

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH ₄ 、CO ₂ 和N ₂ O浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512)	《环境科学》征稿简则(4735)
信息(4696, 4790, 4887)	

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析

张利瑞^{1,2}, 彭鑫波¹, 马延龙^{2*}, 康乐¹, 张妍娥¹, 王泉灵¹, 张松林^{1*}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查开发研究院, 兰州 730050)

摘要: 耕地土壤的重金属有可能通过食物链网迁移转化危害生态环境和人体健康。目前, 人们对兰州市耕地土壤重金属的生态环境和人体健康风险还不够清楚, 从而影响对其有效管控。因此, 以兰州市耕地表层土壤为研究对象, 采用潜在生态风险危害指数评价 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 共 5 种重金属的生态环境风险, 以 USEPA 提出的健康风险模型和推荐的标准评估其人体健康风险, 用地理探测器探究风险空间分异的主要影响因素, 以便为研究区重金属污染风险的精准管控提供科学依据。结果表明, 研究区耕地表层土壤重金属对生态环境风险主要为中风险 (65.25%), 少部分为低风险 (13.80%) 和高风险 (20.95%), 低风险区主要位于永登县东南部、榆中县中部和北部以及皋兰县西南部; 中等风险区在三县五区均有分布; 高风险区位于永登县北和东南部、城关区南部、七里河东北部、西固区东部和榆中县中部。5 种重金属不同暴露途径的非致癌与致癌风险均为: 经口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入, 总体上儿童高于成人。但是, “五毒”重金属的非致癌风险 HI 均小于 1, 表明它们对当地居民不存在不可接受的非致癌风险。As 的致癌风险分别大于 1×10^{-5} (儿童 2.04×10^{-5}) 和小于 1×10^{-4} (成人 1.91×10^{-5}), 说明其对当地居民存在可接受的中等致癌风险, 且儿童的大于成人。地理探测器分析表明, 采样季平均降水量对 As 和 Cd 人体健康风险空间分异的影响最大, GDP 对 Cr 风险空间分异的影响最大, 距铁路距离对 Hg 和 Pb 风险空间分异的影响最大; 交互作用探测表明, 各因子之间均为双因子增强, 除主导因子起作用外, pH 值、坡度和海拔高度等其它因子也会增强主导因子对耕地土壤重金属风险空间分异的影响程度。

关键词: 耕地表层土壤; 重金属污染; 潜在生态危害; 人体健康风险; 兰州市

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4767-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112226

Risk Assessment and Attribution Analysis of “Five Toxic” Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou

ZHANG Li-rui^{1,2}, PENG Xin-bo¹, MA Yan-long^{2*}, KANG Le¹, ZHANG Yan-e¹, WANG Quan-ling¹, ZHANG Song-lin^{1*}

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. The Third Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Heavy metals in cultivated soil may migrate and transform through the food chain to harm the ecological environment and human health. At present, the ecological environment and human health risks of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou city remain unclear, which impacts the effective management and control of heavy metals. The potential ecological risk hazard index was used to evaluate the ecological environmental risks of As, Cd, Cr, Hg, and Pb in the surface soil of cultivated land in Lanzhou, and the health risk model proposed by USEPA and the recommended standard were used to evaluate their human health risk. The main factors influencing the spatial differentiation of human health risk were explored by using geographic detectors. The risk of heavy metals to the ecological environment of the cultivated land surface soil in the study area was mainly medium (65.25%), and small portions were low (13.80%) and high (20.95%). The low-risk areas were mainly located in the southeast of Yongdeng County, the middle and north of Yuzhong County, and the southwest of Gaolan County. Moderate risk areas were distributed in three counties and five districts. The high-risk areas were located in the north and southeast of Yongdeng County, the south of Chengguan District, the northeast of Qilihe, the east of Xigu District, and the middle of Yuzhong County. The non-carcinogenic and carcinogenic risks of five types of heavy metal exposure pathways were as follows: oral ingestion > skin contact > respiratory ingestion; generally speaking, children were at higher risk than adults. The non-carcinogenic risk in children was higher than that in adults; however, there was no such risk for local residents, as they were all less than 1. At the same time, the carcinogenic risk of As was greater than 1×10^{-5} (children 2.04×10^{-5}) and less than 1×10^{-4} (adults 1.91×10^{-5}), respectively. This indicated an acceptable medium risk to the local residents, and the risk to children was again greater than that to adults. Geographical detector analysis showed that average precipitation during the sampling season had the greatest impact on the spatial differentiation of human health risks of As and Cd, GDP had the greatest impact on the spatial differentiation of human health risks of Cr, and distance from the railway had the greatest impact on the spatial differentiation of human health risks of Hg and Pb. Interaction detection showed that all factors were enhanced by double factors. In addition to leading factors, other factors such as pH, slope, and altitude also enhanced the influence of leading factors on the spatial differentiation of heavy metal risk in cultivated soil.

Key words: arable surface soil; heavy metal pollution; potential ecological hazards; human health risks; Lanzhou

有报告指出: 污染已成为全球土壤功能退化最主要的威胁之一^[1]。我国 16.1% 的耕地土壤遭受污染^[2], 原因之一就是重金属污染。净土才能洁食。土壤重金属可能直接和/或间接地危害生态环境, 进而通过食物链/网进入人体, 从而直接影响着我国的粮食安全和人体健康^[3,4]。有研究表明, 公路沿线土壤

重金属污染增加了附近居民的健康风险^[5], 垃圾填埋场土壤重金属污染增加了附近居民的致癌风

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51068025)

作者简介: 张利瑞 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染与修复, E-mail: zlr756962368@163.com

* 通信作者, E-mail: 1551410352@qq.com; zhangsonglin65@nwnu.edu.cn

险^[6],经叶类蔬菜途径摄入的重金属存在较高健康风险^[7],汞矿周边土壤的As对当地居民有严重的健康风险^[8].可见,有必要科学评估土壤重金属污染的生态与健康风险并探讨其空间分异的影响因素.目前,对重金属生态风险和人体健康风险评价的方法主要包括传统评价模型、综合评价模型和美国国家环保署(USEPA)吸入风险模型,传统评价模型主要包括商值法和潜在生态风险危害指数法.商值法为生物暴露量除以效应浓度,与潜在生态风险危害指数法相比,不具有预测未来风险的能力^[9];综合评价模型不能清楚地反映风险形成机制和影响因素,而潜在生态风险危害指数法用定量的方法划分出重金属潜在危害程度;USEPA吸入风险评估模型敏感度更高,能根据风险值的高低对危害程度进行量化^[10].地理探测器能揭示土壤重金属含量的影响因素及其交互作用,包括重金属含量空间分布与环境因子间的非线性关系,识别土壤重金属污染和风险的分布特征^[11,12].

兰州市区“两山夹一谷”的地形限制了兰州市的耕地分布,工业化和城市化不断发展使耕地面积不断减少,塑料地膜使用和污水灌溉等因素可能导致耕地重金属污染.有研究表明,兰州市永登县耕地Hg含量呈升高趋势^[13],西固区耕地Hg污染受燃煤影响^[14],七里河区耕地Hg和Cd轻微累积,榆中县Cd和Hg累积生态风险较高^[15,16].可见,兰州市可利用耕地面积逐年降低且质量堪忧.虽然有关学者已开展了兰州市部分区域和类型土壤的重金属污染及其风险相关研究,但是还不够全面与深入.因此,本文研究兰州市耕地土壤Pb、Hg、Cr、Cd和As这5种重金属(“五毒”)的潜在生态风险和人体健康风险,探明风险空间分异的主要影响因子,以期为保障耕地质量、粮食安全和人体健康提供科学依据.

1 研究区概况

兰州市位于黄土高原与青藏高原的交接处,东经 $102^{\circ}35' \sim 104^{\circ}34'$,北纬 $35^{\circ}34' \sim 37^{\circ}07'$,总面积 $1.331 \times 10^4 \text{ km}^2$,总人口413.4万人(截至2020年7月);辖三县五区,包括城关区、七里河区、安宁区、西固区、红古区、永登县、榆中县和皋兰县,南北群山环抱,东西黄河穿流而过.典型的大陆性季风气候,年均气温 9.8°C ,年均降水量327 mm,年均日照2424 h,无霜期182 d以上.境内主要河流为黄河及其支流湟水、庄浪河和大通河等.土壤以灰钙土为主,其次为栗钙土、灰褐土、黑垆土、黄绵土和灌淤土等;兰州市和各县区耕地的面积 $21 \times 10^4 \text{ hm}^2$.自然植被以干草原和荒漠草原为主,由多年旱生丛生

禾草、旱生灌木和小半灌木组成.果树以梨、苹果、桃和葡萄为主,粮食作物以玉米和小麦为主,经济作物以马铃薯、百合和白兰瓜为主,蔬菜以菜花、辣椒、黄瓜、番茄、白菜、娃娃菜和甘蓝为主,是“高原夏菜”的重要基地.

2 材料与方法

2.1 样地设置与样点布设

兰州市农田和菜地等耕地表层土壤样品的采集点位布设,根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)^[17],以兰州市1:5万地形图为底图,一般按照 $1000 \times 1000 \text{ m}$ 布点,结合遥感影像解译和实地勘察,重点监管企业周边加密布点,以基本代表周围表层土壤性质及污染水平的同时整体分布基本均匀为主要原则,应用ArcGIS10.2和LocaSpaceViewer软件完成,采样密度一般为1个点 $\cdot \text{km}^{-2}$,以最大限度控制调查面积.共设置采样点957个(见图1).

2.2 样品采集与分析

2.2.1 样品采集

2018年8~12月和2019年4~7月,根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)^[17],选择近期无明显降水的时间采集0~20 cm表层耕地土壤.利用卫星导航仪结合地形和地物确定采样点位,定点误差小于50 m.为增强样品的代表性,采用双对角线法5点混合法采集,一个表层土样由5个子样组合而成;以GPS记录点为中心子样点确定采样区,采样区域一般为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$.先用铁铲剖出20 cm深的凸台土柱,再用木铲铲去铁铲接触土壤,用木铲采样装袋.5点采样量保持一致,混匀后四分,取样1500 g左右.土样运回实验室,参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[18]风干,用木锤碾压,去除杂质后研磨混匀,过孔径2 mm的尼龙筛,未过筛的土粒重新碾压过筛,直至全部样品通过,过筛后的样品充分搅匀后封存待用.

2.2.2 样品分析

根据研究区土壤重金属污染程度和重金属毒性高低,筛选“五毒”重金属(Hg、Pb、Cd、As和Cr)作为风险评价对象^[19].其中:pH值测定依据《土壤中pH的测定》(NY/T 1377-2007)^[20];As和Hg含量依照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定》(GB/T 22105-2008)^[21]进行测定,采用王水(浓硝酸和浓盐酸均为优级纯)进行消解,原子荧光光谱仪(AFS-830)测定;Pb、Cr和Cd含量依照《固体废物金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 766-2015)^[22]测定,消解时采用硝酸(优级纯)、氢氟酸(分析纯)、高氯酸(优级纯)和王水进行热解,电感耦

合等离子体质谱仪(NexION300X)进行测定.样品每50件一批,设置两个空白实验,要求空白测定值小于方法检出限(0.08~0.12 μg·L⁻¹);每批密码插入国

家一级土壤标准物质[GBW07404(GSS-4)],要求回收率90%~110%.设置6个以上涵盖样品浓度值的标准系列浓度,要求相关系数大于0.999.

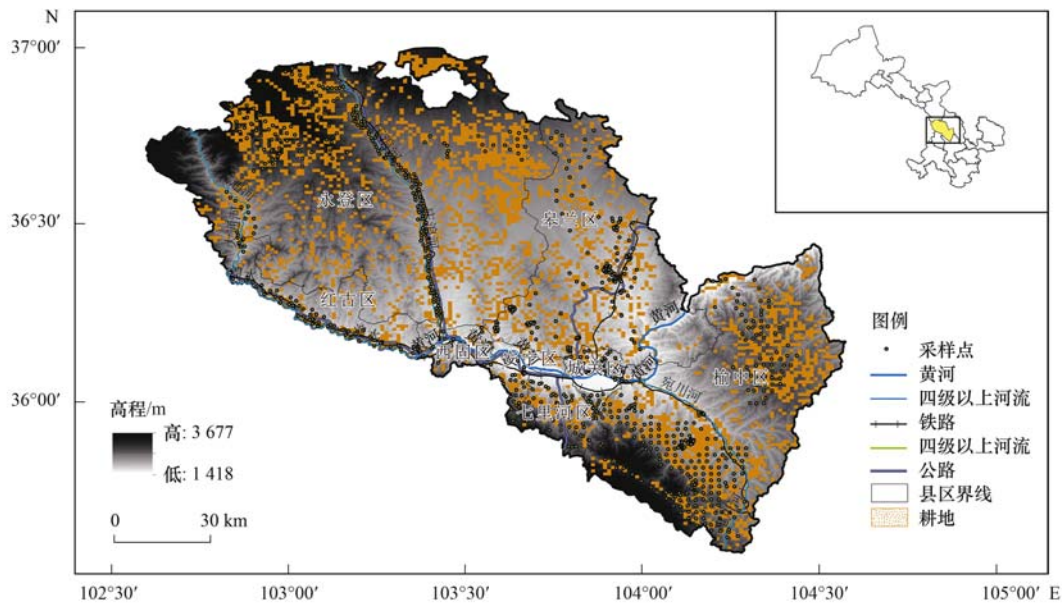


图1 研究区概况和采样点位示意
Fig. 1 Survey of the study area and location map of sampling sites

2.3 风险评价

2.3.1 生态环境风险

本文采用由瑞典科学家 Hakanson^[23]于1980年提出的潜在生态危害指数法,评价研究区耕地表层土壤重金属的生态环境风险.其计算公式如下:

$$C_i^t = C_d^i / C_r^i \tag{1}$$

式中, C_i^t 表示重金属*i*的污染系数; C_d^i 为样品中重金属*i*的实测含量,mg·kg⁻¹; C_r^i 为重金属*i*的甘肃省土壤背景值^[24],单位为mg·kg⁻¹.

$$E_r^i = T_r^i \times C_i^t \tag{2}$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \tag{3}$$

式中, E_r^i 为第*i*种重金属的潜在生态危害系数; RI 为多种重金属的潜在生态风险指数; T_r^i 为第*i*种重金属的毒性系数,引用 Hakanson 和徐争启等^[25]对重金属毒性系数的研究成果:Cr(=2) < Pb(=5) < As(=10) < Cd(=30) < Hg(=40)^[26]; *m* 为评估重金属的个数,这里为5.潜在生态危害的具体分级标准见表1.

表1 重金属潜在生态危害等级的划分标准^[27,28]

Table 1 Classification standard of potential ecological hazard grade of heavy metals

E_r^i	单因子潜在生态危害风险	RI	综合潜在生态危害风险
$E_r^i < 40$	无风险	$RI < 100$	低风险
$40 \leq E_r^i < 80$	轻微风险	$100 \leq RI < 200$	中等风险
$80 \leq E_r^i < 160$	中等风险	$200 \leq RI < 400$	高风险
$160 \leq E_r^i < 320$	高风险	$RI \geq 400$	极高风险
$E_r^i \geq 320$	极高风险		

2.3.2 人体健康风险

本文参照 US EPA 提出的健康风险模型和标准,评价研究区耕地表层土壤农田重金属的人体健康风险^[29].具体公式如下:

$$ADD_{ing} = \frac{C \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \tag{4}$$

$$ADD_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{PF \times BW \times AT} \tag{5}$$

$$ADD_{derm} = \frac{C \times SA \times SL \times ABE \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \tag{6}$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{derm} 分别为经口摄入、呼吸摄入和皮肤摄入的每日剂量,mg·(kg·d)⁻¹; *C* 为土壤中重金属的含量,mg·kg⁻¹; *IngR* 为每日摄取率; *InhR* 为每日吸收率; *EF* 为暴露频率; *ED* 为暴露时长; *BW* 为平

均体重; AT 为平均时间; PF 为颗粒物释放因子; SA 为皮肤暴露面积; SL 为皮肤黏附因子;

ABE 为皮肤吸附因子. 参数值见表 2 (USEPA 于 2009 年提出的参照标准).

表 2 US EPA 健康风险评价模型的暴露参数

Table 2 Exposure parameters of the US EPA health risk assessment model

参数	单位	儿童	成年人	文献
IngR	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	200	100	[31]
InhR	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	7.5	14.5	[29]
EF	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350	350	[31]
ED	a	6	24	[30]
BW	kg	15.9	56.8	[30]
AT	d	$\text{ED} \times 365$ (非致癌)	70×365 (致癌)	[30]
PF	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.36×10^9	1.36×10^9	[30]
SA	cm^2	1 600	5 000	[32]
SL	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.2	0.07	[31]
ABE		0.001	0.001	[31]

重金属对人体健康产生的非致癌效应和致癌效应计算公式如下:

$$\text{HQ}_i = \text{ADD}_{ij} / \text{RfD}_{ij} \quad (7)$$

$$\text{HI} = \sum \text{HQ}_i = \sum (\text{ADD}_{ij} / \text{RfD}_{ij}) \quad (8)$$

$$\text{CR} = \sum \text{CR}_i = \sum \text{ADI}_{ij} \times \text{SF}_{ij} \quad (9)$$

式中, HI 为多种物质或一种物质多种暴露方式的非致癌风险指数, 无量纲; HQ_i 为非致癌重金属 i 的单项非致癌健康风险指数, 无量纲; ADD_{ij} 为非致癌重金属 i 的第 j 种暴露途径的日均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; ADI_{ij} 为致癌重金属 i 的第 j 种暴露

途径的日均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD_{ij} 为非致癌重金属 i 的第 j 种暴露途径的参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; SF_{ij} 为致癌重金属 i 的第 j 种暴露途径的斜率系数, 无量纲.

各重金属的 RfD 和 SF 参考值见表 3. 当 HI 值 ≤ 1 , 表明没有非致癌风险; 当 $\text{HI} > 1$, 意味着有非致癌风险, 非致癌可能性随着 HI 值的增加而增加. CR 为多种物质或一种物质多种暴露方式的致癌风险, 无量纲. 为了更清楚地研究研究区重金属致癌风险, 本研究以级差对土壤重金属致癌风险进行划分, 具体分级标准如表 4 所示.

表 3 土壤重金属不同暴露途径的 RfD 和 SF 参考值¹⁾

Table 3 RfD and SF reference values of soil heavy metals exposed by different pathways

重金属	RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$			SF/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$		
	口腔摄入	呼吸摄入	皮肤接触	口腔摄入	呼吸摄入	皮肤接触
As	0.000 3 ^[33]	0.000 123 ^[33]	0.003 01 ^[33]	1.5 ^[33]	0.004 3 ^[33]	1.5 ^[33]
Cd	0.001 ^[33]	0.001 ^[33]	0.001 ^[33]	0.38 ^[35]	0.001 8 ^[33]	0.38 ^[35]
Cr	0.003 ^[29]	0.002 86 ^[29]	0.000 06 ^[29]	—	42 ^[29]	0.5 ^[34]
Hg	0.000 3 ^[33]	0.000 3 ^[33]	0.000 024 ^[33]	—	—	—
Pb	0.003 5 ^[33]	0.003 52 ^[36]	0.035 2 ^[33]	—	—	0.008 5 ^[34]

1) “—”表示未查到数据

表 4 土壤重金属致癌风险的分级标准

Table 4 Classification standard of carcinogenic risk of soil heavy metals

等级	USEPA 标准		本研究标准	
	CR	致癌风险	CR	致癌风险
1	$\text{CR} \leq 10^{-6}$	无风险	$\text{CR} \leq 10^{-6}$	无风险
2	$10^{-6} < \text{CR} \leq 10^{-4}$	有, 可接受	$10^{-6} < \text{CR} \leq 10^{-5}$	低风险, 可接受
3	$\text{CR} > 10^{-4}$	有, 不可接受	$10^{-5} < \text{CR} \leq 10^{-4}$	中风险, 可接受
4			$\text{CR} > 10^{-4}$	高风险, 不可接受

2.3.3 地理探测器

自然和人为因素影响土壤重金属含量的动态平衡及其空间分布. 其中, 海拔高度是土壤重金属含量空间分布的主要影响因子^[37]. 坡度影响土壤物质的形成与积累, pH 值影响土壤重金属的赋存状态与迁移能力, 降水量和气温影响土壤含水量和温度, 进而

影响土壤环境状况, 同时大气湿沉降可能带来重金属污染. 其中, 采样季平均降水量和平均气温的影响更直接. 人类活动有可能带来土壤重金属污染, 并加剧其空间分异性. 其中, 距公路和铁路距离反映交通的影响, 距河流距离反映土壤重金属流失以及污染河水灌溉的影响, GDP (国内生产总值) 和人口数量

人类活动、尤其是工农业生产和生活对土壤重金属污染的影响。

地理探测器是探测和利用变量空间分异性并揭示其驱动因子的统计学方法^[11]。本文利用其中的分异及因子探测器,探究海拔高度(km)、坡度(°)、pH值、采样季平均气温(℃)、采样季平均降水量(mm)、距公路距离(km)、距铁路距离(km)、距河流距离(km)、GDP(万元)和人口(人)对土壤重金属生态环境风险与人体健康风险的影响,并识别其空间分异的影响因子。高程数据从地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)得到,经 ArcGIS 软件的拼接、裁剪与坡度提取等操作,得到海拔高度和坡度数据;距公路、铁路和河流距离采用欧式距离求出;pH 值直接采样测量;采样季平均降水量和平均气温来自资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>),在 ArcGIS 中对数据进行相应的预处理获得。鉴于上述因子对两种风险的影响结果类似,故仅探究其对人体健康风险的影响:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (10)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (11)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (12)$$

式中, q 度量影响因子 X 对土壤重金属人体健康风险(Y)空间分布的解释程度,取值 $[0,1]$, q 值越大说明影响因子的解释力越强; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差; $h=1,\cdots,L$, L 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区;SSW 和 SST 分别为层内方差之和与全区总方差。

2.3.4 风险空间分布

采用克里金插值法绘制研究区土壤“五毒”重金属的生态环境风险与人体健康风险的空间分布图。原始数据或者转换以后呈正态分布是空间插值的前提^[38]。采用 K-S 检验确定数据的正态分布性。假设 $H_0: F(X) = F_n(X)$,计算统计量: $D = |F(X) - F_n(X)|$ 。 $D_\alpha(n)$ 样本量为 n 时 $\alpha = 0.05$ ^[39]水平下 K-S 检验的临界值,若 $D < D_\alpha(n)$,则假设成立,认为理论分布 $F(X)$ 与样本数据的经验分布拟合较好,在 $\alpha = 0.05$ 水平下无显著差异。

3 结果与分析

3.1 土壤重金属含量描述性统计特征

本研究以 3σ 原则识别异常值,复检复测表明,异常值真实存在,分布于企业周边,故不剔除异常值。其中, $\omega(\text{As})$ 范围在 $2.41 \sim 34.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $13.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超出甘肃省土壤环境背景值的1.06倍; $\omega(\text{Cd})$ 范围在 $0.05 \sim 1.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超出甘肃省土壤环境背景值2.24倍; $\omega(\text{Cr})$ 范围在 $17.00 \sim 155.770 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $65.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超出甘肃省土壤环境背景值0.93倍; $\omega(\text{Hg})$ 范围在 $0.01 \sim 0.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超出甘肃省土壤环境背景值2.33倍; $\omega(\text{Pb})$ 范围在 $11.30 \sim 60.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $23.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超出甘肃省土壤环境背景值1.28倍。

3.2 生态环境风险

峰度和偏度表示数据偏离正态分布的程度。基于危害系数的研究区土壤“五毒”重金属生态危害风险指数见表5,表明 As 和 Cr 的 E_r^i 偏度 <0 ,左偏;Cd、Hg 和 Pb 的 E_r^i 偏度均 >0 ,右偏。其中,As、Cd、Cr 和 Pb 的 E_r^i 偏度较小且峰度较低,Hg 的 E_r^i 较大

表5 基于危害系数的研究区土壤“五毒”重金属生态危害风险

Table 5 Ecological hazard risk of “five toxic” heavy metals in soil based on hazard coefficient in the study area						
项目	As	Cd	Cr	Hg	Pb	
偏度	-0.363	0.699	-0.319	2.318	0.26	
峰度	0.308	1.507	2.14	7.398	0.646	
标准差	2.041	18.416	0.231	81.658	0.927	
K-S	3.29×10^{-4}	4.87×10^{-4}	1.58×10^{-7}	2.57×10^{-55}	1.08×10^{-2}	
变异系数	0.02	0.009 8	0.060 9	0.015 4	0.029 4	
毒性系数	10	30	2	40	5	
最小值/mg·kg ⁻¹	3.34	23.02	0.97	15.7	3.4	
最大值/mg·kg ⁻¹	15.81	138.62	2.66	424.4	9.81	
平均值/mg·kg ⁻¹	10.43	63.40	1.86	81.66	6.25	
超标样点 /%	无风险	100	8.86	100	16.11	100
	轻微风险	0	75.6	0	46.26	0
	中等风险	0	15.54	0	29.57	0
	高风险	0	0	0	7.13	0
	极高风险	0	0	0	0.93	0

且峰度较高. 经 K-S 检验,表明研究区耕地表层土壤中“五毒”重金属含量的数据中,全不符合正态分布,其中 Hg 偏离正态严重. 所以,在空间插值之前需要进行数据转换.

变异系数体现了不同样点间变量的变异程度^[40]和离散程度^[41]. 研究区“五毒”重金属 E_r^i 的变异系数从大到小依次为: Cr > Pb > As > Hg > Cd,均属于弱变异(<10%),受人为活动的影响较弱. 表 5 表明,研究区土壤中“五毒”重金属的 E_r^i 平均值从大到小依次为: Hg > Cd > As > Pb > Cr,显示 Hg 和 Cd 的 E_r^i 值较高, Hg 的各种生态环境风险均存在,以轻微和中等风险为主; Cd 的生态环境风险从无到高,绝大部分是轻微,但是中高风险也不容忽视;因此, Hg 和 Cd 的生态环境风险值得

重视. 而 As、Cr 和 Pb 的 E_r^i 值较小,生态环境风险全部处于无风险水平. 基于兰州市耕地表层土壤中 Cd 和 Hg 潜在生态危害风险的分布见图 2,表明兰州市耕地表层土壤 Cd 的轻微生态环境风险区主要位于榆中县舰子村、城关区、七里河区、皋兰县石青村、甜水井、大横村、白坡村、西岔镇和黑石村;中等风险区主要位于红古区、西固区和榆中县. Hg 的极高风险区主要位于红古区,高风险区主要位于西固区和红古区,中等风险区位于西固区和榆中县,轻微风险水平位于榆中县舰子村、城关区、七里河区的皋兰县石青村、甜水井、大横村、白坡村和西岔镇黑石村. 其中极高风险的红古区需要重点关注,必要时采取措施,以免导致生态危害.

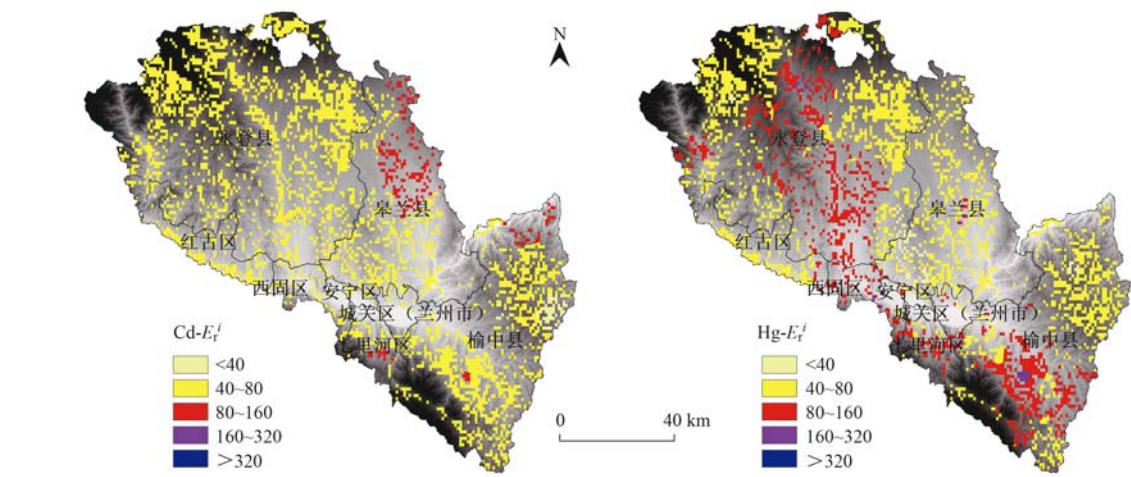


图 2 兰州市耕地表层土壤中 Cd 和 Hg 潜在生态危害风险的分布
Fig. 2 Distribution of potential ecological hazards of Cd and Hg in surface soil of cultivated land in Lanzhou

基于研究区土壤“五毒”重金属的综合生态危害风险指数见表 6. 研究区土壤“五毒”重金属 RI 值的偏度 >0,属于右偏态且峰度较低,属于中等变异($10\% \leq CV \leq 100\%$),表明样点重金属受人为活动

的影响稍强;其中,低风险样点占比为 13.80%,中风险占比过半,高风险的样点占比为 20.95%,表明研究区“五毒”重金属的综合潜在生态危害风险较高,需要加以重视.

表 6 研究区土壤“五毒”重金属的综合生态危害风险(RI)

Table 6 Comprehensive ecological hazard risk of “five toxic” heavy metals in soil of study area										超标样品/%			
项目	最小值	峰度	偏度	标准差	K-S 检验	变异系数	最大值	平均值		低风险	中风险	高风险	极高风险
数值	66.33	4.47	1.65	65.73	9.32×10^{-22}	0.40	513.59	172.05		13.80	65.25	20.95	0.00

基于兰州市耕地表层土壤“五毒”重金属综合生态环境风险的空间分布见图 3,表明兰州市耕地表层土壤“五毒”重金属低风险区主要位于永登县东南部、榆中县中部、北部和及皋兰县西南部;中等风险区在三县五区均有分布;高风险区位于永登县北和东南部、城关区南部、七里河东北部、西固区东部和榆中县中部. 对中、高风险地区需要重点关注,必要时采取措施,以免生态危害发生.

3.3 人体健康风险

3.3.1 非致癌风险

根据 USEPA 提出的健康风险评估方法,兰州市耕地表层土壤中 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径产生的成人和儿童非致癌风险见表 7.

表 7 表明研究区单个和 5 种加和的“五毒”重金属经由不同途径导致的人体非致癌风险大小依次

表 7 兰州市耕地表层土壤“五毒”重金属的非致癌风险^{1,2)}

Table 7 Non-carcinogenic risk of “five toxic” heavy metals in surface soil of cultivated land in Lanzhou

重金属	儿童				成人			
	经口摄入	呼吸摄入	皮肤接触	HI _i	经口摄入	呼吸摄入	皮肤接触	HI _i
As	1.06 × 10 ⁻¹	7.21 × 10 ⁻¹²	1.69 × 10 ⁻⁵	1.06 × 10 ⁻¹	5.91 × 10 ⁻²	1.54 × 10 ⁻¹¹	4.31 × 10 ⁻³	6.34 × 10 ⁻²
Cd	5.91 × 10 ⁻⁴	1.63 × 10 ⁻¹⁴	9.46 × 10 ⁻⁷	5.92 × 10 ⁻⁴	3.31 × 10 ⁻⁴	3.53 × 10 ⁻¹⁴	1.59 × 10 ⁻⁶	3.32 × 10 ⁻⁴
Cr	5.26 × 10 ⁻²	1.52 × 10 ⁻¹²	4.21 × 10 ⁻³	5.68 × 10 ⁻²	2.95 × 10 ⁻²	3.29 × 10 ⁻¹²	2.93 × 10 ⁻⁶	2.95 × 10 ⁻²
Hg	3.28 × 10 ⁻⁴	9.05 × 10 ⁻¹⁵	6.57 × 10 ⁻⁶	3.35 × 10 ⁻⁴	1.84 × 10 ⁻⁴	1.96 × 10 ⁻¹⁴	8.04 × 10 ⁻⁶	1.92 × 10 ⁻⁴
Pb	1.62 × 10 ⁻²	4.44 × 10 ⁻¹³	2.58 × 10 ⁻⁶	1.62 × 10 ⁻²	9.07 × 10 ⁻³	9.62 × 10 ⁻¹³	3.16 × 10 ⁻⁶	9.07 × 10 ⁻³
HI	1.75 × 10 ⁻¹	9.20 × 10 ⁻¹²	4.24 × 10 ⁻³	1.80 × 10 ⁻¹	9.82 × 10 ⁻²	1.97 × 10 ⁻¹¹	4.22 × 10 ⁻³	1.02 × 10 ⁻¹

1) “HI_i”表示单一重金属的非致癌风险指数,“HI”表示多种重金属的非致癌风险指数

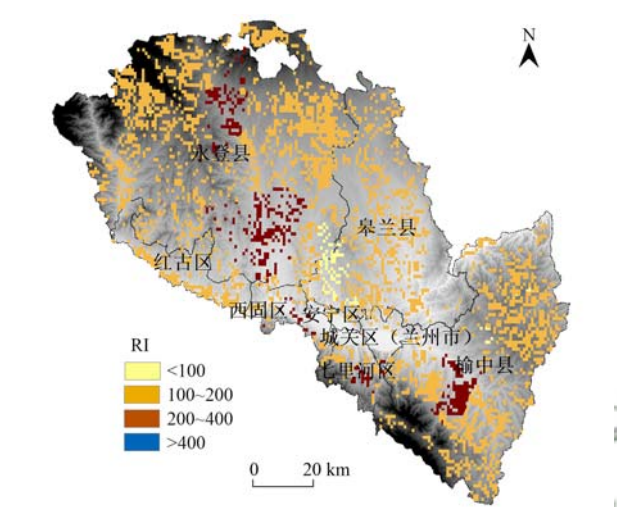


图 3 兰州市耕地表层土壤“五毒”重金属综合生态环境风险的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of integrated eco-environmental risk of “five toxic” heavy metals in surface soil of cultivated land in Lanzhou

均为:经口摄入>皮肤接触>呼吸摄入,经口摄入比皮肤接触的高1~4个数量级,比呼吸摄入高9~11个数量级;皮肤接触比呼吸摄入的高6~9数量级,说明经口摄入对成人和儿童的非致癌风险最大,应予以关注.其中,经口、呼吸和皮肤摄入的非致癌风险HI值均小于1,表明其对人体均不存在非致癌风险.

研究区耕地表层土壤“五毒”重金属对儿童的非致癌风险HI值为 $1.14 \times 10^{-4} \sim 1.60 \times 10^{-1}$,平均值为 3.60×10^{-2} ,成人的HI值为 $6.58 \times 10^{-5} \sim 8.97 \times 10^{-2}$,平均值为 2.05×10^{-2} ,表明儿童比成年

人更高,与文献[42~44]的研究结果相吻合.而且,研究区耕地表层土壤重金属对儿童的非致癌风险总体上高于成人(1.67~1.93倍,平均值为1.78倍).儿童经口摄入的重金属含量略高于成人,但是,经皮肤和呼吸摄入的重金属含量要小于成人,原因是相同的重金属浓度下儿童对土壤重金属的影响比成年人更敏感,以及儿童的吮吸手指等行为和较差的解毒与排毒能力有关^[45],导致儿童可能会摄入更多的重金属.

研究区5种重金属对成人和儿童的非致癌风险大小HI值依次为:As>Cr>Cd>Pb>Hg,As与Cr之和的占比分别为90.46%和90.63%.可以看出,As和Cr是非致癌风险最高的元素,其次是Pb和Cd.因此,研究区As和Cr的非致癌风险值得特别关注.

3.3.2 致癌风险

经K-S检验,表明研究区耕地表层土壤中“五毒”重金属含量对人体致癌影响的数据全不符合正态分布.所以,在空间插值之前需要进行数据转换.

基于兰州市耕地表层土壤“五毒”重金属的致癌风险见表8,研究区单个和5种加和的“五毒”重金属经由不同途径导致的人体致癌风险大小依次均为:经口摄入>皮肤接触>呼吸摄入,说明经口摄入对成人和儿童的致癌风险最大,应予以关注.经皮肤接触和呼吸摄入暴露途径对成人和儿童均不存在致癌风险.其中,除As经口摄入途径对人体为中等致癌风险外,其余4种均无致癌风险.

表 8 兰州市耕地表层土壤“五毒”重金属的致癌风险¹⁾

Table 8 Carcinogenic risk of “five toxic” heavy metals in surface soil of cultivated land in Lanzhou

重金属	儿童				成人			
	经口摄入	呼吸摄入	皮肤接触	CR _i	经口摄入	呼吸摄入	皮肤接触	CR _i
As	2.04 × 10 ⁻⁵	1.61 × 10 ⁻¹⁸	3.26 × 10 ⁻⁸	2.04 × 10 ⁻⁵	1.90 × 10 ⁻⁵	3.49 × 10 ⁻¹⁸	3.99 × 10 ⁻⁸	1.91 × 10 ⁻⁵
Cd	9.63 × 10 ⁻⁸	1.26 × 10 ⁻²⁰	1.54 × 10 ⁻¹⁰	9.65 × 10 ⁻⁸	5.39 × 10 ⁻⁸	1.55 × 10 ⁻¹⁸	1.89 × 10 ⁻¹¹	5.39 × 10 ⁻⁸
Cr	—	7.83 × 10 ⁻¹⁴	5.41 × 10 ⁻⁸	5.41 × 10 ⁻⁸	—	1.70 × 10 ⁻¹³	6.23 × 10 ⁻⁸	6.63 × 10 ⁻⁸
Hg	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb	—	—	3.30 × 10 ⁻¹⁰	3.30 × 10 ⁻¹⁰	—	—	4.05 × 10 ⁻¹⁰	4.05 × 10 ⁻¹⁰
CR	2.05 × 10 ⁻⁵	7.83 × 10 ⁻¹⁴	8.72 × 10 ⁻⁸	2.06 × 10 ⁻⁵	1.91 × 10 ⁻⁵	1.70 × 10 ⁻¹³	1.07 × 10 ⁻⁷	1.95 × 10 ⁻⁵

1) “—”表示由于相关参数缺失而未计算,“CR_i”表示单一重金属的非致癌风险指数,“CR”表示多种重金属的非致癌风险指数

研究区耕地表层土壤中“五毒”重金属对儿童和成人总的致癌风险属于可接受的中等致癌风险,儿童的略高一些,主要是由于经口摄入途径所致.研究区 5 种重金属对成人致癌风险的大小依次为:As > Cr > Cd > Pb,对儿童致癌风险的大小依次为:As > Cd > Cr > Pb. 其中,As 对成人和儿童均具有可接受的中等致癌风险,而 Cd、Cr 与 Pb 对成人和儿童均没有致癌风险.

基于兰州市土壤中 As 致癌风险的空间分布见图 4,表明兰州市耕地表层土壤中 As 对采样点附近儿童存在轻微(1.61%)和中等(98.39%)可接受的

致癌风险,最大值位于红古区窑街镇,最小值位于皋兰县黑石镇. 其中,轻微风险区主要位于永登县东南部和皋兰县西北部. 兰州市耕地表层土壤中 As 对采样点附近成人均为轻微可接受的致癌风险(25.89%)和中等可接受的致癌风险(74.11%),最大值位于红古区窑街镇大红坪,最小值位于皋兰县黑石镇. 其中,轻微可接受的风险区主要位于皋兰县、永登县东南部、西固区西北部以及榆中县中部和东部地区. 因此,需要重点关注 As 对成人的致癌风险,必要时提前采取措施,以免致癌风险进一步升高.

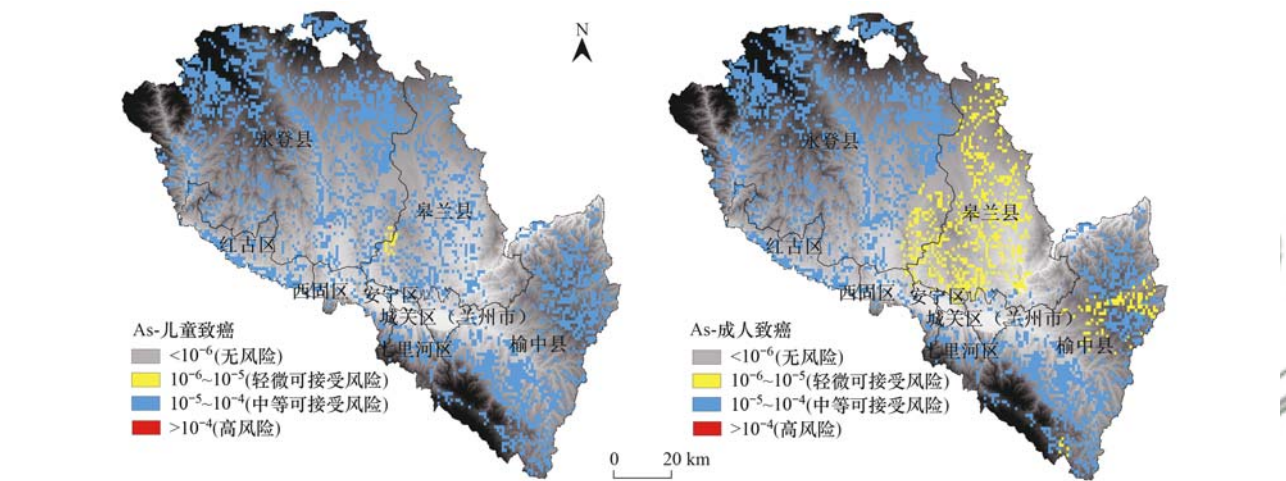


图 4 兰州市土壤中 As 致癌风险的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of carcinogenic risk of As in soils of Lanzhou

3.4 研究区土壤重金属人体健康风险的归因分析

3.4.1 单因子贡献

基于研究区耕地表层土壤“五毒”重金属人体风险影响因子见表 9,表明研究区影响因子对“五毒”重金属 q 值的平均值依次为:采样季平均降水量 > 海拔高度 > GDP > 采样季平均气温 > 坡度 > pH

> 人口 > 距公路距离 > 距铁路距离 > 距河流距离,说明采样季平均降水量、海拔高度和 GDP 对研究区耕地土壤重金属风险空间分异的影响最显著. 各影响因素对不同重金属的影响程度不同,反映不同重金属性质的差异. 其中,采样季平均降水量对研究区 As 和 Cd 风险空间分异的解释力较强,与张军

表 9 研究区耕地表层土壤“五毒”重金属人体风险影响因子

影响因子	q 值					平均值
	As	Cd	Cr	Hg	Pb	
坡度	0.017	0.015	0.055	0.029	0.055	0.171
海拔高度	0.114	0.045	0.034	0.026	0.008	0.227
距河流距离	0.053	0.020	0.004	0.023	0.018	0.118
距公路距离	0.019	0.031	0.019	0.009	0.057	0.135
GDP	0.041	0.006	0.116	0.025	0.028	0.216
pH	0.073	0.015	0.024	0.022	0.009	0.143
采样季平均降水量	0.152	0.090	0.017	0.026	0.003	0.288
人口数	0.031	0.003	0.068	0.012	0.026	0.140
距铁路距离	0.005	0.003	0.006	0.042	0.066	0.122
采样季平均气温	0.108	0.036	0.028	0.022	0.015	0.209

等^[46]的研究结果相符,可能是由于燃煤、扬尘和工业排放湿沉降所致^[47]; GDP 对 Cr 风险空间分异有较强解释力,体现了人类活动、尤其是工业排放的影响;距铁路距离对 Hg 和 Pb 风险空间分异有较强解释力,反映火车运输的煤炭、石油和冶炼等大宗物资泄漏以及列车部件磨损排放的影响^[48].

As 是导致研究区人体致癌风险的主要污染物. 采样季平均降水量对其风险空间分异的影响力最大,海拔高度和平均气温次之,反映三者通过影响土壤形成及其重金属的迁移能力进而影响 As 人体健康风险的空间分异.

3.4.2 多因子交互作用

土壤重金属成分复杂,其健康风险空间分异是多种因素共同作用的结果. 交互作用探测器可判定影响因子的交互作用类型与程度. 表 10 显示了 10 种影响因子中对研究区耕地土壤重金属人体健康风险空间分异影响前三强的交互作用. 根据交互作用类型的判别标准,研究区双因子的交互作用均大于单因子的作用,因此为增强作用;除距铁路距离与距公路距离和降水对 Pb 的交互作用为双协同作用

以外,其余均为非线性协同作用^[49]. 虽然采样季平均降水量、GDP 和距铁路距离对研究区重金属风险空间分异起主导作用,但是 pH 值、坡度和海拔高度等因子也会增强三者的影响度. 其中,相比于坡度和距铁路距离,采样季平均降水量和 pH 值的交互作用对 As 的影响稍大,可能是由于其影响 As 在土壤中的赋存形态和迁移能力. 海拔高度和距河流距离的交互作用对 Cd 健康风险空间分异有显著增强作用,说明土壤母质与灌溉的贡献较大. GDP 和坡度的交互作用对 Cr 风险空间分异的影响稍大,而海拔高度和采样季平均气温与 GDP 的交互作用稍小,反映人类活动的显著贡献,以及坡度改变降雨时土壤的承雨面积、径流速度和入渗时间^[50]. 距铁路和公路距离的交互作用对 Hg 的影响稍大,体现了交通源的显著贡献. 距铁路距离和采样季平均降水量、距公路距离以及坡度的交互作用对 Pb 影响更大一些,反映了交通源、湿沉降和降水入渗的贡献显著. 交互探测结果表明,研究区土壤重金属的迁移、赋存和累积受多种因素的复合影响,使其健康风险空间分异呈现出不同的现象.

表 10 研究区“五毒”重金属人体健康风险影响因子的交互作用

Table 10 Interaction of human health risk factors of “five toxic” heavy metals in the study area					
交互作用	As	Cd	Cr	Hg	Pb
1	采样季平均降水量∩pH 0.255	海拔∩距河流距离 0.156	GDP∩坡度 0.169	距铁路距离∩距公路距离 0.089	距铁路距离∩ 采样季平均降水量 0.123
2	采样季平均 降水量∩坡度 0.255	采样季平均降水量∩ 距铁路距离 0.146	GDP∩海拔高度 0.162	采样季平均降水量∩ 距公路距离 0.085	距铁路距离∩ 距公路距离 0.114
3	采样季平均降水量∩ 距铁路距离 0.250	采样季平均降水量∩ 距河流距离 0.136	GDP∩采样季平均气温 0.153	距公路距离∩海拔高度 0.078	距铁路距离∩坡度 0.112

4 讨论

土壤重金属生态环境风险是一定区域内环境变化或人类活动导致的生态系统结构和功能损伤可能性. 兰州市耕地土壤 As、Cr 和 Pb 均不存在生态环境风险,而综合潜在生态危害中风险占比过半,高风险的样点占比为 20.95%,主要是由于 Hg 的毒性系数较大,从而加重了研究区综合潜在生态危害. 兰州市西固区土壤 As、Cr、Cd 和 Pb 的生态环境风险与蔡锐等^[14]的研究结果一致,而 Hg 略高,轻微~高度均有,是由于两者选用的参比值不同,蔡锐等选用兰州市土壤背景值[$\omega(\text{Cd})$ 为 $0.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]. 李春艳^[51]的研究发现,兰州市城区表层土壤 As 和 Pb 具有中等生态环境风险,均高于本文的研究结果,应该是由于兰州市城区工

业和交通较多导致. 张斌^[13]的研究发现,兰州市永登县耕地土壤重金属 Cr 和 Pb 含量大于 Cd 和 Hg,与本文结果研究相似,是与兰州市冬季燃煤排放以及金属冶炼有关.

研究区耕地土壤重金属对人体基本不具有非致癌风险,但 As 对成人和儿童已构成轻微~中等的可接受致癌风险,且儿童的大于成人,主要与儿童的生理和行为习惯差异,尤其是免疫力较低有关. 其中,As、Cd 和 Cr 对人体的致癌风险均低于白银市^[52](表 11),主要是由于白银市金属矿开采与冶炼及其废水灌溉造成. 汪洁等^[53]的研究发现,昆明市土壤 As 的生态风险 HQ 值最大;同样,本研究中 As 的暴露量低于 Cd、Cr、Hg 和 Pb,但是其健康风险大,说明重金属的健康风险不仅与暴露量有关,而且与其毒性高低有关.

表 11 兰州市与白银市耕地土壤重金属的人体健康风险对比¹⁾

Table 11 Comparison of human health risk assessment between Lanzhou and Baiyin

城市	风险		As	Cd	Cr	Hg	Pb
兰州市	非致癌	儿童	无	无	无	无	无
		成人	无	无	无	无	无
	致癌	儿童	轻微~中等可接受风险	无	无	—	无
		成人	轻微~中等可接受风险	无	无	—	无
白银市	非致癌	儿童	无	无	无	无	无
		成人	无	无	无	无	无
	致癌	儿童	中等可接受	中等可接受	中等可接受	—	—
		成人	中等可接受	中等可接受	中等可接受	—	—

1) “—”表示由于相关参数缺失而未计算

5 结论

(1)研究区耕地表层土壤中“五毒”重金属总的生态环境风险主要为低~高等,中等风险占比过半。As、Cr和Pb不存在生态环境风险,Cd以轻微为主,Hg主要为轻微~中等风险;必要时需提前采取措施,以避免生态风险进一步升高。

(2)研究区土壤“五毒”重金属的人体健康综合风险等级较低,非致癌风险HI依次为从口摄入>皮肤接触>呼吸摄入,但是均小于1,表明均不存在非致癌风险。Cd、Cr和Pb对当地居民不存在致癌风险,而As对当地居民具有可接受的中等致癌风险,需要引起关注。

(3)研究区土壤重金属人体健康风险空间分异影响因子的作用依次为:采样季平均降水量>海拔高度>GDP>采样季平均气温>坡度>pH>人口>距公路距离>距铁路距离>距河流距离。其中,As和Cd的风险空间分异受采样季平均降水量的影响最显著,Cr受GDP的影响最显著,Hg和Pb受距铁路距离的影响最显著。交互作用显示各因子间均为协同作用,pH值、坡度和海拔高度等增强采样季平均降水量、GDP和铁路分布等主导因子的影响程度。

(4)本文系统分析了研究区“五毒”重金属污染的生态环境与人体健康风险,并探究了其影响因子的单独与交互作用,有助于研究区耕地表层土壤重金属污染风险的精准管控。

参考文献:

[1] FAO, ITPS. Status of the world's soil resources (SWSR): main report[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015.

[2] 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 等. 土壤环境质量预警体系构建与应用[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2834-2841.

Li X N, Ding S K, Chen W P, et al. Construction and application of early warning system for soil environmental quality [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2834-2841.

[3] 陈世宝, 王萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治

现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.

Chen S B, Wang M, Li S S, et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution pre-vention in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 35-41.

[4] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 153-159.

Xu J M, Meng J, Liu X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 153-159.

[5] Ghosh S P, Raj D, Maiti S K. Risks assessment of heavy metal pollution in roadside soil and vegetation of national highway crossing through industrial area [J]. Environmental Processes, 2020, 7(4): 1197-1220.

[6] Karimian S, Shekoohiyan S, Moussavi G. Health and ecological risk assessment and simulation of heavy metal-contaminated soil of Tehran landfill [J]. RSC Advances, 2021, 11(14): 8080-8095.

[7] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4916-4924.

Yang J Z, Wang Z L, Gao J W, et al. Accumulation and health risk of heavy metals in cereals, vegetables, and Fruits of intensive plantations in Hainan province [J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4916-4924.

[8] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 3018-3027.

Wang R, Deng H, Jia Z M, et al. Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas [J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 3018-3027.

[9] 王立婷, 刘仁志. 土壤污染风险评价研究进展[J]. 中国环境管理, 2020, 12(2): 62-68.

Wang L T, Liu R Z. Research progress on soil pollution risk assessment [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(2): 62-68.

[10] 周莉芳, 张美辨, 袁伟明, 等. 应用美国国家环境保护署吸入风险模型评估职业危害的研究[J]. 浙江预防医学, 2014, 26(2): 109-113, 127.

Zhou L F, Zhang M B, Yuan W M, et al. A study on application of inhalation risk assessment model of USEPA in occupational health risk assessment [J]. Zhejiang Journal of Preventive Medicine, 2014, 26(2): 109-113, 127.

[11] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [12] Qiao P W, Yang S C, Lei M, *et al.* Quantitative analysis of the factors influencing spatial distribution of soil heavy metals based on geographical detector[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **664**: 392-413.
- [13] 张斌. 兰州市永登县红城镇耕地土壤污染现状评价[J]. 资源信息与工程, 2021, **36**(2): 113-115.
- Zhang B. Evaluation on soil pollution of cultivated land in Hongcheng Town, Yongdeng County, Lanzhou City [J]. *Resource Information and Engineering*, 2021, **36**(2): 113-115.
- [14] 蔡锐, 曹靖, 代立兰. 兰州西固工业区土壤重金属污染状况分析与评价[J]. 甘肃科技纵横, 2017, **46**(9): 31-34, 30.
- [15] Duan K X, Zhang S L, Zhao B W, *et al.* Soil contamination and plant accumulation characteristics of toxic metals and metalloid in farmland soil-food crop system in Qilihe, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(36): 50063-50073.
- [16] Duan K X, Zhao B W, Zhang S L, *et al.* Contamination characteristics, source analysis, and ecological risk assessment of toxic metals and metalloid in agricultural soil in Yuzhong, China [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2021, **50**(4): 122-133.
- [17] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [18] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [19] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 437-444.
- Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 437-444.
- [20] NY/T 1377-2007, 土壤中 pH 值的测定[S].
- [21] GB/T 22105-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定[S].
- [22] HJ 766-2015, 固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法[S].
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [24] 王生朴, 连兵. 甘肃省土壤环境背景值特征及其分布规律[J]. 甘肃环境研究与监测, 1993, **6**(3): 1-7.
- [25] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [26] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2104-2114.
- Wang H Y, Han L, Xie D N, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in farmland soils around mining areas and pollution assessment[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2104-2114.
- [27] 王蕊, 陈楠, 张二喜. 基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1546-1557.
- Wang R, Chen N, Zhang E X. Ecological and health risks assessment based on the total amount and speciation of heavy metals in soils around mining areas[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1546-1557.
- [28] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [29] 韩琳, 徐夕博. 基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- Han L, Xu X B. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- [30] 徐小涛, 韩桥, 王明仕, 等. 安阳市大型工业区和周围社区土壤中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 地球与环境, 2021, **49**(5): 551-560.
- Xu X T, Han Q, Wang M S, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of large industrial areas and surrounding communities in Anyang city[J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(5): 551-560.
- [31] 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 C 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.
- [32] 杨冰雪, 方晨, 马勤, 等. 浙江省某地区农田土壤重金属污染的健康风险评价[J]. 安徽农业科学, 2021, **49**(7): 66-69.
- Yang B X, Fang C, Ma Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metals pollution in farmland soils in a region of Zhejiang Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, **49**(7): 66-69.
- [33] 蒙永辉, 王集宁, 夏青, 等. 典型铝塑厂周边土壤重金属分布特征与健康风险评价[J]. 中国环境监测, 2019, **35**(5): 69-78.
- Meng Y H, Wang J N, Xia Q, *et al.* Accumulation characteristics and health risk assessment of metals around an plastic park[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(5): 69-78.
- [34] 陈星, 马建华, 李新宁, 等. 基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1068-1074.
- Chen X, Ma J H, Li X N, *et al.* Health risk assessment of soil heavy metals in residential communities built on brownfields[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1068-1074.
- [35] 陈斌, 祝怡斌, 翟文龙. 某退役稀土回收厂表层土壤重金属污染及其对人体健康风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021, (10): 133-138.
- Chen B, Zhu Y B, Zhai W L. Assessment of heavy metal and human health risk in surface soils in a decommissioned rare earth recycling plant[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021, (10): 133-138.
- [36] 王会镇, 卜兴兵, 张凯鑫, 等. 成都绕城高速两侧土壤重金属含量测定及健康风险评价[J]. 四川环境, 2018, **37**(1): 111-119.
- Wang H Z, Bu X B, Zhang K X, *et al.* Determination of heavy metal content in soils on both sides of Chengdu city expressway and evaluation on the healthy risk [J]. *Sichuan Environment*, 2018, **37**(1): 111-119.
- [37] 袁程昱, 李发永, 袁自强, 等. 新疆某高寒、高海拔矿区重金属分布特征及污染评价[J]. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(5): 679-688.
- Yuan C Y, Li F Y, Yuan Z Q, *et al.* Distribution characteristics

- and pollution evaluation of heavy metals in an extremely cold and high-altitude Mining area in Xinjiang[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(5): 679-688.
- [38] 杨楠, 连雅, 夏新, 等. 典型区域土壤重金属空间变异与多变量均质性分区研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(7): 1451-1459.
- Yang N, Lian Y, Xia X, *et al.* Spatial variability and multivariate homogeneity division of soil heavy metals in typical areas[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(7): 1451-1459.
- [39] 叶霖, 王兴旺, 魏立新, 等. 基于RCM的油库输油泵风险评价及运行可靠性分析[J]. *石油化工设备技术*, 2021, **42**(3): 27-32, 40.
- Ye L, Wang X W, Wei L X, *et al.* Risk assessment and operation reliability analysis of oil pumps in oil depot based on RCM[J]. *Petrochemical Equipment Technology*, 2021, **42**(3): 27-32, 40.
- [40] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- Fan M Y, Yang H, Huang X F, *et al.* Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- [41] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
- Dai B, Ly J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of Sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [42] 谢团辉, 郭京霞, 陈炎辉, 等. 福建省某矿区周边土壤-农作物重金属空间变异特征与健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(3): 544-554.
- Xie T H, Guo J X, Chen Y H, *et al.* Spatial variability and health risk assessment of heavy metals in soils and crops around the mining area in Fujian Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 544-554.
- [43] 潘丽波, 乌日罕, 王磊, 等. 北京市密云水库上游土壤和沉积物重金属污染程度及风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 2019, **9**(3): 261-268.
- Pan L B, Wu R H, Wang L, *et al.* Heavy metal pollution levels and risk assessment of soils and sediments in the upstream of Miyun reservoir, Beijing [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(3): 261-268.
- [44] 陶美霞, 胡虎, 胡兰文, 等. 上饶市某铜矿废弃地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(6): 1153-1159.
- Tao M X, Hu H, Hu L W, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals in polluted abandon soil of Shangrao, Jiangxi[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(6): 1153-1159.
- [45] Lian M H, Wang J, Sun L N, *et al.* Profiles and potential health risks of heavy metals in soil and crops from the watershed of Xi River in Northeast China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **169**: 442-448.
- [46] 张军, 高煜, 王国兰, 等. 典型河谷城市土壤重金属含量空间分异及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(6): 1276-1285.
- Zhang J, Gao Y, Wang G L, *et al.* Spatial differentiation and influencing factors of heavy metal content in soils of typical river valley city [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2021, **30**(6): 1276-1285.
- [47] 张国忠. 环渤海区域大气沉降对农田土壤重金属污染的影响及其防治对策研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- Zhang G Z. Study on the influences of atmospheric deposition on the heavy metal pollution in the farmland over the Bohai sea region and corresponding preventions [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [48] 马建华, 楚纯洁, 李剑, 等. 铁路交通对铁路旁土壤重金属污染的影响——以陇海铁路郑州—圃田段为例[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(1): 128-132.
- Ma J H, Chu C J, Li J, *et al.* Influence of railway traffic on heavy metal contamination in railroad-soils: a case study on the Zhengzhou-Putian section of the Long-Hai railway [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(1): 128-132.
- [49] 马永桃, 任孝宗, 胡慧芳, 等. 基于地理探测器的浑善达克沙地植被变化定量归因[J]. *中国沙漠*, 2021, **41**(4): 195-204.
- Ma Y T, Ren X Z, Hu H F, *et al.* Vegetation dynamics and its driving force in Otindag Sandy Land based on Geodetector [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, **41**(4): 195-204.
- [50] 刘娟, 张乃明, 于泓, 等. 沁江两岸耕地土壤重金属径流迁移模拟研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, **21**(4): 1823-1831.
- Liu J, Zhang N M, Yu H, *et al.* Simulated research on the heavy metal runoff migration from the farmland soil on the both sides of Bijiang river [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, **21**(4): 1823-1831.
- [51] 李春艳. 兰州市主城区不同功能区表土重金属污染特征及风险评价[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- Li C Y. Pollution characteristics and risk assessment of topsoil heavy metals in different functional areas in the main urban area of Lanzhou [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [52] 李有文, 王晶, 巨天珍, 等. 白银市不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评价[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(5): 1408-1418.
- Li Y W, Wang J, Ju T Z, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and human health risk assessment in soils from different functional areas of Baiyin, Gansu, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(5): 1408-1418.
- [53] 汪洁, 龚竞, 刘雨佳, 等. 昆明市土壤重金属的生态与健康风险评价[J/OL]. *轻工学报*, 1-18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1437.TS.20211026.0841.002.html>, 2021-12-03.
- Wang J, Gong J, Liu Y J, *et al.* Ecological & health risk assessment of heavy metals in soils from a typical southwest capital city [J/OL]. *Journal of Light Industry*, 1-18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1437.TS.20211026.0841.002.html>, 2021-12-03.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)