

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏娟, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

基于源导向和蒙特卡洛模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估

陈莲¹, 邹子航^{1,2}, 张培珍², 王雨菡^{1,2}, 王振江^{1,3*}, 林森¹, 唐翠明^{1,3}, 罗国庆^{1,3}, 钟建武¹, 李智毅¹, 王圆¹

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广州 510610; 2. 广东海洋大学电子信息与工程学院, 湛江 524000; 3. 农业农村部华南都市农业重点实验室, 广州 510610)

摘要: 以广东省某市为研究区域, 通过研究其表层土壤重金属含量及空间分布特征, 明确土壤重金属污染情况和优先控制因子, 为该市土壤重金属污染防治提供基础数据. 对该市 221 个土壤样品中的重金属含量特征进行分析, 并通过潜在健康风险评估(HRA)模型、PMF受体模型和蒙特卡洛模型进行潜在健康风险评估、来源解析和主控因子分析. 结果发现, 该市土壤重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为18.16、0.43、1.46、68.57、98.34、64.19、26.53和257.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异程度为中高度变异. 除Ni元素以外, 土壤其余重金属元素含量均已一定程度超过广东省土壤背景值, 且Cd和Zn的含量已超过国家二级标准, 重金属污染已较为严重; 重金属来源主要为工业源, 自然母质、铅蓄电池制造、交通、人为耕作和农药化肥投入也对土壤重金属累积有不可忽视的影响; 土壤重金属对儿童和成人均存在一定程度的可耐受致癌健康风险, 非致癌风险可以忽略不计; 儿童的潜在健康风险大于成人, 主要暴露途径均为经口摄入; 农药化肥投入源和As应该作为该市土壤重金属影响健康风险的主控因子, 其次为混合源和Cr; 重金属空间分布特征及相对污染程度存在差异, 应深化分区监测管控, 加强土壤的污染防治, 减少土壤重金属的人为输入.

关键词: 土壤; 重金属; 健康风险评估; 蒙特卡洛; PMF模型; 主控因子

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2983-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305270

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models

CHEN Lian¹, ZOU Zi-hang^{1,2}, ZHANG Pei-zhen², WANG Yu-han^{1,2}, WANG Zhen-jiang^{1,3*}, LIN Sen¹, TANG Cui-ming^{1,3}, LUO Guo-qing^{1,3}, ZHONG Jian-wu¹, LI Zhi-yi¹, WANG Yuan¹

(1. Research Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China; 2. School of Electronic Information and Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524000, China; 3. South China Urban Agriculture Key Laboratory of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Taking a city in Guangdong Province as the research area, the concentration and spatial distribution characteristics of heavy metals in the surface soil were studied to clarify the situation of soil heavy metal pollution and priority control factors, providing basic data for the prevention and control of soil heavy metal pollution in the city. The content characteristics of heavy metals in 221 soil samples in the city were analyzed, and the potential health risk assessment and source analysis were carried out through the Monte Carlo model, the potential health risk assessment (HRA) model, and the PMF receptor model. It was found that heavy metals $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Hg})$, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Ni})$, and $\omega(\text{Zn})$ in the soil of the city were 18.16, 0.43, 1.46, 68.57, 98.34, 64.19, 26.53, and 257.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, with a moderate to high degree of variation. Except for Ni concentration, the soil concentrations of other heavy metal elements exceeded the background values of soil in Guangdong Province to a certain extent, and the concentrations of Cd and Zn exceeded the national secondary standards, resulting in severe heavy metal pollution; the main sources of heavy metals were industrial sources, and natural parent materials, lead battery manufacturing, transportation, artificial cultivation, and pesticide and fertilizer inputs also had an undeniable impact on the accumulation of heavy metals in the soil. Heavy metals in the soil had a certain degree of tolerable carcinogenic health risk for both children and adults, whereas non-carcinogenic risks could be ignored. The potential health risk of children was greater than that of adults, and the main exposure route was through oral intake. The input sources of pesticides and fertilizers and As should be the main controlling factors for the health risks of heavy metals in the city's soil, followed by mixed sources and Cr. There were differences in the spatial distribution characteristics and relative pollution levels of heavy metals, and it is necessary to deepen zoning monitoring and control, strengthen soil pollution prevention and control, and reduce human input of heavy metals in soil.

Key words: soil; heavy metals; health risk assessment; Monte Carlo; PMF model; master factor

随着经济的快速发展, 城市产业结构不断调整, 人为活动影响剧烈, 土壤重金属污染成为日趋

收稿日期: 2023-05-30; 修订日期: 2023-07-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42007379); 广州市基础与应用基础研究项目(202201010672); 广东省农业科学院“优秀博士”人才引进项目(R2021YJ-YB3007); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-18-SYZ12); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设(2023KJ124)

作者简介: 陈莲(1989~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为城市土壤污染, E-mail: chenlian@gdaas.cn

* 通信作者, E-mail: wzj@gdaas.cn

严重的生态环境问题^[1]. 土壤重金属污染来源广泛, 包括采矿、冶炼、制革和染料等工业排放的“三废”及汽车尾气排放、农药和化肥的施用等^[2-5]. 重金属在土壤中积累到一定程度不仅导致土壤退化、农作物产量和品质降低, 而且通过径流和淋洗作用污染地表水和地下水, 恶化水文环境, 并可通过直接接触、食物链等途径危及人类的生命和健康^[6-8]. 我国土壤重金属污染问题极为严重, 全国污染点位超标率达 16.1% 以上^[9,10]. 广东省是我国重金属污染防治重点省份, 珠三角 40% 以上的农田菜地重金属污染超标, 其中 10% 属严重超标^[11]. 因此, 土壤重金属污染问题极为普遍, 已成为全球关注的环境焦点.

城市不同功能区在经济发展、产业结构、人口密度及交通状况的差别导致土壤重金属污染的空间特征及潜在风险具有显著差异^[12], 如张军等^[13]研究发现宝鸡市城区土壤重金属含量、风险等级在空间维度上随着城区面积的扩展, 出现污染区域由城区西南部向东部迁移的特征; 夏子书等^[14]采用 PMF 模型对宁南山区小流域土壤研究发现重金属主要来自: 施肥和工业排放混合源、农业活动源、自然母质源、农药使用和矿业开发排放混合源和大气沉降源; 郑永立等^[15]研究发现广东省揭阳市榕城区重金属主要来自交通、成土母质、大气沉降和工业源, 各重金属元素对人体的非致癌健康风险可忽略不计, 对成年和儿童均存在一定程度的可耐受致癌健康风险; 郭志娟等^[16]研究发现, 雄安新区整体土壤重金属含量属于无污染状态, 各重金属元素对成年人的非致癌健康风险可以忽略不计, 部分样点对儿童存在非致癌健康风险, 对成年和儿童均存在一定程度的可耐受致癌健康风险. 但目前对城市土壤重金属污染研究多集中于特定功能区及单个或多个行政区^[17-22], 土壤重金属的污染特征及潜在健康风险评估的研究仍存在空白. 基于此, 本研究整合分析某市土壤重金属砷(As)、汞(Hg)、铬(Cr)、镉(Cd)、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)和镍(Ni)的污染水平, 采用健康风险评估模型结合蒙特卡洛模型评估潜在致癌和非致癌健康风险及风险概率, 采用 PMF 模型对重金属元素进行源解析, 综合健康风险评估和源解析结果评估主控因子, 以期为该市土壤重金属污染管控与防治提供科学依据和理论支持, 推动土壤环境改善进程.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域为广东省的重点城市之一, 是中国极

具代表性的特大城市, 世界著名港口城市, 发展历史悠久, 人口密集程度高, 2022 年该市常住人口已超过 1 800 万, 交通网络稠密, 车辆保有量已超过 300 万辆, 经济发展成熟度高, 2022 年人均 GDP 已超过 10 万元, 研究区历史悠久, 文化底蕴丰富, 居民生产活动对研究区土壤造成了较大生态污染.

1.2 样品布点与采集

在 ArcMap 10.8 中通过“创建渔网”功能生成规则的 10 km × 10 km 网格, 对该市进行样点布设, 同时考虑了该市人口密度和土地利用情况, 并结合现场实际情况, 避开沟渠、林带、田埂和路边旧房基等不适合设点区域, 用手持 GPS 定位仪记录实际采样点坐标位置, 导入 ArcMap 中生成实际采样点位图. 在人为活动比较密集的区域, 增加采样的密度, 在森林等受人为活动影响较小的区域, 适当降低采样密度, 如图 1 所示, 采样时间为 2020 年 12 月 29 日至 2021 年 1 月 26 日. 采样时, 利用“五点收集法”, 剥除表面覆盖物后, 各采样点采集 3 个 0~20 cm 表层土壤样品, 均匀混合制成 1 个土壤样品, 每个样品 1 kg, 装入聚乙烯塑料袋送至实验室. 土壤样品自然风干, 去除植物根系、石块及人造物等, 置于 BJ-300 多功能粉碎机中研磨 30 s 后过 100 目 0.15 mm 孔径筛, 取 100 g 土样装入聚乙烯样品袋备用.

1.3 土壤重金属含量测定

对土壤样品依次用 HNO₃-HCl-HF-HClO₄ 溶液消解, 样品处理完成后送至南京大学现代分析中心进行检测. 测试指标包括 As、Hg、Cr、Cd、Cu、Zn、

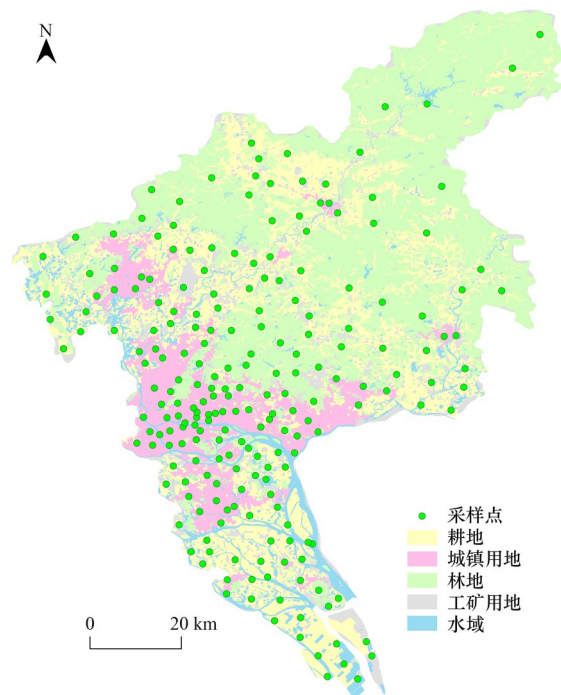


图 1 土壤采样点位示意

Fig. 1 Soil sampling sites

Pb 和 Ni，其中 As 和 Hg 的检测方法为原子荧光光谱测定法^[23,24]，Cd 采用美国 PerkinElmer 公司生产的 Elan9000 电感耦合等离子体质谱仪测定，Cr、Cu、Zn、Ni 和 Pb 采用美国 PerkinElmer 公司生产的 Optima 5300DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪进行测定^[14]。同时设置空白对照样以保证分析结果准确性。

1.4 蒙特卡洛健康风险评估

根据美国环保署 (USEPA) 推荐的风险评估方法，采用健康风险评估 (HRA) 模型对土壤环境健康风险进行评估，土壤重金属往往通过 3 种途径 (经口摄入、皮肤接触和吸入土壤颗粒物) 被人体摄入并对人体健康具有致癌风险和非致癌风险^[25]，计算公式为：

$$ADD_{i, \text{经口摄入}} = \frac{C_i \times EF}{AT} \times \left(\frac{IngR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{IngR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$ADD_{i, \text{皮肤接触}} = \frac{C_i \times EF}{BW \times AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (2)$$

$$ADD_{i, \text{呼吸摄入}} = \frac{C_i \times SL \times EF \times ABS}{AT} \times \left(\frac{SA_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{ED_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中， $ADD_{i, \text{经口摄入}}$ 、 $ADD_{i, \text{皮肤接触}}$ 和 $ADD_{i, \text{呼吸摄入}}$ 分别为人体通过口直接摄入、皮肤接触和呼吸摄入某重金

属的日均暴露剂量； C_i 为土壤中某重金属的含量， $IngR$ 和 $InhR$ 分别为每日的土壤摄入量和空气吸入量， CF 为转换因子， EF 为暴露频率， ED 为暴露年限， BW 为平均体重， SA 为暴露皮肤表面积， SL 为皮肤粘着度， ABS 为皮肤吸收因子， PEF 为地表排放因子， AT 为平均暴露时间。

$$HQ_i = HQ_{i, \text{经口摄入}} + HQ_{i, \text{皮肤接触}} + HQ_{i, \text{呼吸摄入}} = \frac{ADD_{i, \text{经口摄入}}}{RfD_{i, \text{经口摄入}}} + \frac{ADD_{i, \text{皮肤接触}}}{RfD_{i, \text{皮肤接触}}} + \frac{ADD_{i, \text{呼吸摄入}}}{RfD_{i, \text{呼吸摄入}}} \quad (4)$$

$$HQ = \sum HQ_i \quad (5)$$

$$CR_i = CR_{i, \text{经口摄入}} + CR_{i, \text{皮肤接触}} + CR_{i, \text{呼吸摄入}} = (ADD_{i, \text{经口摄入}} + ADD_{i, \text{皮肤接触}} + ADD_{i, \text{呼吸摄入}}) \times SF \quad (6)$$

$$CR = \sum CR_i \quad (7)$$

式中， HQ_i 为某重金属的非致癌健康风险指数， HQ 为该样点总的非致癌健康风险指数， $HQ/HQ_i \leq 1$ 表示重金属的非致癌健康风险可以忽略不计，反之则表示存在非致癌健康风险^[16,26]； RfD_i 为某重金属的日均摄入量； CR_i 为某重金属的致癌健康风险指数， CR 为该样点总的致癌健康风险指数，当 $CR_i/CR \leq 1 \times 10^{-6}$ 说明致癌健康风险可以忽略不计， $1 \times 10^{-6} < CR_i/CR \leq 1 \times 10^{-4}$ 时，说明存在可耐受致癌健康风险， $CR_i/CR > 1 \times 10^{-4}$ 时说明存在不可耐受致癌风险。土壤重金属健康风险评估模型中的暴露参数和不同暴露途径的参考剂量，均参考自中国生态环境部发布的 HJ25.3-2019 中风险评估模型参数推荐值和《中国人群暴露参数手册 (儿童卷) 概要》^[26]。本次研究具体暴露参数和剂量参考值见表 1 和表 2。

表 1 基于蒙特卡洛的重金属健康风险暴露参数

Table 1 Health risk exposure parameters for heavy metals based on Monte Carlo					
参数	单位	儿童	成人	点位分布	文献
每日土壤摄入量(IngR)	mg·d ⁻¹	66、103 和 161	4、30 和 52	三角	[27]
每日呼吸摄入量(InhR)	m ³ ·d ⁻¹	8.6	19	单点	[27]
皮肤吸收因子(ABS)	无量纲	Hg:0.05;Cd:0.001;Cr:0.001;Ni:0.001;As:0.03;Pb:0.006;Cu:0.06;Zn:0.02			单点
地表排放因子(PEF)	m ³ ·kg ⁻¹	1.36 × 10 ⁹		单点	[16,28]
平均暴露时间(AT _{致癌})	d	27 740		单点	
平均暴露时间(AT _{非致癌})	d	2 190	8 760	单点	
暴露频率(EF)	d·a ⁻¹	180、345 和 365		三角	[29]
暴露年限(ED)	a	6	24	单点	[30]
平均体重(BW)	kg	16.68 和 1.48	56.4 和 11.9	正态	
暴露皮肤表面积(SA)	m ²	0.23	0.54	单点	[31]
皮肤粘着度(SL)	mg·(d·cm ²) ⁻¹	0.65 和 1.2	0.49 和 0.54	对数正态	[29]

1.5 源解析

采用 USEPA 推荐的 PMF 5.0 受体模型对该市土壤重金属的来源进行解析，其原理是将重金属含量数据原始矩阵 X 通过因子化分解成因子贡献 G 和因

子残差矩阵 F ，然后基于各重金属来源的特征差异确定因子贡献率^[32]。

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (8)$$

表2 重金属不同暴露途径的参考剂量和致癌斜率因子¹⁾

Table 2 Reference dose and carcinogenic slope factor for different exposure pathways of heavy metals

重金属	参考剂量(RfD)/(kg·(mg·d) ⁻¹				致癌斜率因子(SF)/(kg·d·mg ⁻¹			文献
	经口摄入	皮肤接触	呼吸摄入 _{成年}	呼吸摄入 _{儿童}	经口摄入	皮肤接触	呼吸摄入	
As	3.00E-04	3.00E-04	3.52E-06	5.86E-05	1.50E+00	1.50E+00	4.30E-03	[16]
Hg	3.00E-04	2.10E-05	7.04E-05	1.17E-05	—	—	—	
Cd	1.00E-03	2.50E-05	2.35E-06	3.91E-06	6.10E+00	6.10E+00	6.30E+00	
Cr	3.00E-03	7.50E-05	2.35E-05	3.91E-05	—	—	—	
Ni	2.00E-02	8.00E-04	2.11E-05	3.52E-05	—	—	—	
Pb	3.50E-03	5.30E-04	8.21E-05	1.37E-04	—	—	—	
Zn	3.00E-01	6.00E-01	3.00E-01	3.00E-01	—	—	—	[28]
Cu	4.00E-02	1.20E-02	4.02E-02	4.02E-02	—	—	—	

1)“—”表示无致癌斜率因子

$$Q = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left(\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{ik}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (9)$$
$$u_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6} \times \text{MDL} & (X_{ij} \leq \text{MDL}) \\ \sqrt{(RSD \times X_{ij})^2 + \text{MDL}^2} & (X_{ij} > \text{MDL}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, X_{ij} 为第*i*个样本中重金属*j*的含量, f_{ij} 为重金属*j*在来源*k*中的含量, g_{ik} 为来源*k*对第*i*个样本的贡献率, e_{ij} 为残差矩阵; Q 为通过不断分解矩阵*X*选择最优的矩阵*G*和*F*得到的最小目标函数; u_{ij} 为第*i*个样本中重金属*j*含量的不确定性, RSD为重金属含量的相对标准偏差, MDL为方法检出限, Ni、Cu、Cr、Zn、Cd、As、Pb和Hg的检出限分别为1.0、1.0、0.1、2.0、0.01、0.2、0.1和0.005 mg·kg⁻¹。

1.6 基于源导向的健康风险评估

基于PMF模型解析获取各重金属元素对不同污染源的贡献结果和健康风险评估获取的非致癌风险和致癌风险结果, 计算不同重金属元素对非致癌风险和致癌风险的贡献率^[28], 计算公式为:

$$B_{n, \text{HQ}} = \sum C_{in} \times \text{HQ}_i \quad (11)$$

$$B_{n, \text{CR}} = \sum C_{in} \times \text{CR}_i \quad (12)$$

$$D_{n, \text{HQ}} = \frac{C_{in}}{B_{n, \text{HQ}}} \quad (13)$$

$$D_{n, \text{CR}} = \frac{C_{in}}{B_{n, \text{CR}}} \quad (14)$$

式中, $B_{n, \text{HQ}}$ 为第*n*类污染源中的非致癌健康指数, $B_{n, \text{CR}}$ 为第*n*类污染源中的致癌健康指数, C_{in} 为第*n*类污染源中重金属*i*的含量, $D_{n, \text{HQ}}$ 为第*n*类污染源中非致癌健康指数的贡献率, $D_{n, \text{CR}}$ 为第*n*类污染源中致癌健康指数的贡献率。

1.7 数据分析方法

采用Excel表格进行数据整理, SPSS 21进行数

据分析和统计性描述, ArcMap 10.8用于空间特征分析与制图, Origin 2021进行相关图形绘制, PMF 5.0进行源解析。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征及空间分布特征

该市土壤中重金属含量的统计性描述如表3所示。整个城市的 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为18.16、0.43、1.46、68.57、98.34、64.19、26.53和257.32 mg·kg⁻¹; 除Ni元素以外, 其余重金属元素土壤含量的平均值均已超过广东省土壤背景值, 且Cd和Zn的含量已超过国家二级标准, 重金属污染已较为严重。不同土地利用类型中, 重金属Cd、Cu和Ni的含量平均值由高到低为: 工矿用地>城镇用地>耕地>林地, 重金属Cr和Pb的含量平均值由高到低为: 城镇用地>工矿用地>林地>耕地, 重金属Zn和As的含量平均值由高到低依次为: 城镇用地>工矿用地>耕地>林地, 重金属Hg的含量平均值由高到低分别为: 城镇用地>林地>耕地>工矿用地, 城镇用地和工矿用地重金属污染程度较高。变异系数能反映元素在土壤中分布的均匀性和变异程度^[33], 重金属Cr属于中度变异, 其余重金属元素属于高度变异, 说明该市土壤受人为活动干扰严重。在ArcMap 10.8中利用地统计模块的反距离插值分别对8种重金属进行空间特征分析, 结果如图2。Ni和Cd污染中心值点基本重合, 主要为该市中部地区; As和Hg的高值区主要集中在西部区域和中部部分区域, Cr和Zn的高值区主要集中在中南部区域, 多个重金属元素在南部个别区域出现高值区, 说明该区域已存在点源污染, 可能会对该区域内生态环境和居民生活带来一定程度的危害, 需提高关注度。

表 3 整体土壤重金属含量特征/mg·kg⁻¹
Table 3 Characteristics of heavy metal content in overall soil/mg·kg⁻¹

重金属		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As
总实测值	范围	0.1~29.8	26.2~576.9	5.8~1878.6	2.0~737.0	0.8~1794.7	23.8~2946.4	0.02~3.8	2.0~129.0
	均值	1.5	98.3	64.2	26.5	68.6	257.3	0.4	18.2
城镇用地	均值	1.5	129.0	66.5	28.7	90.8	338.4	0.6	19.3
耕地	均值	1.1	80.1	31.6	21.5	41.5	188.0	0.4	18.1
林地	均值	0.9	80.7	21.3	12.1	49.6	115.4	0.5	17.9
工矿用地	均值	1.9	93.1	102.4	33.9	77.9	285.2	0.3	19.2
土壤背景值		0.11	77	32	28	60	97	0.078	16.28
国家二级标准		0.3	200	100	50	300	250	0.5	25
变异系数/%		159.1	67.1	282.5	196.7	214.1	144.7	88.4	99.8

2.2 源解析

2.2.1 重金属相关性分析

相关性分析可以在一定程度上反映土壤中重金属之间的同源性，相关系数越大，表明来自同一污染源的可能性就越大^[34]。该市土壤重金属分析结果如表 4。除 Ni 与 Cd、Pb、Hg 和 As，Hg 与 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn，As 与 Cr、Cu 和 Zn 之间无明显相关性之外，其余重金属元素之间均有一定

程度相关；Ni-Cr 的相关性系数大于 0.5，说明两种重金属元素存在部分同源性；Zn-Cu 和 Zn-Cr 的相关性系数接近 0.5，说明 Zn 和 Cu，Zn 和 Cr 之间也部分存在同源性，Cu-Cr 的相关性系数为 0.2 左右，同源性相对较弱，综上所述，除 Cr-Ni 外，多个重金属元素之间的相关性相对较弱，说明污染来源较为复杂，土壤受不同来源污染综合影响。

表 4 土壤重金属含量相关性分析¹⁾
Table 4 Correlation analysis of heavy metal content in soil

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As
Cd	1							
Cr	0.214**	1						
Cu	0.274**	0.203**	1					
Ni	0.087	0.520**	0.240**	1				
Pb	0.281**	0.346**	0.165*	0.083	1			
Zn	0.241**	0.429**	0.477**	0.176**	0.436**	1		
Hg	-0.007	0.098	-0.068	0.062	-0.082	-0.02	1	
As	0.197**	0.032	-0.023	-0.001	-0.017	0.083	0.146*	1

1)** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

2.2.2 PMF 受体模型

采用 PMF 5.0 受体模型对该市整体表层土壤重金属来源进行解析，根据信噪比的值将 8 种重金属都设置为 strong，将 8 种重金属的总体值设置为 weak，选择 3~5 因子运行 50 次后，选择预测值和实际值相差最小的因子数作为最佳运行因子，最佳运行因子为 5。运行结果如图 3 和图 4。将 PMF 模型中导出的土壤重金属污染源各因子贡献值的点位数据导入 ArcMap 中，进行反距离插值后得到结果如图 5。因子 1 的主要特征物为 As(87.6%)，杀虫剂和化肥的高强度使用会导致土壤中 As 的积累^[34,35]，结合图 5 中因子 1 的空间分布高值区基本为种植区和绿地，以及实际调研，高值点主要集中在绿地、农田以及村庄垃圾堆肥点，所以因子 1 可以判断为农药化肥投入源；因子 2 的贡献成分比较丰富，对 Cd、Cr 和 Ni 均有较大贡献，Cr 和 Ni 的含量平均值基本和广东

省土壤背景值接近，因此土壤中重金属 Cr 和 Ni 主要受其成土母质的影响^[36]，而 Cd 的含量平均值已超过广东省背景值的 12.3 倍，Cd 在土壤中的富集程度较高，水稻土对 Cd 的富集程度相对其他土壤要高得多，因此，土壤中重金属 Cd 主要受到人为耕作的影响。电镀、金属冶炼、燃料和化学工业也会产生镉废水排放，结合图 5 中因子 2 的空间分布，中高值区基本覆盖该市大部分区域且包含农田区域，所以因子 2 可以判断为一个自然母质、工业和人为耕作的混合源；因子 3 主要特征物为 Cu 和 Zn，Cu 和 Zn 的平均含量分别为广东省土壤背景值 2 倍和 2.65 倍，金属冶炼加工、机械制造和电镀等工业会导致 Cu 和 Zn 的废水废气排放，造成土壤 Cu 和 Zn 的富集^[15,37]，高值点附近存在电线厂、家具厂、金属制品厂等汇集的工业区，结合图 5 中因子 3 的空间分布贡献值偏高区域基本为工业园区区域，所以因子 3 可以判断

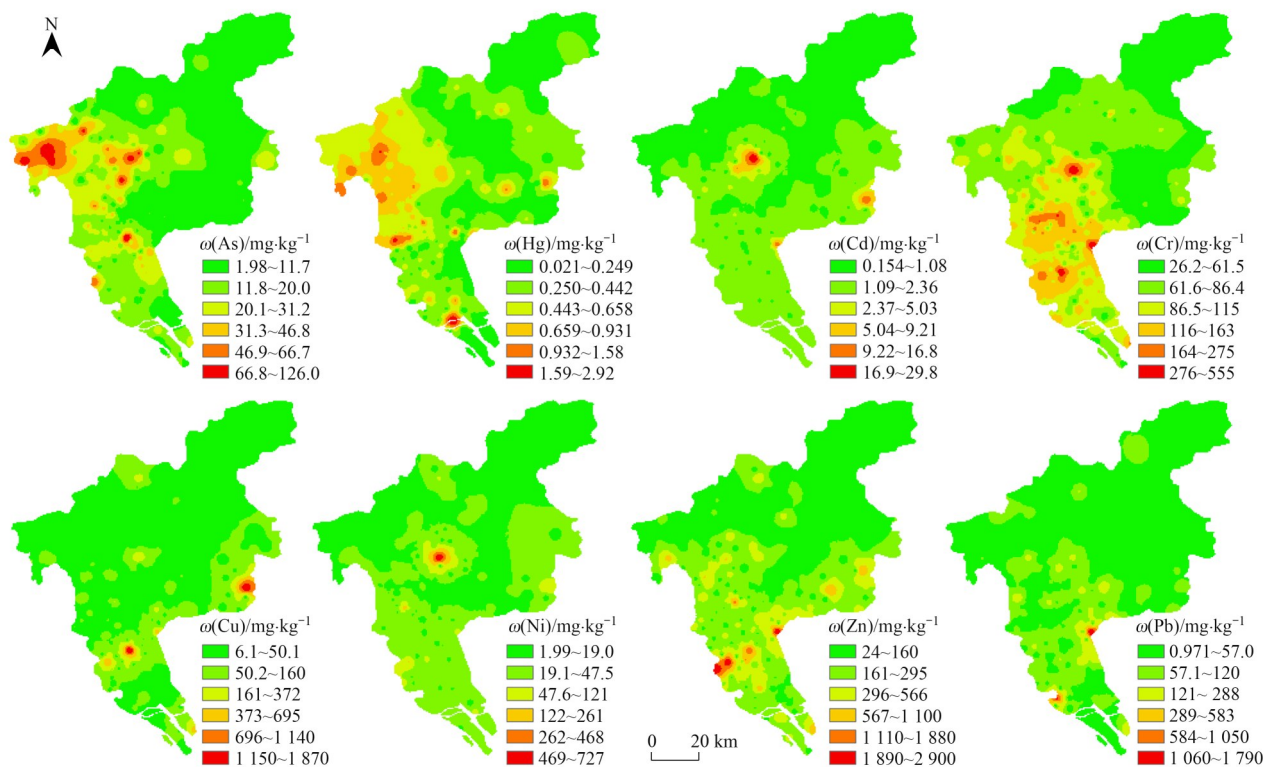


图2 某市土壤不同重金属元素空间分布特征

Fig 2 Spatial distribution characteristics of different heavy metal elements in soil of a certain city

为工业源；因子4的主要特征物为Hg(82.0%)，Hg的含量平均值已超过广东省土壤背景值4.51倍，Hg主要来源于交通源，交通污染会造成土壤中Hg的富集^[32,38]，结合图5中因子4的贡献值空间分布，偏高值区域较均匀分布于该市中心城区即车辆流动密集的地方，所以因子4是交通源；因子5的主要特征物为Pb(80.9%)，铅蓄电池在生产过程中会产生含Pb废气、废水和固体废弃物。早年该类企业的生产工艺、环保设施落后，在一定程度上影响了周边土壤环境质量^[39]，结合图5中因子5的高值点分布，该区域某铅蓄电池制造厂生产过程中对周边土壤中Pb的积累可能造成了显著影响，所以因子5可以判断为铅蓄电池制造源；各因子贡献空间分布情况与该市土地利用背

景基本符合。

2.3 基于蒙特卡洛的土壤健康风险评价

2.3.1 非致癌健康风险评估

某市土壤重金属非致癌健康风险评估结果如图6和表5.8种重金属非致癌健康风险指数(HQ_i)均值大小表现为：As>Cr>Pb>Cu>Cd>Hg>Ni>Zn；两类人群的非致癌健康风险表现为：儿童的非致癌健康风险指数>成人；不同接触方式的非致癌健康风险表现为：经口摄入>呼吸摄入>皮肤接触。综合非致癌健康风险指数(HQ)表明：成人和儿童的综合非致癌健康风险指数均值分别为5.31E-02和6.54E-01，最大值均小于1，说明该市土壤重金属对人体带来的非致癌健康风险可以忽略不计。

表5 蒙特卡洛的土壤重金属非致癌健康风险指数评估结果

Table 5 Monte Carlo assessment results of non-carcinogenic health risk index of heavy metals in soil

元素	儿童				成人			
	HQ _{i,经口摄入}	HQ _{i,皮肤接触}	HQ _{i,呼吸摄入}	HQ _{i,儿童}	HQ _{i,经口摄入}	HQ _{i,皮肤接触}	HQ _{i,呼吸摄入}	HQ _{i,成人}
Pb	1.14E-01	1.10E-06	4.64E-05	1.14E-01	9.85E-03	5.74E-07	1.17E-05	9.86E-03
Cd	8.52E-03	4.95E-07	2.23E-04	8.74E-03	7.34E-04	2.59E-07	8.74E-06	7.43E-04
As	3.53E-01	5.13E-07	1.85E-03	3.55E-01	3.04E-02	2.68E-07	7.26E-05	3.05E-02
Hg	8.37E-03	1.73E-07	2.19E-06	8.37E-03	7.21E-04	9.08E-08	8.60E-07	7.22E-04
Cr	1.91E-01	1.11E-05	1.50E-03	1.93E-01	1.65E-02	5.81E-06	6.54E-05	1.66E-02
Cu	9.37E-03	5.33E-08	5.72E-07	9.37E-03	8.07E-04	2.79E-08	3.74E-08	8.07E-04
Ni	7.74E-03	2.81E-07	2.70E-04	8.01E-03	6.67E-04	1.47E-07	2.94E-05	6.97E-04
Zn	4.97E-03	3.63E-09	3.05E-07	4.97E-03	4.28E-04	1.90E-09	1.99E-08	4.28E-04

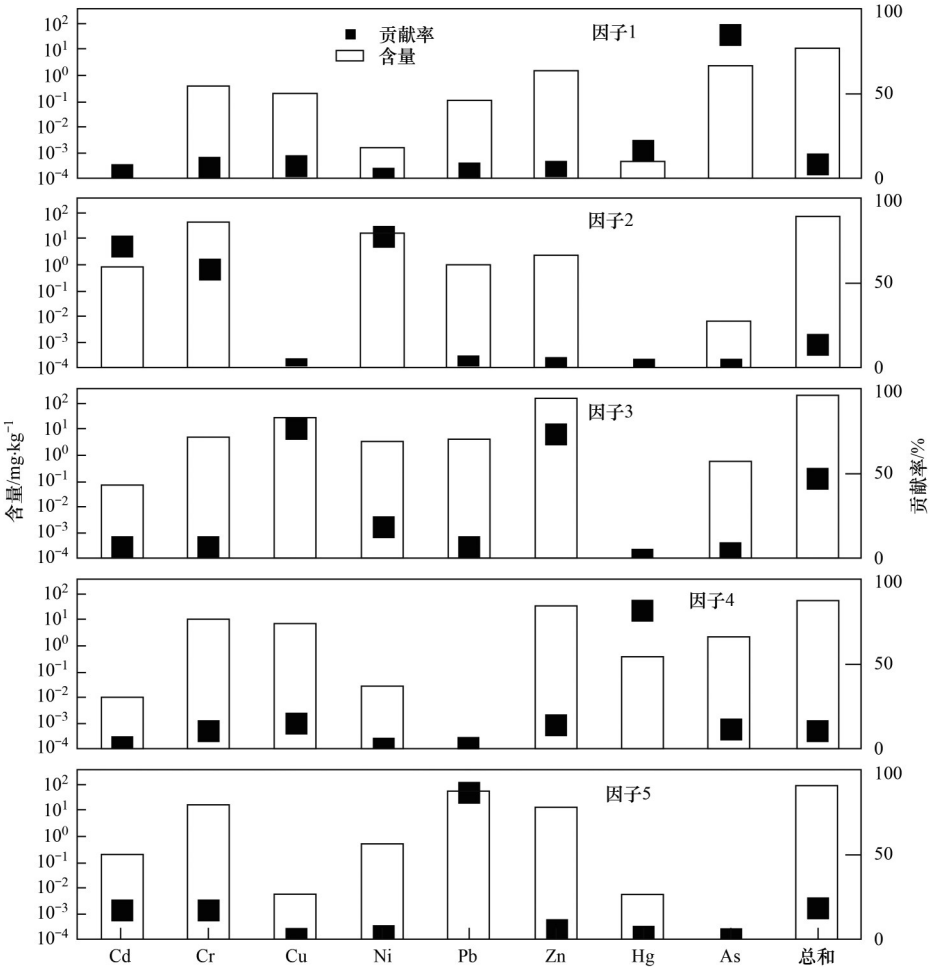


图3 土壤重金属PMF源成分谱
Fig 3 Source composition spectrum of heavy metal PMF in soil

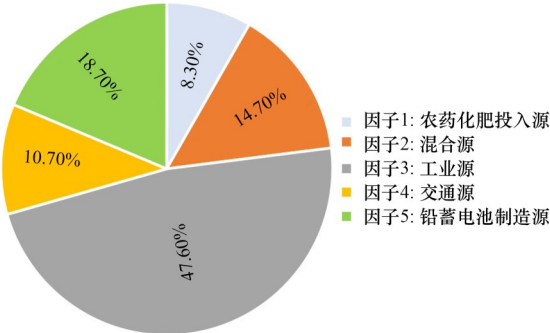


图4 PMF模型各因子占比
Fig. 4 Proportion of various factors in PMF model

2.3.2 致癌健康风险

该市土壤重金属致癌健康风险评估结果如图7和表6.2种致癌重金属的致癌健康风险指数(CR_i)平均值大小表现为:As>Cd;两种重金属对儿童的致

癌健康风险均大于对成年,与儿童的生理和行为等特征以及儿童对污染的敏感性更高有关^[30];Cd对成年和儿童的CR的最大值范围均在1E-04~1E-06之间,均值分别为4.70E-06和1.36E-05,说明Cd对两类人群均存在一定程度的可耐受致癌健康风险;As对成年和儿童的CR的最大值范围均在1E-06~1E-04之间,均值分别为1.54E-06和4.46E-06,说明As对两类人群存在一定程度的可耐受致癌健康风险;Cd和As会对人体多个系统功能造成相对更大的危害^[30,40,41].

2.3.3 敏感度分析

敏感度分析用于反映各参数对于风险结果的影响程度,敏感度值越大表明对风险结果的影响程度越大^[40].该市土壤重金属致癌健康风险(CR)和非致癌健康风险(HQ)的敏感度分析结果如图8.致

表6 蒙特卡洛的土壤重金属致癌健康风险指数评估结果

Table 6 Monte Carlo assessment results of health risk index for heavy metal carcinogenesis in soil

元素	儿童				成人			
	CR _i ,经口摄入	CR _i ,皮肤接触	CR _i ,呼吸摄入	CR _i	CR _i ,经口摄入	CR _i ,皮肤接触	CR _i ,呼吸摄入	CR _i
As	4.46E-06	6.47E-11	2.83E-10	4.46E-06	1.54E-06	1.35E-10	7.38E-11	1.54E-06
Cd	1.36E-05	1.98E-10	2.40E-12	1.36E-05	4.70E-06	4.14E-10	6.27E-13	4.70E-06

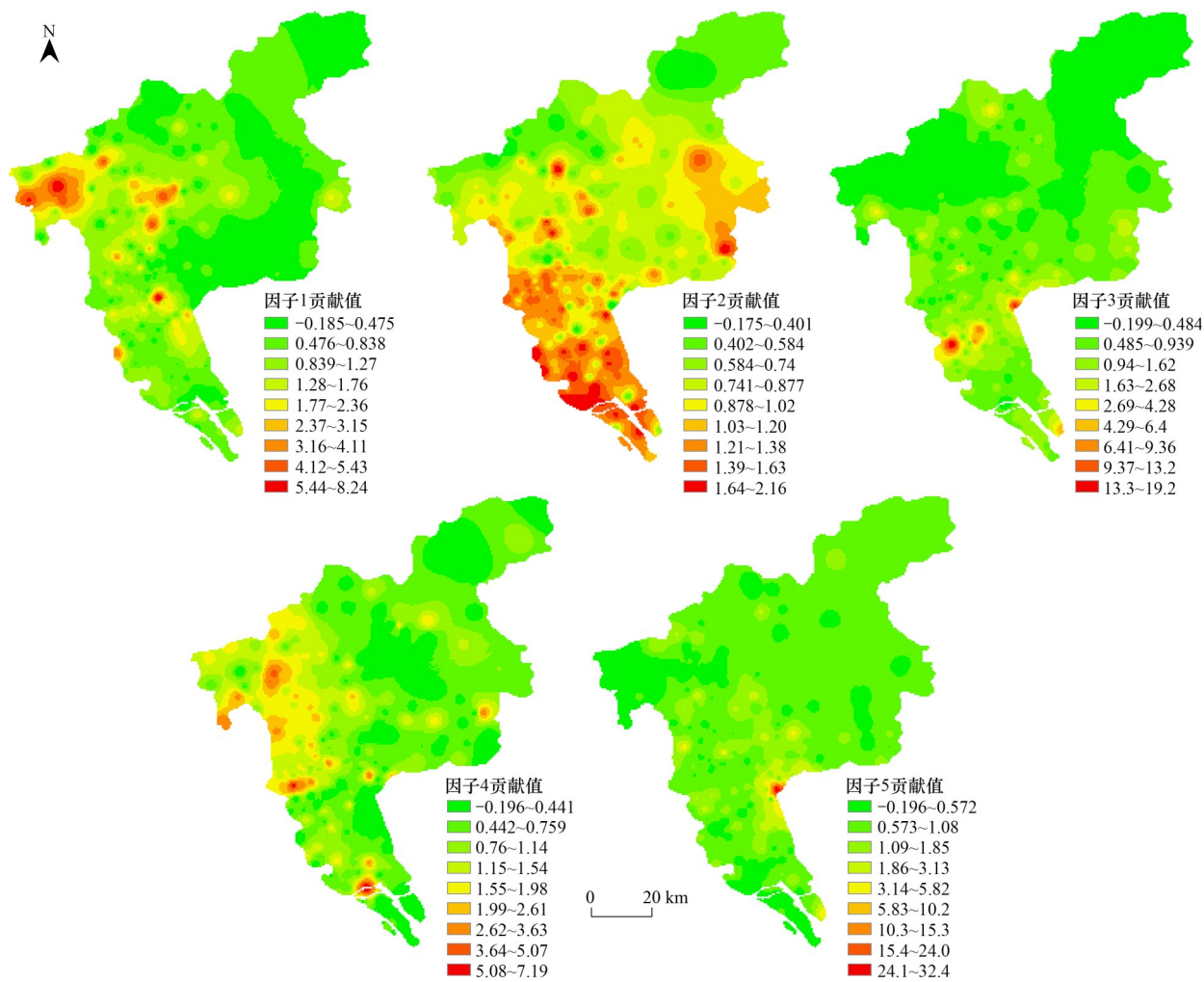


图5 PMF模型土壤污染源各因子贡献值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of contribution values of various factors of soil pollution sources in the PMF model

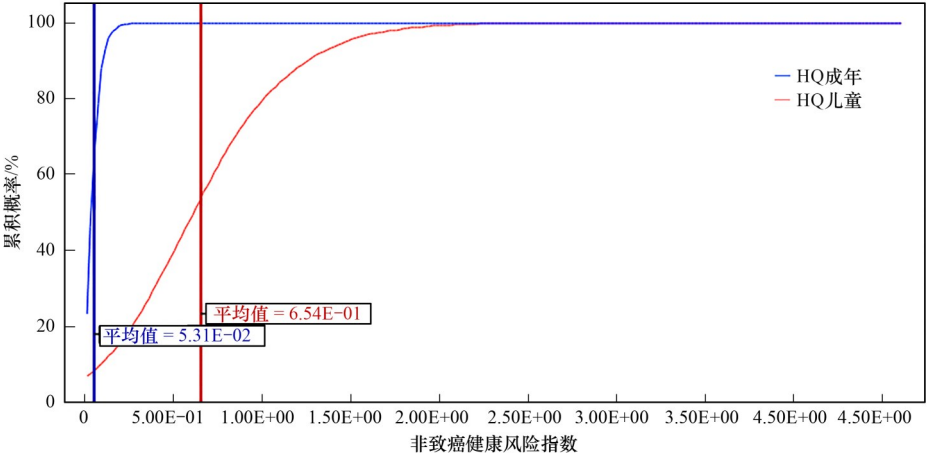


图6 蒙特卡洛的土壤重金属综合非致癌健康风险指数概率分布

Fig. 6 Monte Carlo probability distribution of comprehensive non-carcinogenic health risk index of soil heavy metals

癌和非致癌健康风险中敏感度值最大的均为As，致癌健康风险中As对于成年和儿童的敏感度分别为64.7%和74.5%，非致癌健康风险中As对于成年和儿童的敏感度分别为44.4%和55.5%，加强管控As在土壤中的累积，将有助于降低土壤对于人体

的潜在健康风险，在8种重金属中，As应作为主控元素，其次是Cd、Pb和Cr；BW在致癌和非致癌健康风险中敏感度均为负值，说明增长体重将有助于降低健康风险，这与前人研究结果一致^[26,30,42]。

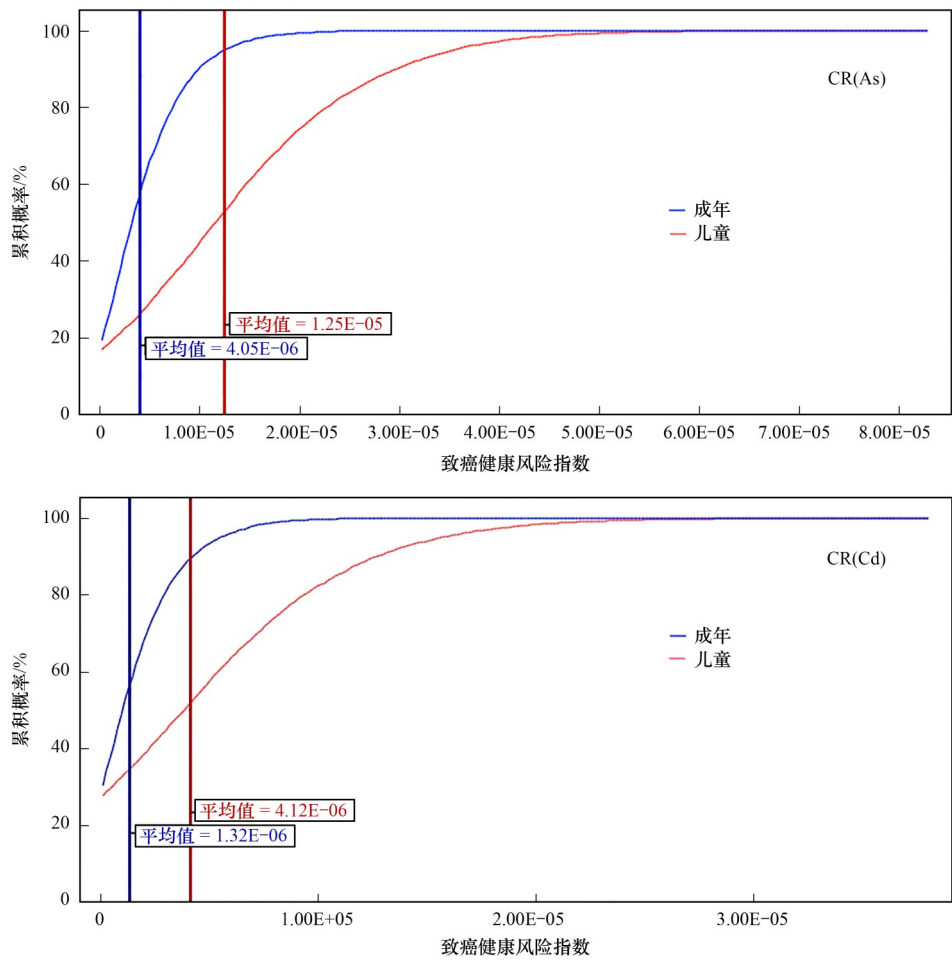


图 7 蒙特卡洛土壤重金属综合致癌健康风险指数概率分布
Fig. 7 Probability distribution of comprehensive carcinogenic health risk index of heavy metals in soil in Monte Carlo

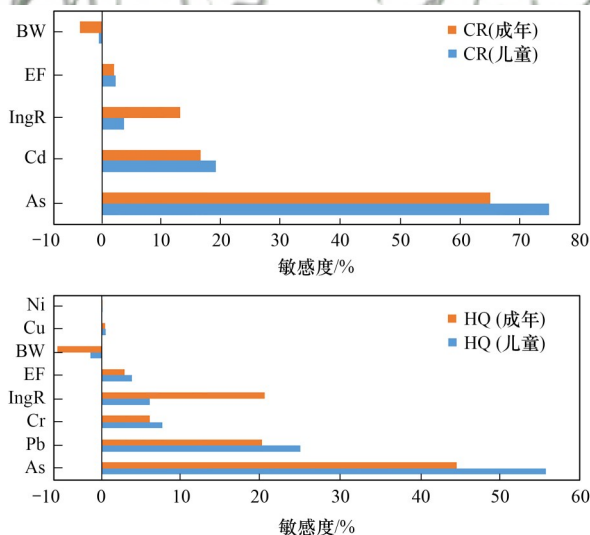
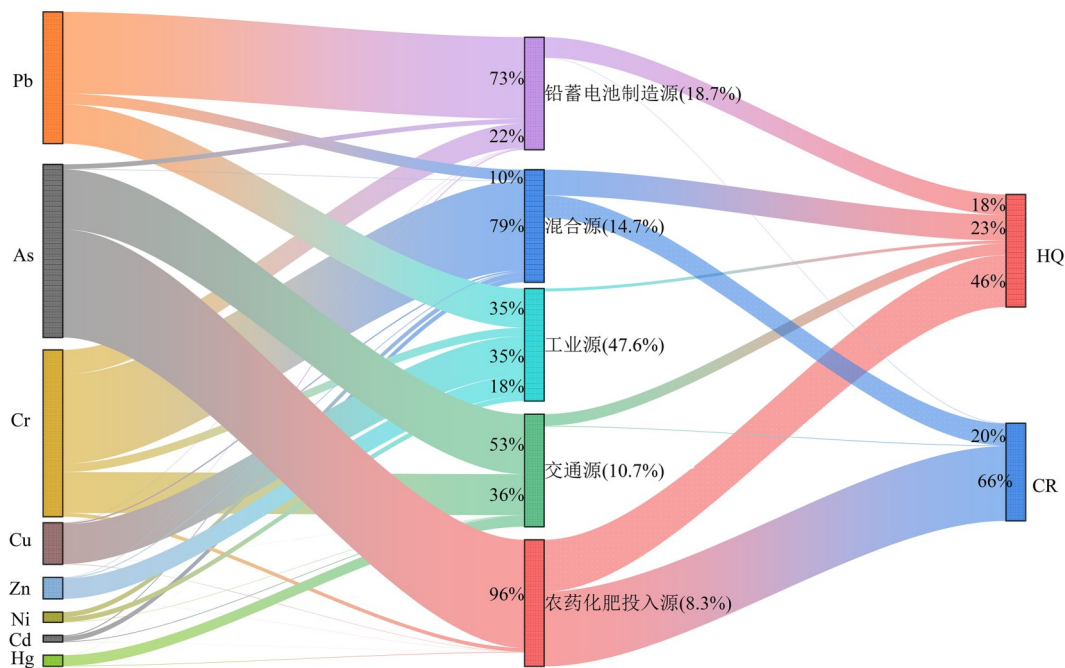


图 8 致癌与非致癌健康风险敏感度分析
Fig. 8 Sensitivity analysis of carcinogenic and non-carcinogenic health risks

2.3.4 基于源导向的土壤重金属优先控制因子分析
基于儿童健康风险指数整体大于成年健康风险指数，选用儿童的健康风险模型结合 PMF 模型

解析结果对该市土壤主控因子进行分析，结果如图 9。因子 3 工业源是该市土壤重金属最主要的累积来源，贡献率为 47.6%，主要由 Pb、Cu 和 Zn 为主，王小莉等^[43]对开封市的研究表明，Zn、Cu 和 Pb 污染区主要集中在炼锌厂，化肥厂等企业的周围。尚婷婷等^[44]对白银市城郊周边农田区域土壤的研究表明，铅锌冶炼厂，铜业公司等企业产生的“三废”进入周边环境，可能造成周边土壤的重金属富集；引起人体健康危害最主要的因素是因子 1 农药化肥投入源，主要由 As 贡献（贡献率为 96%），对重金属的贡献率为 8.3%，引起的致癌和非致癌健康风险的贡献率分别为 66% 和 46%，为最主要致癌和非致癌健康风险来源，可能是由于不同金属元素对人体的影响存在差异，模型中参考剂量和斜率因子取值不同。有研究表明，As 的毒性更高，人体长期摄入 As 可导致肾、肝和膀胱等内脏器官的癌变^[28,44,45]，因此须避免过度使用农药和化肥，加强绿色种植的推广，以控制和减轻对土壤的持续污染。



百分数表示贡献率, 曲线宽度对应贡献值的大小

图9 土壤重金属、因子与健康风险的关系

Fig. 9 Relationship between heavy metals, factors, and health risks in soil

3 结论

(1) 广东省某市土壤重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的平均值分别为 18.16、0.43、1.46、68.57、98.34、64.19、26.53 和 257.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异程度为中高度变异. 除 Ni 元素以外, 其余重金属元素土壤含量的平均值均已超过广东省土壤背景值, 且 Cd 和 Zn 的含量已超过国家二级标准, 重金属污染已较为严重.

(2) 基于相关性分析和 PMF 模型结果表明, 该市重金属来源复杂, 主要受工业源影响, 自然母质、铅蓄电池制造、人为耕作、交通和农药化肥投入也对土壤重金属累积有不可忽视的影响, 污染因子主要为 As、Cr 和 Pb.

(3) 基于蒙特卡洛模拟的健康风险评估结果表明, 该市土壤重金属对儿童和成年均存在一定程度的可耐受致癌健康风险, 非致癌风险可以忽略不计; 儿童的潜在健康风险大于成年, 主要暴露途径均为经口摄入.

(4) 基于源导向的主控因子分析结果表明: 农药化肥投入源和 As 应该作为该市土壤重金属影响健康风险的主控因子, 其次为混合源和 Cr.

参考文献:

- [1] Xiang M T, Li Y, Yang J Y, *et al.* Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops[J]. Environmental Pollution, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116911.
- [2] Pekey H, Doğan G. Application of positive matrix factorisation for

the source apportionment of heavy metals in sediments: A comparison with a previous factor analysis study[J]. Microchemical Journal, 2013, **106**, doi: 10.1016/j.microc.2012.07.007.

- [3] Amuno S, Niyogi S, Amuno M, *et al.* Heavy metal bioaccumulation and histopathological alterations in wild Arctic hares (*Lepus arcticus*) inhabiting a former lead-zinc mine in the Canadian high Arctic: A preliminary study[J]. Science of the Total Environment, 2016, **556**: 252-263.
- [4] Huang Y, Wang L Y, Wang W J, *et al.* Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 3034-3042.
- [5] Liu R M, Guo L J, Men C, *et al.* Spatial-temporal variation of heavy metals' sources in the surface sediments of the Yangtze River Estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **138**: 526-533.
- [6] Wang C L, Zou X Q, Feng Z Y, *et al.* Distribution and transport of heavy metals in estuarine-inner shelf regions of the East China Sea [J]. Science of the Total Environment, 2018, **644**: 298-305.
- [7] Lin L, Li C, Yang W J, *et al.* Spatial variations and periodic changes in heavy metals in surface water and sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Chemosphere, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124837.
- [8] Chai M W, Li R L, Tam N F Y, *et al.* Effects of mangrove plant species on accumulation of heavy metals in sediment in a heavily polluted mangrove swamp in Pearl River Estuary, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41** (1): 175-189.
- [9] 程俊伟, 蔡深文, 黄明琴. 贵州毛石铜矿区土壤及表层沉积物中重金属形态分析及生态风险评估[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(1): 353-359.
- [10] 谢龙涛, 潘剑君, 白浩然, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空

Cheng J W, Cai S W, Huang M Q. Analysis on speciation and risk assessment of heavy metals in soils and surface sediments of Maoshi molybdenum mining area in Guizhou [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(1): 353-359.

- 间分布及污染评价——以南京市江宁区某乡镇为例[J]. 土壤学报, 2020, **57**(2): 316-325.
- Xie L T, Pan J J, Bai H R, *et al.* GIS-Based spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soils: a case study of a town of Jiangning, Nanjing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(2): 316-325.
- [11] Wu Y F, Li X, Yu L, *et al.* Review of soil heavy metal pollution in China: Spatial distribution, primary sources, and remediation alternatives [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, **181**, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106261.
- [12] 张施阳. 基于GIS的上海市不同功能区土壤重金属污染评价及健康风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(4): 1226-1236.
- Zhang S Y. Assessment of soil heavy metal pollution and health risk in different functional areas of Shanghai city based on GIS [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(4): 1226-1236.
- [13] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡城区土壤重金属空间分布特征及生态风险评估[J]. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(10): 100-106.
- Zhang J, Dong J, Liang Q F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in urban soils of Baoji city [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(10): 100-106.
- [14] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于PMF模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 432-441.
- Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of Southern Ningxia based on PMF model [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 432-441.
- [15] 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估[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.
- [16] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 431-441.
- Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 431-441.
- [17] 梁敏静, 熊凡, 曾经文, 等. 广州郊区三类工业企业周边农田土壤重金属污染及生态风险评估[J]. 广东农业科学, 2021, **48**(7): 103-110.
- Liang M J, Xiong F, Zeng J W, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of farmland soil around three types of industrial enterprises in Guangzhou suburb [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, **48**(7): 103-110.
- [18] 吴俭, 邓一荣, 林龙勇, 等. 广州市建设用地土壤污染风险管控和修复现状、问题与对策[J]. 环境监测管理与技术, 2021, **33**(3): 1-4, 14.
- Wu J, Deng Y R, Lin L Y, *et al.* Risk control and soil remediation of construction land in Guangzhou: current situation, problems and countermeasures [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021, **33**(3): 1-4, 14.
- [19] 王钊, 郭宇, 石晓龙. 广州市某工业区土壤重金属污染评价[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(S2): 214-221.
- Wang Z, Guo Y, Shi X L. Assessment of heavy metal pollution in soil of an industrial zone in Guangzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(S2): 214-221.
- [20] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 49-53.
- Lei G J, Chen Z L, Liu Q J, *et al.* The assessments of polluted degree and potential ecological hazards of heavy metals in suburban soil of Guangzhou city [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(S1): 49-53.
- [21] 何健, 陈海珍, 程世芬, 等. 广州主城区土壤重金属Pb污染特征及健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2014, **41**(2): 212-215, 218.
- He J, Chen H Z, Cheng S F, *et al.* Evaluation of the characteristics and health risks of Pb pollution in soils in downtown Guangzhou [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2014, **41**(2): 212-215, 218.
- [22] 黄银华. 广州市农业表层土壤重金属污染及其与景观格局的多尺度关系[D]. 广州: 广州大学, 2015.
- [23] GB/T 22105.1-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分: 土壤中总汞的测定[S].
- GB/T 22105.1-2008, Soil quality—Analysis of total mercury, arsenic and lead contents in soils—Atomic fluorescence spectrometry—Part 1: Analysis of total mercury contents in soils[S].
- [24] GB/T 22105.2-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分: 土壤中总砷的测定[S].
- GB/T 22105.2-2008, Soil quality—Analysis of total mercury, arsenic and lead contents in soils—Atomic fluorescence spectrometry—Part 2: Analysis of total arsenic contents in soils[S].
- [25] 刘海, 魏伟, 黄健敏, 等. 长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1686-1697.
- Liu H, Wei W, Huang J M, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of soil-crops system in Anhui section of the Yangtze River basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1686-1697.
- [26] HJ 25.3-2019, 建设用地土壤污染风险评估技术导则[S].
- HJ 25.3-2019, Technical guidelines for risk assessment of soil contamination of land for construction[S].
- [27] Yang S Y, Zhao J, Chang S X, *et al.* Status assessment and probabilistic health risk modeling of metals accumulation in agriculture soils across China: a synthesis [J]. *Environment International*, 2019, **128**: 165-174.
- [28] 马杰, 葛淼, 王胜蓝, 等. 基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析[J]. 环境科学, 2024, **45**(1): 396-406.
- Ma J, Ge M, Wang S L, *et al.* Health risk assessment and priority control factors analysis of heavy metals in agricultural soils based on source-oriented [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(1): 396-406.
- [29] Chen R H, Chen H Y, Song L T, *et al.* Characterization and source apportionment of heavy metals in the sediments of Lake Tai (China) and its surrounding soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133819.
- [30] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with positive matrix factorization model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [31] Huang Y N, Dang F, Li M, *et al.* Environmental and human health risks from metal exposures nearby a Pb-Zn-Ag mine, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **698**, doi: 10.1016/j.

- scitotenv.2019.134326.
- [32] 沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 等. 基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析[J]. 环境科学, 2024, **45**(2): 1058-1068.
- Shen Z J, Li J Q, Li C X, *et al.* Pollution source apportionment of heavy metals in cultivated soil around a red Mud yard based on APCS-MLR and PMF model[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(2): 1058-1068.
- [33] 高梦绯, 郑顺安, 刘昌华, 等. 基于多因素融合的耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境工程, 2023, **41**(8): 233-241.
- Gao M F, Zheng S A, Liu C H, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of county based on multi-factors[J]. *Environmental Engineering*, 2023, **41**(8): 233-241.
- [34] 蒋玉莲, 余京, 王锐, 等. 渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 4017-4026.
- Jiang Y L, Yu J, Wang R, *et al.* Source analysis and pollution assessment of soil heavy metals in typical geological high background area in Southeastern Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 4017-4026.
- [35] 徐福银, 胡艳燕, 包兵, 等. 重庆市不同功能区绿地土壤Hg分布特征及其污染评价[J]. 土壤通报, 2015, **46**(5): 1253-1258.
- Xu F Y, Hu Y Y, Bao B, *et al.* Distribution characters and pollution evaluation of Hg in urban soil of different functional area in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(5): 1253-1258.
- [36] 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 等. 基于PCA/APCS和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(6): 1014-1022.
- Chen D Q, Xie Z Y, Zhang Y J, *et al.* Source Apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(6): 1014-1022.
- [37] 方嘉, 何影, 黄乃涛, 等. 基于PMF模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价: 以浙江省某电子垃圾拆解区为例[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 4027-4038.
- Fang J, He Y, Huang N T, *et al.* Integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in farmland soil based on PMF model: A case study in the e-waste dismantling area in Zhejiang province[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 4027-4038.
- [38] 任静华, 范健, 何培良, 等. 典型工矿企业周边农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 环境污染与防治, 2023, **45**(6): 855-861, 869.
- Ren J H, Fan J, He P L, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in soils around a typical industrial enterprises[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, **45**(6): 855-861, 869.
- [39] 黄昌辰, 温汉辉, 蔡立梅, 等. 广东揭阳市土壤铜的分布特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2021, **35**(1): 293-300.
- Huang C C, Wen H H, Cai L M, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of soil Cu in Jieyang city, Guangdong province[J]. *Geoscience*, 2021, **35**(1): 293-300.
- [40] 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 等. 基于蒙特卡罗模拟的煤矸山周边农用地土壤重金属健康风险评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(10): 5666-5678.
- Ma J, She Z L, Wang S L, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around the gangue heap of coal mine based on Monte Carlo simulation [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(10): 5666-5678.
- [41] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [42] 王静, 魏恒, 潘波. 中国农田土壤Cd累积分布特征及概率风险评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 4006-4016.
- Wang J, Wei H, Pan B. Accumulation characteristics and probabilistic risk assessment of Cd in agricultural soils across China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 4006-4016.
- [43] 王小莉, 陈志凡, 魏张东, 等. 开封市城乡交错区农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境化学, 2018, **37**(3): 513-522.
- Wang X L, Chen Z F, Wei Z D, *et al.* Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in agricultural soils located in the peri-urban area of Kaifeng City [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(3): 513-522.
- [44] 尚婷婷, 张亚群, 周静, 等. 白银市城郊周边农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 环境生态学, 2023, **5**(4): 19-26.
- Shang T T, Zhang Y Q, Zhou J, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in farmland soil, Baiyin suburb[J]. *Environmental Ecology*, 2023, **5**(4): 19-26.
- [45] Smith A H, Goycolea M, Haque R, *et al.* Marked increase in bladder and lung cancer mortality in a region of Northern Chile due to arsenic in drinking water[J]. *American Journal of Epidemiology*, 1998, **147**(7): 660-669.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)