健康风险的贡献率，外圆表示不同污染源对致癌健康风险的贡献率

图 5　不同来源对成人和儿童的特定源-健康风险占比

Fig. 5　Proportion of source-specific health risks from different sources for adults and children

和 Ni 为人体健康风险优先控制污染元素，自然-农业源为优先控制污染源.

3　结论

（1）研究区绿地土壤重金属除 Cr 和 Ni 的含量均值较低外，其余 As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 的含量均值均高于兰州市土壤元素背景值，存在一定程度的累积超标现象.

（2）单因子污染指数评价结果显示，研究区绿地土壤 Cr 和 Ni 为清洁无污染，Cd、Zn、Pb、Cu、As 和 Hg 存在不同程度的污染，需关注 Hg 污染. 污染负荷指数评价结果显示，研究区整体上处于无-中度污染水平，以轻度污染为主.

（3）APCS-MLR 源解析表明，研究区绿地土壤重金属 Pb、Cd 和 Zn 主要受交通源的影响，贡献率分别为 88.4%、85.3% 和 77.7%；Ni 和 As 受自然-农业源的影响，贡献率分别为 92.1% 和 72.6%；Cu 分别受交通源和农业源的影响，贡献率为 62.1% 和 51.7%；Cr 和 Hg 受自然-工业源的影响，贡献率为 89.0% 和 64.3%.

（4）特定源-综合生态风险指数表明，自然-工业源对研究区生态风险贡献最大，为优先控制污染源，Cd 和 Hg 为生态风险优先控制污染元素；特定源-健康风险评估表明，研究区重金属对人群不构成非致癌健康风险，但 As、Cr 和 Ni 对人群存在不同程度较高致癌健康风险. 此外，自然-农业源为人体健康风险优先控制污染源，As 和 Ni 为优先控制污染元素.

参考文献：

[1]　赵靓，梁云平，陈倩，等. 中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学，2020，**41**（12）：5552-5561.
Zhao L，Liang Y P，Chen Q，*et al*. Spatial distribution，contamination assessment，and sources of heavy metals in the

urban green space soils of a city in North China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5552-5561.

[2] 季益文, 张浪, 张青萍, 等. 区域绿地概念形成脉络与深层发展研究[J]. 中国环境管理, 2021, **13**(1): 88-95, 34.
Ji Y W, Zhang L, Zhang Q P, *et al*. Research on the formation and deep development of the concept of regional green space [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, **13**(1): 88-95, 34.

[3] 韩继刚, 李刚, 张维维, 等. 城市绿地土壤健康质量问题与对策[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(1): 268-276.
Han J G, Li G, Zhang W W, *et al*. Problems and countermeasures of soil health quality in urban green space[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(1): 268-276.

[4] 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.

[5] Qiao Z H, Wang B, Yao H F, *et al*. Urbanization and greenspace type as determinants of species and functional composition of collembolan communities [J]. Geoderma, 2022, **428**, doi: 10.1016/j.geoderma.2022.116175.

[6] Guo G H, Wang Y T, Zhang D G, *et al*. Source-specific ecological and health risks of potentially toxic elements in agricultural soils in southern Yunnan Province and associated uncertainty analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **417**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126144.

[7] 石文静, 周翰鹏, 孙涛, 等. 矿区周边土壤重金属污染优先控制因子及健康风险评价研究[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(8): 1616-1628.
Shi W J, Zhou H P, Sun T, *et al*. Research on priority control factors and health risk assessment of heavy metal pollution in soil around Mining areas[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(8): 1616-1628.

[8] Yan Y, Wan R A, Yu R L, *et al*. A comprehensive analysis on source-specific ecological risk of metal(loid)s in surface sediments of mangrove wetlands in Jiulong river estuary, China [J]. CATENA, 2022, **209**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105817.

[9] Yan Y, Han L, Yu R L, *et al*. Background determination, pollution assessment and source analysis of heavy metals in estuarine sediments from Quanzhou Bay, Southeast China [J]. CATENA, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104322.

[10] Huang R J, Cheng R, Jing M, *et al*. Source-specific health risk analysis on particulate trace elements: coal combustion and traffic emission as major contributors in wintertime Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(19): 10967-10974.

[11] Sakizadeh M, Zhang C S. Source identification and contribution of land uses to the observed values of heavy metals in soil samples of the border between the northern Ireland and Republic of Ireland by receptor models and redundancy analysis[J]. Geoderma, 2021, **404**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115313.

[12] 郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 等. 基于PMF模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(9): 5242-5252.
Zheng Y L, Wen H H, Cai L M, *et al*. Source analysis and risk assessment of heavy metals in soil of county scale based on PMF model[J]. Environmental Science, 2023, **44**(9): 5242-5252.

[13] Zhou L F, Zhao X L, Meng Y B, *et al*. Identification priority source of soil heavy metals pollution based on source-specific ecological and human health risk analysis in a typical smelting and mining region of South China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, **242**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113864.

[14] Men C, Liu R M, Xu L B, *et al*. Source-specific ecological risk analysis and critical source identification of heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121763.

[15] 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.

[16] 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 等. 兰州市耕地"五毒"重金属的风险评价与归因分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4767-4778.
Zhang L R, Peng X B, Ma Y L, *et al*. Risk assessment and attribution analysis of "Five Toxic" heavy metals in cultivated land in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4767-4778.

[17] 李军, 李开明, 位静, 等. 兰州BRT沿线站台灰尘及其两侧绿化带土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 地球与环境, 2022, **50**(2): 228-240.
Li J, Li K M, Wei J, *et al*. Contaminations and health risks of heavy metals from the roadside greenbelt soils and dust along the BRT platform in Lanzhou[J]. Earth and Environment, 2022, **50**(2): 228-240.

[18] 李军, 李开明, 王晓槐, 等. 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[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3475-3487.
Li J, Li K M, Wang X H, *et al*. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface dusts and surrounding green land soils from Yellow River custom tourist line in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3475-3487.

[19] 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.

[20] Liu J T, Ruan Y, Wu Q, *et al*. Has the mortality risk declined after the improvement of air quality in an ex-heavily polluted Chinese city-Lanzhou? [J]. Chemosphere, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125196.

[21] 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.

[22] Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis [M]. Washington: Scripta Book Co., 1974.

[23] 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.

[24] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al*. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 1980, **33**(1-4): 566-575.

[25] Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston[J]. Atmospheric Environment (1967), 1985, **19**(1): 9-25.

[26] Gholizadeh M H, Melesse A M, Reddi L. Water quality assessment

and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of south Florida [J]. Science of the Total Environment, 2016, **566-567**: 1552-1567.

[27] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[28] Lei M, Li K, Guo G H, *et al*. Source-specific health risks apportionment of soil potential toxicity elements combining multiple receptor models with Monte Carlo simulation[J]. Science of the Total Environment, 2022, **817**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152899.

[29] U.S. EPA. Exposure factors handbook 2011 edition (final report) [R]. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2011.

[30] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].

[31] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment) [R]. Washington: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2009.

[32] U. S. EPA. Risk based concentration table [R]. Philadelphia: United States Environmental Protection Agency, 2000.

[33] Wang X F, Deng C B, Sunahara G, *et al*. Risk assessments of heavy metals to children following non-dietary exposures and sugarcane consumption in a rural area in Southern China [J]. Exposure and Health, 2020, **12**(1): 1-8.

[34] 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].

[35] 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.

[36] 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.

[37] 孙变变, 赵银鑫, 常丹, 等. 银川市城市绿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(6): 262-268, 277.
Sun B B, Zhao Y X, Chang D, *et al*. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in green spaces of Yinchuan City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(6): 262-268, 277.

[38] 美合日阿依·希尔亚孜旦, 玉米提·哈力克, 阿不都艾尼·阿不里. 阿克苏市绿地土壤重金属污染及植物富集特征[J]. 生态科学, 2019, **38**(6): 30-36.
Mihray X, Ümüt H, Abduani A. Characteristics of heavy metals soil pollution and plant accumulation in urban green space of Aksu [J]. Ecological Science, 2019, **38**(6): 30-36.

[39] 杨少斌, 于鑫, 孙向阳, 等. 北京城区绿地土壤重金属污染评价与空间分析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(5): 933-941.
Yang S B, Yu X, Sun X Y, *et al*. Pollution assessment and spatial structure analysis of heavy metals of greenbelt soil in Beijing urban area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(5): 933-941.

[40] 乔雪, 邓琳, 王今雨, 等. 齐齐哈尔市主城区城市绿地土壤重金属来源解析与健康风险评价[J]. 土壤通报, 2019, **50**(1): 217-225.
Qiao X, Deng L, Wang J Y, *et al*. Sources of soil heavy metals and their health risk evaluation in urban green space of Qiqihar City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(1): 217-225.

[41] 滕吉艳. 上海城市中心区不同类型绿地土壤重金属污染特征[J]. 土壤通报, 2021, **52**(4): 927-933.
Teng J Y. Contamination characteristics of heavy metals in soils from urban green space in central Shanghai[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(4): 927-933.

[42] 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 等. 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 1-10.
Peng C, He Y L, Guo Z H, *et al*. Characteristics and risk assessment of heavy metals in urban soils of major cities in China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 1-10.

[43] Fan P, Lu X W, Yu B, *et al*. Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal(loid)s in resuspended megacity street dust[J]. Environment International, 2022, **160**, doi: 10.1016/j.envint.2021.107073.

[44] Gorka R, Kumar R, Yadav S, *et al*. Health implications, distribution and source apportionment of heavy metals in road deposited dust of Jammu City in northern India[J]. Chemosphere, 2022, **308**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136475.

[45] Zhao H D, Lan X P, Yu F X, *et al*. Comprehensive assessment of heavy metals in soil-crop system based on PMF and evolutionary game theory [J]. Science of the Total Environment, 2022, **849**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157549.

[46] Chai L, Wang Y H, Wang X, *et al*. Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107507.

[47] 李军, 李旭, 高世刚, 等. 基于APCS-MLR和PMF模型的燃煤电厂周边土壤潜在有毒元素(PTEs)污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(10): 5687-5703.
Li J, Li X, Gao S G, *et al*. Contamination characteristics and source apportionment of potentially toxic elements in soil around the coal-fired power plant based on APCS-MLR and PMF models[J]. Environmental Science, 2023, **44**(10): 5687-5703.

[48] Shi X M, Liu S, Song L, *et al*. Contamination and source-specific risk analysis of soil heavy metals in a typical coal industrial city, central China[J]. Science of the Total Environment, 2022, **836**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155694.

[49] 刘同, 刘传朋, 邓俊, 等. 山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2022, **49**(5): 1497-1508.
Liu T, Liu C P, Deng J, *et al*. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in eastern Yinan County, Shandong Province[J]. Geology in China, 2022, **49**(5): 1497-1508.

[50] 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 等. 海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4590-4600.
Yang J Z, Gong J J, Wang Z L, *et al*. Enrichment factors, health risk, and source identification of heavy metals in agricultural soils in semi-arid region of Hainan Island[J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4590-4600.

[51] 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 等. 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 936-945.
Liu Y, He Z H, Niu X K, *et al*. Health risk assessment of soil heavy metals in a small watershed of a mining area in Yunnan[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 936-945.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 45 No. 4

Apr. 15, 2024

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China ······ YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, *et al.* (1869)

Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency ······ ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)

Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition ······ ZHANG Jiang-yan (1888)

Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing ······ LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, *et al.* (1898)

Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University ······ CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)

Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing ······ YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, *et al.* (1917)

Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China ······ WU Xue-ping (1926)

Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Chinese Cities ······ LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)

Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021 ······ CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)

Analysis of the Characteristics and Causes of $PM_{2.5}$ and O_3 Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period ······ YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, *et al.* (1963)

$PM_{2.5}$ Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter ······ FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, *et al.* (1975)

Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei ······ LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, *et al.* (1983)

Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric $PM_{2.5}$ Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region ······ BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, *et al.* (1994)

Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in $PM_{2.5}$ During Winter in Liaocheng City ······ ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, *et al.* (2003)

Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa ······ GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, *et al.* (2011)

VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries ······ WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, *et al.* (2019)

Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes ······ LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, *et al.* (2028)

Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment ······ GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, *et al.* (2039)

Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River ······ WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, *et al.* (2054)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang ······ LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, *et al.* (2067)

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China ······ ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, *et al.* (2080)

Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes ······ MENG Ling-hua (2096)

Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin ······ ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, *et al.* (2107)

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin ······ WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, *et al.* (2118)

Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City ······ LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, *et al.* (2129)

Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network ······ XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)

Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed ······ WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, *et al.* (2150)

Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus ······ QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, *et al.* (2160)

Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects ······ LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, *et al.* (2171)

Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation ······ SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, *et al.* (2185)

Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism ······ LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, *et al.* (2195)

Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar ······ MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)

Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin ······ GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, *et al.* (2211)

Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake ······ YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, *et al.* (2223)

Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River ······ LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, *et al.* (2233)

Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers ······ GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, *et al.* (2246)

Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process ······ HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, *et al.* (2259)

Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area ······ ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, *et al.* (2268)

Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost ······ YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, *et al.* (2280)

Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field ······ YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, *et al.* (2292)

Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics ······ WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, *et al.* (2304)

Effect of Different Soil Salinities on N_2O Emission: A Meta-analysis ······ HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, *et al.* (2313)

Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ······ ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)

Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model ······ ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, *et al.* (2332)

Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction ······ XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, *et al.* (2342)

Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning ······ ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, *et al.* (2353)

Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity ······ LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, *et al.* (2363)

Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall ······ ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, *et al.* (2373)

Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity ······ ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, *et al.* (2385)

Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil ······ LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, *et al.* (2394)

Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in *Pinus tabuliformis* Forest in Taiyue Mountain ······ MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, *et al.* (2406)

Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites ······ ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, *et al.* (2417)

Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou ······ LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, *et al.* (2428)

Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China ······ ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, *et al.* (2440)

Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing ······ LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, *et al.* (2450)

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines ······ WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, *et al.* (2461)

Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil ······ LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, *et al.* (2474)

Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems ······ ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, *et al.* (2480)