

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 ₁₀ 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, 卓保庆, 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 和有机物性能	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 <i>phoD</i> 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, 胡培杰 (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)
稻田干湿过程种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种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索	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)	

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^{1,2}, 郭俊梅³, 杨俊兴^{1,2,*}, 郑国砥^{1,2}, 陈同斌^{1,2}, 刘杰⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 太原理工大学环境科学与工程学院, 晋中 030600; 4. 北京农学院生物与资源环境学院, 北京 102206)

摘要: 为探讨栾城区内农田土壤重金属的分布特征, 对表层土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 这 8 种重金属污染特征、空间分布和污染风险进行分析, 并使用 PMF 模型进行污染源解析, 探讨栾城区土壤管控方案. 进一步检测作物中重金属含量, 利用概率风险评价方法评价研究区农产品的非致癌健康风险, 为栾城区内农田土壤重金属污染治理与防控提供理论基础. 结果表明, 表层土壤 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 分别为 0.06 ~ 1.08、22.14 ~ 473.47、12.83 ~ 150.74、10.75 ~ 577.72 和 62.23 ~ 652.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 点位超标率分别为 1.83%、1.22%、0.61%、0.61% 和 1.22%. 此外, 部分区域土壤中的重金属有向作物中转移并积累的现象, 小麦籽粒 Cd 和 Pb 含量超标率分别为 2.13% 和 5.32%, 玉米籽粒 Cd 含量超标率为 1.20%. 健康风险评价结果表明, 栾城区玉米的复合非致癌健康风险 (TTHQ) 小于 1, 对人体没有明显的负面影响, 食用研究区小麦的复合非致癌风险 (TTHQ > 1), 对人体产生负面影响的可能性较大. 土壤中重金属的空间分布受工业区涉污企业分布的影响, 8 种重金属含量较高的区域均主要分布在工业企业较集中的中部、西部和南部. 总体而言, 研究区大部分表层耕地土壤未受到明显的重金属污染, 存在中等强度 (2 级) 的生态危害. Cd 为无-中度污染 (1 级), Cd 和 Hg 存在中等强度潜在生态风险 (2 级), 其余重金属均为无污染, 低潜在生态风险 (1 级). 根据 PMF 污染源解析结果和实地调查推测, 土壤重金属主要来自土壤母质 (52.05%), 历史污灌和工业生产的人为污染源 (32.98%) 和大气沉降 (14.97%). 综上所述, 研究区北部和东部土壤重金属含量较低, 应划分为优先保护类, 研究区西部、中部和南部部分点位重金属含量超标, 其来源主要为化工、涂料、机械装备等企业, 应划分为安全利用类, 严控污染物的输入, 采用农艺调控等措施, 减少重金属向农作物的转移, 降低食品安全健康风险. 本研究将有助于栾城区土壤的分级治理和污染管控.

关键词: 工业区; 农田土壤; Monte Carlo 模型; 空间分布; 风险评价

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4779-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109012

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City

MENG Xiao-fei^{1,2}, GUO Jun-mei³, YANG Jun-xing^{1,2,*}, ZHENG Guo-di^{1,2}, CHEN Tong-bin^{1,2}, LIU Jie⁴

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 4. College of Bioscience and Resources Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to explore the distribution characteristics of heavy metal contamination of farmland soil surrounding Luancheng town, Shijiazhuang City, Henan province, the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn in the surface soil and crops were determined and assessed. The principal components were also analyzed for source apportionment. The heavy metal concentrations in crops were further detected, and the non-carcinogenic health risks in the study area were evaluated using the probabilistic risk assessment method, as to provide a theoretical basis for the treatment, prevention, and control of heavy metal pollution in farmland soil in Luancheng. According to the results, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Pb})$, and $\omega(\text{Zn})$ in the soils were 0.06-1.08, 22.14-473.47, 12.83-150.74, 10.75-577.72, and 62.23-652.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which exceeded the standard with over-standard rates reaching 1.83%, 1.22%, 0.61%, 0.61%, and 1.22%, respectively. Further, Cd and Pb were transported into crops, in which Cd concentrations exceeded the standard in some corn samples, and Cd and Pb concentrations exceeded the standard in some wheat samples. The total non-carcinogenic health risks (TTHQ) to the human body caused by the consumption of heavy metals in corn grown in the study area were all less than 1, with no obvious negative effects, and TTHQ was higher than 1 in wheat, increasing the likelihood of negative impacts on the human body. With the influence of the distribution of pollution-related enterprises in the industrial zone, heavy metal concentrations were higher in the south, west, and middle directions of the study area. Among them, the study area soil was slightly contaminated by Cd (Level 1). Cd and Hg had a slight potential ecological risk (Level 2), whereas other heavy metals had low potential ecological risk (Level 1). In general, most of the surface cultivated soil was not obviously polluted by heavy metals in the study area. According to the PMF results and survey, we speculated that soil heavy metals mainly came from soil parent material (52.05%), artificial pollution sources (historical sewage irrigation and industrial manufacture) (32.98%), and atmospheric deposition (14.97%). To summarize, the study area should be divided into a priority protection category and safe utilization category. The input of pollution sources should be strictly controlled for the priority protection category, and alternative planting, rotating, and fallow should be implemented for the safe utilization category to

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2022-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771509, 41907125); 国家重点研究发展计划项目 (2018YFC1802604, 2018YFD0800600); 中国博士后科学基金项目 (2019M650827); 人才培养质量建设-高水平人才交叉培养计划-实培计划项目 (PXM2020_014207_000009)

作者简介: 孟晓飞 (1997 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤污染修复与风险评价, E-mail: xfmengcunb@163.com

* 通信作者, E-mail: yangjx@126.com

reduce the risk of standard-exceeding agricultural products.

Key words: industrial area; farmland soil; Monte Carlo; spatial distribution; risk assessment

我国是传统的农业大国,耕地的数量和质量对保障我国粮食安全至关重要^[1]. 改革开放以来,我国经济快速增长,工业化水平越来越高,但同时带来的环境问题也日益严峻^[2],大量含有重金属离子的废水、废气和废渣等排放进入土壤,造成农田土壤重金属污染^[3,4],给我国的农业可持续发展带来了困难^[5]. 文献^[6]显示,全国土壤总超标率为16.1%,耕地点位超标率达19.4%,工业废弃地、固体废弃物集中处理处置场地、采矿区和污灌区的超标点位分别占到34.9%、21.3%、33.4%和26.4%.

土壤环境保护是保障我国“米袋子”、“菜篮子”甚至“水缸子”安全的基础,2017年河北省发布了“净土行动”土壤污染防治工作方案,将栾城区作为土壤污染综合防治先行区建设点之一. 石家庄市栾城区是粮食高产区的典型代表^[7],同时也是化工和机械制造等企业的聚集区,工业生产以及污水灌溉等使土壤中积累了一定量的重金属,给周边农田土壤安全生产带来风险,影响食品安全^[8]. 长期食用种植在受污染农田的重金属超标食物会对人体肝脏等器官造成伤害,因此亟需摸清石家庄市栾城区境内农田土壤重金属污染的整体情况^[9].

目前,已有一些研究针对栾城区洺河沿岸污水灌溉区的农田土壤开展了调查,但针对栾城区农田土壤重金属污染的整体分布特征以及重金属来源尚未明晰. 另外,针对食用该研究区作物中的重金属对人体可能造成的健康风险仍鲜有研究. 目前健康风险评价方法大部分采用的是简单的目标风险系数法,即假定多个确定的参数得出确定的结果,但实际情况下,这些参数往往存在很大的不确定性,造成评估的风险偏高且无法确定风险发生的可能性^[10~12]. 近年来,概率风险评价(probabilistic risk assessment, PRA)备受关注,它通过将参数输入为概率分布的形式,利用 Monte Carlo 模拟得到一个风险概率分布,可有效地解决上述问题,提高健康风险评价的科学性.

本文以石家庄市栾城区全域农田为研究对象,调查该地区土壤和作物中重金属含量,明晰土壤重金属的空间分布及污染物来源、迁移转运特征,并进一步分析摄入研究区农作物的非致癌健康风险,基于此提出栾城区农用地土壤合理的管控措施,以期为栾城区土壤重金属污染修复和防控提供理论依据,对改善土壤环境质量、保证食品安全和降低人体健康风险具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

本研究在河北省石家庄市栾城区开展,该地属温带大陆性季风气候,土壤类型为潮褐土壤,耕地面积约为262.84 km²,占辖区面积的75%以上^[8],年平均降水量474.0 mm. 地势自西北向东南缓慢倾斜,海拔45~66 m. 境内存在多家化工、装备制造、涂料和农药生产等涉污涉重企业,在生产过程中,可能排放重金属进入土壤,造成该区域土壤重金属污染. 此外,该地水资源严重短缺,境内洺河流经栾城区南部,为市区等排污泄洪河道,同时承担着栾城区等沿途农田土壤的灌溉,污染严重.

为了调查栾城区境内农田土壤重金属污染情况,保证每个村落均有采样点,在洺河的上游装备制造基地、下游污灌区以及东南部分高标准农田建设区进行加密采样,其余村落均设有采样点,共采集土壤样品327份(图1). 同时在作物成熟期分别采集小麦($n=94$)和玉米($n=83$)籽粒样品待测.

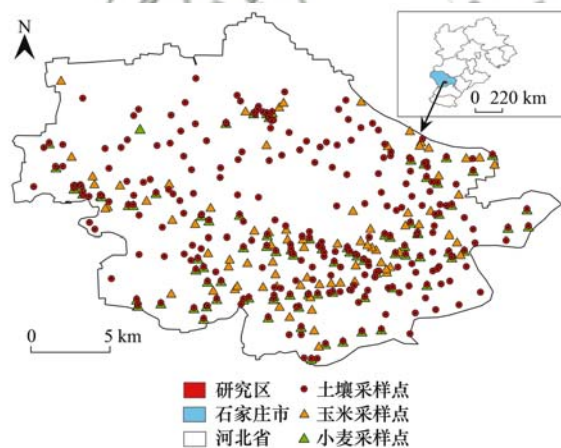


图1 研究区的地理位置以及采样点的空间分布示意

Fig. 1 Location map of the study area and distribution of sampling sites

1.2 样品处理与理化指标测定

土壤样品自然风干后,去除样品中的根系、石砾等杂质,分别过20目和100目尼龙筛. 土壤pH采用玻璃电极法(GB 7859-87)进行测定. 土壤重金属前处理方法参考USEPA(1996) Method 3050B,称取过100目土壤样品0.2 g于锥形瓶中,经HNO₃+H₂O₂(优级纯)微波消解后待测. 作物样品采用HNO₃-HClO₄(5:1,体积比)法进行消解待测. 待测液中砷(As)含量采用原子荧光光度计(AFS-9800型,海光,国产)进行测定;铬(Cr)、铜(Cu)、汞

(Hg)、锌(Zn)和镍(Ni)的含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 5300 DV, Perkin Elmer, 美国)进行测定; 镉(Cd)和铅(Pb)的含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Elan DRC-e, Perkin Elmer, 美国)进行测定, 其中 As、Cr、Ni 和 Zn 的检出限小于 $1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd、Cu 和 Pb 检出限范围小于 $0.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Hg 检出限范围为 $1\sim 10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 测试设置 2% 的平行样, 样品中包含土壤标准物质样品 GBW07402 (GSS-2) 以及作物标准物质 GBW07603 (GSV-2), 监控样品中重金属的回收率($90\%\pm 10\%$), 平行样相对偏差、标准物质回收

率均满足质量控制要求.

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 单因子指数法

单因子指数法(P_i)表示实测含量与污染物土壤筛选值的比值, 是国际上普遍采用的方法之一, 表达式为:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中, P_i 为土壤中重金属 i 的单因子指数; C_i 为重金属 i 的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为重金属 i 在土壤中的筛选值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 评价标准参考国家土壤环境质量标准(GB 15618-2018)筛选值(表 1).

表 1 农用地土壤污染风险筛选值¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
筛选值	25	0.6	250	100	3.4	190	170	300

1) 研究区域为农用旱地, 土壤 pH > 7.5

1.3.2 地累积指数法

地累积指数法(I_{geo})是综合考虑人为污染因素、环境地球化学背景值, 以及岩石各地差异引起的背景值变动的影响, 用于评价土壤重金属污染状况, 其表达式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/1.5B_i)$$

表 2 河北省土壤环境背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
背景值	13.6	0.094	68.3	21.8	0.036	30.8	21.5	78.4

式中, I_{geo} 为土壤中重金属的地累积指数; C_i 为重金属 i 的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); B_i 为重金属 i 在土壤中的环境背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 河北省土壤环境背景值^[13]如表 2 所示. 按照地累积指数的大小, 将其分为 7 级, 污染程度从无到极强逐级递增^[14~16], 如表 3 所示.

Table 2 Background values of soil in Hebei province/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

表 3 地累积指数分级标准

分级	地累积指数	累积污染程度
0	$I_{\text{geo}} \leq 0$	无污染
1	$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	无-中度污染
2	$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	中度污染
3	$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	中度-强污染
4	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	强污染
5	$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	强-极重污染
6	$5 < I_{\text{geo}}$	极重污染

1.3.3 潜在生态风险评价

重金属潜在生态风险指数法(PER)不仅考虑了重金属的生物毒性, 而且考虑了多种污染物的综合作用^[17,18], 被广泛应用, 其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_p^i}{C_n^i}$$

式中, RI 为综合潜在生态风险指数; E_i 为重金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性系数, 如表 4 所示^[19]; C_i^i 为重金属 i 的污染系数; C_p^i 为重金属 i 的实测值; C_n^i 为重金属 i 的背景值. 潜在生态风险指数、综合潜在生态风险指数以及等级和风险程度划分见表 5^[20].

1.3.4 人体健康风险评价方法

分别对摄入研究区小麦和玉米中的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 对人体产生的非致癌风险进行评价, 计算公式如下:

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{RfD \times BW \times AT}$$

$$TTHQ = \sum THQ$$

式中, THQ 为目标危险系数; EF 为暴露频率

表 4 重金属的毒性系数

重金属	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
毒性响应系数	10	30	2	5	40	5	5	1

表 5 重金属潜在生态风险评价和风险程度分级标准

Table 5 Classifying standards of potential ecological risk index and pollution degree of heavy metals

等级	潜在生态风险指数(E_i)	风险程度	等级	综合潜在生态风险指数(RI)	风险程度
1	<40	低潜在风险	1	<150	轻微生态危害
2	40~80	中等潜在风险	2	150~300	中等生态危害
3	80~160	中高等潜在生态风险	3	300~600	强生态危害
4	160~320	高等潜在风险	4	>600	很强生态危害
5	>320	极高等潜在风险			

($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$),为 350 $\text{d}^{[21]}$; ED 为暴露年限(a),为 30 a; FIR 为摄入量($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$); C 为小麦和玉米中的重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); RfD 为有毒污染物的参考暴露剂量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$], 7 种重金属的参考暴露剂量如表 6 所示; BW 为受体体重(kg); AT 为平均暴露时间,非致癌风险为 $\text{ED}\times 365^{[22]}$. TTHQ 为复合目标危险系数,是多种污染元素非致癌风险的和,若 $\text{TTHQ}\leq 1$,表明没有明显的负面影响, $\text{TTHQ}>1$,则有很大可能产生负面影响,而 $\text{TTHQ}>10$,表明存在慢性毒性^[23,24].

表 6 重金属非致癌反应剂量

Table 6 Non-carcinogenic reaction dose of heavy metals

项目	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
RfD/ $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	0.3	1.0	3.0	40	20	3.5	300

采用 Monte Carlo 模型,本研究将上述公式中的体重、小麦和玉米摄入量和重金属浓度定义为一种概率分布.在进行健康风险评估时 Monte Carlo 模拟从定义分布的数值中随机抽取 10 000 次,将得到的 10 000 组数值作为风险公式的输入参数进行模型计算,所得结果构成一个新的分布.变量参数的概率分布取值如表 7 所示.

表 7 参数概率分布取值

Table 7 Probability distributions of parameters

性别	参数	概率模型	概率分布取值
男	小麦摄入量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	正态分布	$\mu=135.1, \sigma=5.4^{[25]}$
女	小麦摄入量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	正态分布	$\mu=105.7, \sigma=3.8^{[25]}$
男	玉米摄入量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	正态分布	$\mu=15.3, \sigma=1.4^{[25]}$
女	玉米摄入量/ $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	正态分布	$\mu=14.3, \sigma=1.1^{[25]}$
男	体重(BW)/kg	正态分布	$P_{25}=60.1, P_{75}=75.0^{[26]}$
女	体重(BW)/kg	正态分布	$P_{25}=53.1, P_{75}=66.0^{[26]}$

1) μ 表示平均值, σ 表示方差, P_{25} 表示第 25 百分位所对应的数值, P_{75} 表示第 75 百分位所对应的数值

1.4 PMF 源解析

PMF 是一种定量确定污染因子贡献率的源解析技术,广泛用于环境污染来源解析,其思路是利用权重计算出各污染因子的误差,后通过最小二乘法确定其主要的污染源和其贡献率,其表达式为^[27,28]:

$$X_{ik} = \sum_{m=1}^m g_{in} f_{nk} + e_{ik} \tag{1}$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^q \left(\frac{e_{ik}}{u_{ik}} \right)^2 \tag{2}$$

$$u_{ik} = \sqrt{(\delta \times C)^2 + 0.25\text{MDL}^2} \tag{3}$$

式中, X_{ik} 为样品 i 中 k 污染因子的含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); g_{in} 为样品 i 在污染源 n 中的贡献; f_{nk} 为污染因子 k 在 n 源中的贡献; e_{ik} 根据 Q_i 目标函数得到, u_{ik} 为 k 污染因子在第 i 土样中的不确定度.当污染因子含量大于方法检出限时(MDL),不确定度公式如式(3)所示, δ 为相对偏差,取 0.1, C 为不同污染因子含量,MDL 为方法检出限.

1.5 数据处理与分析

采用反距离插值法进行土壤重金属含量空间插值.数据统计和分析使用 Microsoft Excel 和 SPSS Statistics 19 完成,污染源解析使用 EPA PMF 5.0 完成,健康风险概率计算使用@ risk 完成,图表制作采用 Origin Pro 2021 完成,空间分析和制图在 ArcGIS Pro 2.5 中完成.

2 结果与分析

2.1 研究区表层土壤重金属含量及生态风险评价

2.1.1 研究区表层土壤重金属含量特征

研究区表层土壤呈碱性(pH 值 8.09~8.27),土壤中 8 种重金属含量的平均值均低于相应筛选值($n=327$),8 种重金属含量低于土壤环境背景值的比例分别为 97.55%、5.5%、60.6%、11.0%、47.1%、71.6%、70.3% 和 8.0% (表 8). $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 分别为 0.06~1.08、22.14~473.47、12.83~150.74、10.75~577.72 和 62.23~652.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,部分点位超过农用地土壤污染筛选值,超标点位个数分别为 6、4、2、2 和 4 个,超标率分别为 1.83%、1.22%、0.61%、0.61% 和 1.22%. $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的平均值分别为 (9.49 ± 1.66) 、 (0.05 ± 0.09) 和 (28.17 ± 6.43) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,采集的样品均低于相应筛选值.研究区除 pH 外,其余 8 种重金属变异系数均较高,由大到小顺序为: $\text{Hg}(180.00)>\text{Pb}(151.11)$

表 8 研究区农田表层土壤 pH 值及重金属含量

Table 8 Descriptive statistics of pH and heavy metal concentrations of soils in the study area									
统计指标	pH	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
样本量	4	327	327	327	327	327	327	327	327
范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	8.09~8.27	5.59~15.50	0.06~1.08	22.14~473.47	12.83~150.74	0.01~1.14	13.63~49.14	10.75~577.72	62.23~652.78
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	8.21	9.49	0.21	74.43	30.10	0.05	28.17	22.97	115.84
中值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	8.24	9.31	0.18	64.51	28.37	0.04	28.18	19.67	101.95
标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.07	1.66	0.12	47.20	11.65	0.09	6.43	34.71	52.43
筛选值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	25	0.6	250	100	3.4	190	170	300
低于背景值点位比例/%	—	97.55	5.5	60.6	11.0	47.1	71.6	70.3	8.0
超标点位个数	—	0	6	4	2	0	0	2	4
超标率/%	—	0.00	1.83	1.22	0.61	0.00	0.00	0.61	1.22
变异系数/%	0.85	17.49	57.14	63.42	38.70	180.00	22.83	151.11	45.26

> Cr (63.42) > Cd (57.14) > Zn (45.26) > Cu(38.70) > Ni(22.83) > As(17.49).

2.1.2 研究区表层土壤重金属污染特征

由图 2 可知,研究区内重金属含量较高的点位

主要分布在研究区的中部、西部和南部. Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 在研究区内有零星点位重金属含量较高,主要分布在研究区中部和南部,其中土壤 Hg 含量最大值仍低于农用地土壤污染风险筛选值. Cr 含

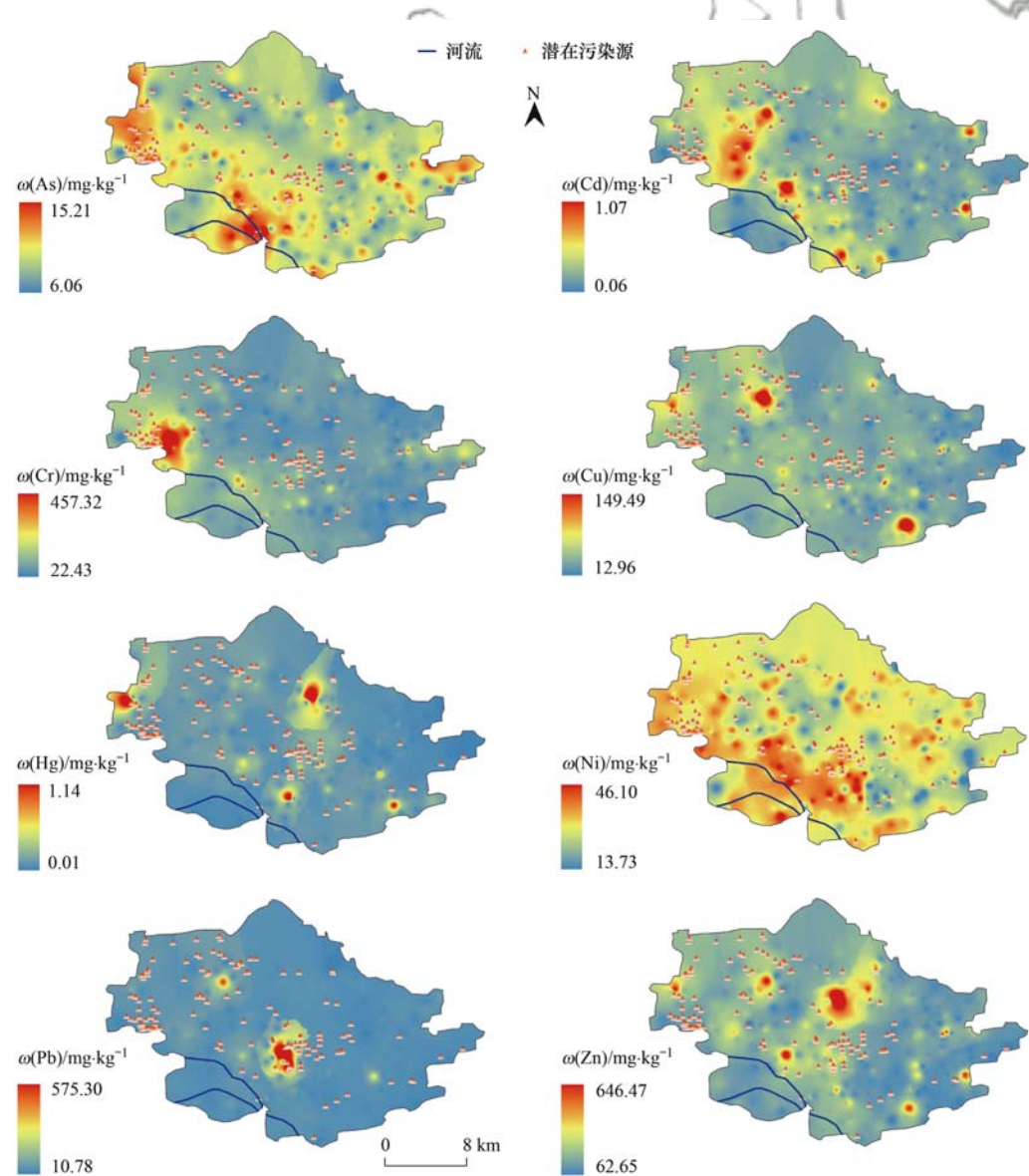


图 2 研究区农田土壤重金属的水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of heavy metal concentrations along soil profiles

量较高的区域主要聚集在研究区的西部,As 和 Ni 含量较高区域分布范围比较相似,主要集中在研究区的中西部到南部.

2.1.3 研究区表层土壤污染水平及生态风险

研究区存在重金属 Cd 1 级污染(无-中度污染),Cd 和 Hg 中等强度潜在生态风险(2 级),其余

重金属无污染(表 9). 重金属的地累积指数 I_{geo} 评价结果表明,除 Cd 外,所有样品的平均地累积指数 I_{geo} 均小于 0,污染等级为 0,无污染,Cd 为无-中度污染. 研究区内 8 种重金属的综合潜在生态风险呈中等强度生态危害(2 级),重金属的单元素潜在生态风险从强到弱排序为: Cd(67.02) > Hg(55.55) >

表 9 研究区土壤重金属污染程度及生态风险评价结果

Table 9 Pollution degree and potential ecological risk of heavy metals in the study area

评价指标	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	综合
单因子污染指数(P_i)	0.38	0.35	0.30	0.30	0.02	0.15	0.14	0.39	
地累积指数(I_{geo})	-1.10	0.57	-0.46	-0.12	-0.11	-0.71	-0.49	-0.02	—
污染程度	无	无-中度	无	无	无	无	无	无	—
等级	0	1	0	0	0	0	0	0	—
潜在风险因子(E_i^i)	6.98	67.02	2.18	6.90	55.55	4.57	5.34	1.48	150.03
潜在生态风险程度	低	中等	低	低	中等	低	低	低	中等
等级	1	2	1	1	2	1	1	1	2

As(6.98) > Cu(6.90) > Pb(5.34) > Ni(4.57) > Cr(2.18) > Zn(1.48),Hg 和 Cd 为中等潜在生态风险(2 级),其余均为低潜在生态风险(1 级).

2.1.4 农田土壤重金属来源解析

采用 PMF 模型对栾城区农田土壤重金属含量进行来源解析,8 种重金属污染因子的信噪比(S/N)均为 9(>2),为“strong”变量^[28,29]. 根据主成分分析结果设置最佳因子数. 主成分分析结果显示,特征值大于 1 的成分有 3 个,因此,本研究选取 3 为最佳因子进行污染源解析.

研究区 8 种重金属污染源解析结果如图 3 所示,因子 1 贡献率较大的元素有 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn,贡献率分别为 74.43%、69.20%、68.28%、76.18%、69.18% 和 57.14%. 因子 2 中 Hg 占有较大的载荷,贡献率为 81.61%. 因子 3 对 Cd 的贡献率最高,为 94.67%,对 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的贡献率分别为 25.26%、26.05%、25.38% 和 37.60%. 3 个因子的贡献率分别为 52.05%、14.97% 和 32.98%.

2.2 研究区作物重金属含量及健康风险评价

2.2.1 研究区作物重金属含量

研究区采集的小麦和玉米样品 ω (Cd) 分别为 $(0.026 \pm 0.018) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.007 \pm 0.016) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,部分样品超出《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017),超标率分别为 2.13% 和 1.20%. 此外,部分小麦样品中 Pb 含量也超过相应限量值,且超标率相对较高,为 5.32%. 在采集的作物样品中,As、Cr 含量均在食品污染物限量值以下,符合食品安全国家标准(表 10).

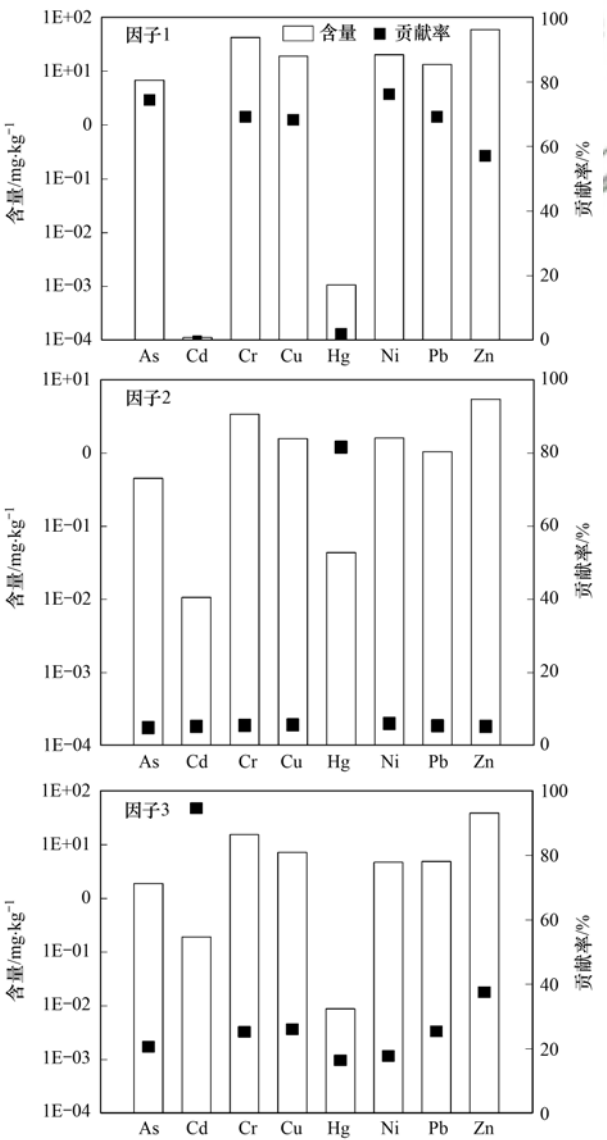


图 3 PMF 源解析因子分析

Fig. 3 PMF source analytic factor analysis

表 10 研究区作物样品重金属含量
Table 10 Heavy metal concentrations of crop samples

农产品	评价指标	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
小麦	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.056	0.026	0.515	4.359	0.873	0.140	33.035
	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.052	0.018	0.414	0.971	0.640	0.042	7.456
	标准值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.50	0.10	1.00	— ¹⁾	—	0.20	—
	超标率/%	0	2.13	0	—	—	5.32	—
玉米	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.057	0.007	0.558	2.751	1.593	0.051	32.486
	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.042	0.016	0.099	0.797	0.594	0.058	6.165
	标准值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.5	0.1	1.0	—	—	0.2	—
	超标率/%	0	1.20	0	—	—	0	—

1) 由于食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762-2017)中没有给出农作物小麦和玉米 Cu、Ni 和 Zn 的限量标准

2.2.2 研究区作物重金属健康风险评价

由表 11 可知,成年男性和女性摄入研究区小麦和玉米中的单个重金属对人体健康产生的非致癌健康风险(P_{75})均小于 1($\text{THQ} < 1$),摄入小麦产生的健康风险高于玉米.不同重金属产生的非致癌健康风险由高到低排序为:As > Cr > Zn > Cu > Ni > Pb >

Cd. 由图 4 可知,摄入研究区小麦在第 20 百分位时对人体健康没有产生明显的负面影响($\text{TTHQ} < 1$),摄入研究区玉米在第 99 百分位时对人体健康没有明显的负面影响($\text{TTHQ} < 1$).摄入该研究区小麦产生的非致癌健康风险表现为男性 > 女性,而摄入研究区玉米产生的健康风险表现为女性 > 男性.

表 11 摄入研究区小麦和玉米对成年男性和女性产生的非致癌健康风险

Table 11 Noncarcinogenic health risks of wheat and corn intake to adult men and women in the study area

项目	小麦				玉米			
	男性		女性		男性		女性	
	P_{50}	P_{75}	P_{50}	P_{75}	P_{50}	P_{75}	P_{50}	P_{75}
As	0.363 1	0.595 0	0.317 0	0.526 3	0.040 95	0.062 70	0.043 39	0.066 61
Cd	0.049 7	0.074 3	0.044 3	0.066 2	0.001 51	0.003 89	0.001 57	0.004 13
Cr	0.330 2	0.517 0	0.291 0	0.457 6	0.040 38	0.047 94	0.042 69	0.050 64
Cu	0.208 4	0.250 4	0.184 8	0.222 3	0.014 83	0.018 58	0.015 74	0.019 65
Ni	0.083 9	0.127 9	0.073 7	0.112 6	0.017 14	0.022 23	0.018 25	0.023 72
Pb	0.076 8	0.095 2	0.068 0	0.084 5	0.003 14	0.005 60	0.003 34	0.006 05
Zn	0.210 8	0.254 1	0.187 5	0.224 8	0.023 38	0.027 97	0.024 95	0.029 50

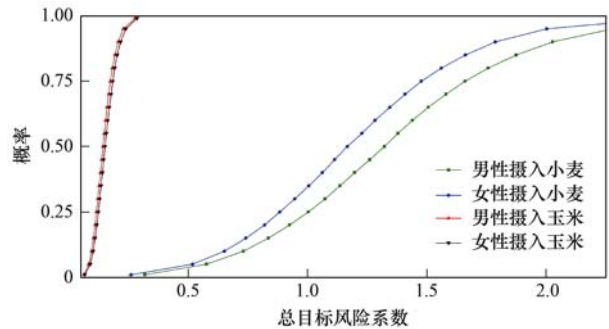


图 4 摄入研究区小麦和玉米对成年男性和女性产生的非致癌健康风险

Fig. 4 Noncarcinogenic health risks of wheat and corn intake to adult men and women in the study area

3 讨论

3.1 研究区重金属污染源解析

研究区内,8 种重金属的变异系数均大于 15%,呈现中等及中等以上强度的变异^[30],说明研究区重金属受人为活动影响强烈^[31].结合 PMF 源解析结果(图 3)和标准化贡献值(图 5),综合分析

研究区污染源.研究区重金属主要有 3 个来源,其中因子 3 对 Cd 污染的载荷最高,为 94.67%,对 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的贡献率分别为 25.26%、26.05%、25.38% 和 37.60%.研究区是一个历史污灌区^[32,33],主要利用洺河水进行农业灌溉^[34],2015 年检测发现,洺河水质 Cd 含量是农田灌溉水质标准(GB 5084-2005)Cd 含量限值($0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 10 倍(数据未发表),不适用于农田灌溉.虽然目前研究区已经停止污水灌溉,但历史污灌可能积累了一定量的 Cd 在土壤中.茹淑华等^[34]曾对栾城污灌区土壤重金属含量检测发现,污水灌溉积累了一定量的 Cd 在栾城土壤中[污灌区 $\omega(\text{Cd}) > 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 明显高于清灌区].此外,研究区是一个化工、机械设备、医药、农药生产和金属加工等工业聚集区.在工业生产过程中,可能排放了一定量的重金属,通过大气沉降、废水排放、固体废弃物堆积等方式进入环境,在土壤中积累,造成研究区局部土壤重金属污染^[35].在研究区的中部和南部,分布着

涂料、颜料、化工生产和杀虫剂等企业,在涂料生产过程中,使用的颜料大多为含有重金属的无机颜料,如镉黄、镉红、氧化亚铜、金属颜料铜粉、锌白和锌绿等,颜料中的重金属可能通过大气干湿沉降、废水排放等方式进入土壤,引起研究区 Cd、Cu 和 Zn 污染^[36],在研究区的中部,分布着化工生产企业,如生产苯二甲酸时会产生大量的苯二甲酸污泥,该污泥经过脱水后含有多种重金属^[37],排放进入环境,造成土壤 Cd 和 Pb 等重金属污染,在研究区的西部,聚集着装备制造企业,如化学农药制造企业,还原钛、氧化铬绿、助剂等生产厂,生产过程中可能会排放一定量的 Cr 进入土壤,造成土壤 Cr 污染.因此,本研究推测因子 3 为工业生产和历史污灌混合的人为污染源.因子 2 对 Hg 的贡献率最高,为 81.61%,有研究表明,农田土壤 Hg 污染主要有两个来源,一个是大气沉降,另外一个为化肥和农药的施用^[28].由于 Hg 含量较高的区域相对聚集,考虑其污染来源于大气沉降,因此,对研究区 Hg 的大气沉降量进行了监测,发现大气沉降中 Hg 含量较高的区域主要分布在南高乡、刘林屯乡和窦姬镇,沉降含量分别为 0.002 8、0.002 6 和 0.001 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,对应研究区的东南部、东北部和西部,与土壤表层土壤 Hg 含量较高点位分布区域相近,结合前人的研究结果^[32],推测 Hg 来源于燃煤过程中 Hg 的挥发,以大气沉降的形式积累在研究区土壤中.因子 1 对 As、Cu、Cr、Ni、Pb 和 Zn 这 6 种重金属土壤污染均有一定的贡献,且因子 1 标准化贡献值的空间分布显示,与因子 2 和因子 3 相比,因子 1 的标准化贡献值分布相对均匀,且土壤重金属含量(表 8)结果显示,土壤 As、Cr、Ni、Pb 低于土壤环境背景值的比例均较高,分别为 97.55%、60.6%、71.6% 和 70.3%,因此推测因子 1 是以土壤母质为主的污染源.

3.2 研究区农作物对人体产生的健康风险

研究区土壤重金属含量结果表明,栾城区农田土壤重金属平均含量均低于相应筛选值,8 种重金属中均有部分点位低于土壤环境背景值,部分样品 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量高于农用地土壤污染风险筛选值(表 8),存在中等强度潜在生态风险.总体而言,栾城区大部分耕地表层土壤未受到明显重金属污染.研究区是一个化工、机械设备、医药、农药生产和金属加工等工业聚集区,在工业生产过程中,排放了一定量的重金属进入环境,土壤中的重金属可向作物中转移,通过食物链进入人体,增加了摄入研究区农作物对人体健康产生的风险^[38].本研究发现,不同性别成年人摄入该研究区农产品玉米对人体产生的复合非致癌风险均小于 1,没有明显的负

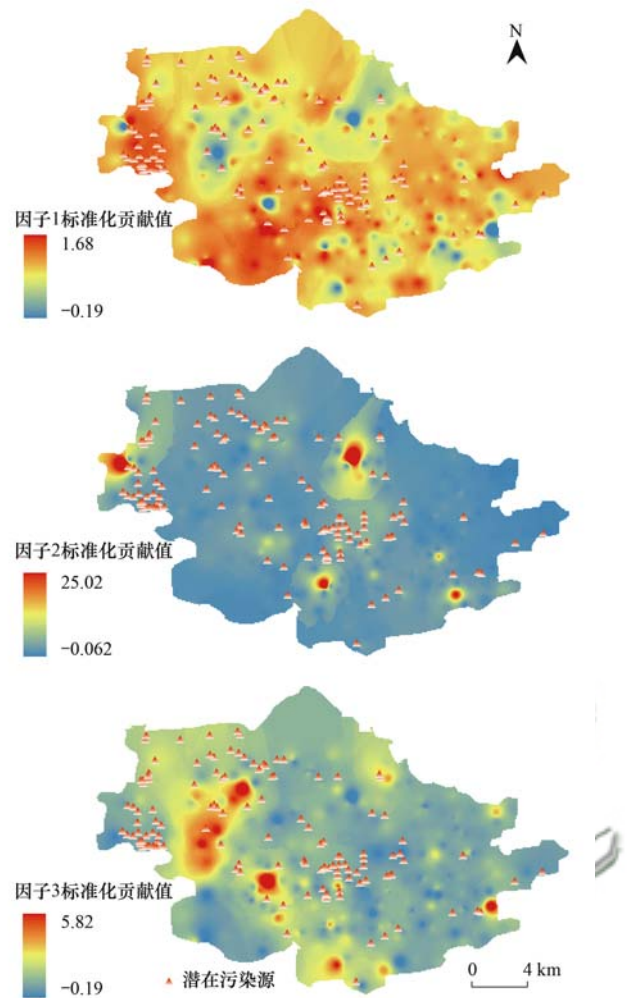


图 5 PMF 标准化贡献值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of PMF source contribution

面作用.摄入该研究区小麦对人体产生的健康风险均明显高于玉米,产生负面作用的可能性很大,相关研究表明,与玉米相比,小麦的重金属积累能力更强,重金属含量更高^[39],此外,小麦作为主要农产品之一,其日均消费量明显高于玉米,因此对人体产生的健康风险更高.不同性别的成年人摄入研究区小麦和玉米产生的健康风险有所不同,男性摄入研究区小麦产生的健康风险大于女性,而女性摄入研究区玉米产生的健康风险大于男性,但差别不大,这可能是因为与女性相比,男性小麦摄入量明显高于女性,而玉米摄入量与女性相差不大,男性的体重明显高于女性,摄入小麦的 FIR/BW(摄入量/体重)更高,相同重金属浓度作物条件下,男性产生的健康风险更高,而摄入玉米时则表现为女性的 FIR/BW 更高,因此,产生的健康风险也就更高.研究区小麦和玉米积累的 As 含量均相对较低,但产生的风险却最高,这是因为与其它 6 种重金属相比,As 的非致癌反应剂量更低,毒性更强,因此产生的健康风险也就更高.而 Zn 和 Cu 虽然非致癌反应剂量高,但同时

小麦和玉米中积累的 Zn 和 Cu 含量也更多,因此产生的健康风险也相对较高. 研究区小麦和玉米中积累的 Cd 和 Pb 含量均较低,且非致癌反应剂量高于 As,因此产生的健康风险也相对较低. 综合分析,食用该研究区的小麦和玉米对人体产生的健康风险不高,但该研究区仍存在少量的小麦、玉米重金属含量超过食品安全国家标准(GB 2762-2017)的现象,为实现栾城区高标准农田土壤建设,应对该研究区进行管控^[40,41].

3.3 研究区重金属污染土壤管控

根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018),将农用地土壤划分为优先保护类(低于筛选值)、安全利用类(低于管控值)和严格管控类(高于管控值). 栾城区作为土壤污染综合防治先行区建设点之一,土壤环境质量总体良好,大部分土壤重金属含量低于农用地土壤风险筛选值.

将研究区内存在污染的重金属 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的单因子污染指数和 8 种重金属综合潜在风险指数采用反距离法进行空间插值(图 6),栾城全区域北部和东部农田土壤中不同重金属含量均低于

农用地土壤污染风险筛选值,应划分为优先保护类,集中建设高标准农田. 同时严格控制在优先保护类耕地集中区域新建有色金属冶炼、石油加工、化工、焦化、电镀、涂料、制药、铅酸蓄电池行业企业. 西部、中部和南部均有部分点位土壤重金属超出农用地土壤污染风险筛选值,如西部存在部分点位 Cr 含量超标(4 个),最高可达到 473.47 mg·kg⁻¹,超标率为 1.22%,中部和南部存在部分点位 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量超标,超标点位个数分别为 6、2、2 和 4 个,其含量最高可达到 1.08、150.74、577.72 和 652.78 mg·kg⁻¹,超标率分别为 1.83%、0.61%、0.61% 和 1.22%,可划分为安全利用类. 在研究区的西部、中部和南部分布着大量的化工、涂料、装备制造和农药生产企业,在生产过程中,可能排放了一定量的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 等重金属进入环境,造成部分点位重金属含量超标. 因此,严格把控污染物输入,如加强农业灌溉用水水质监测,强化农药化肥施用管理,严禁将城镇生活垃圾、污泥、工业废物等直接用作肥料,对排放的废水等处理,达标后排放. 针对安全利用类土壤,主要管理措施为因地制宜采取农艺调控、替代种植、轮

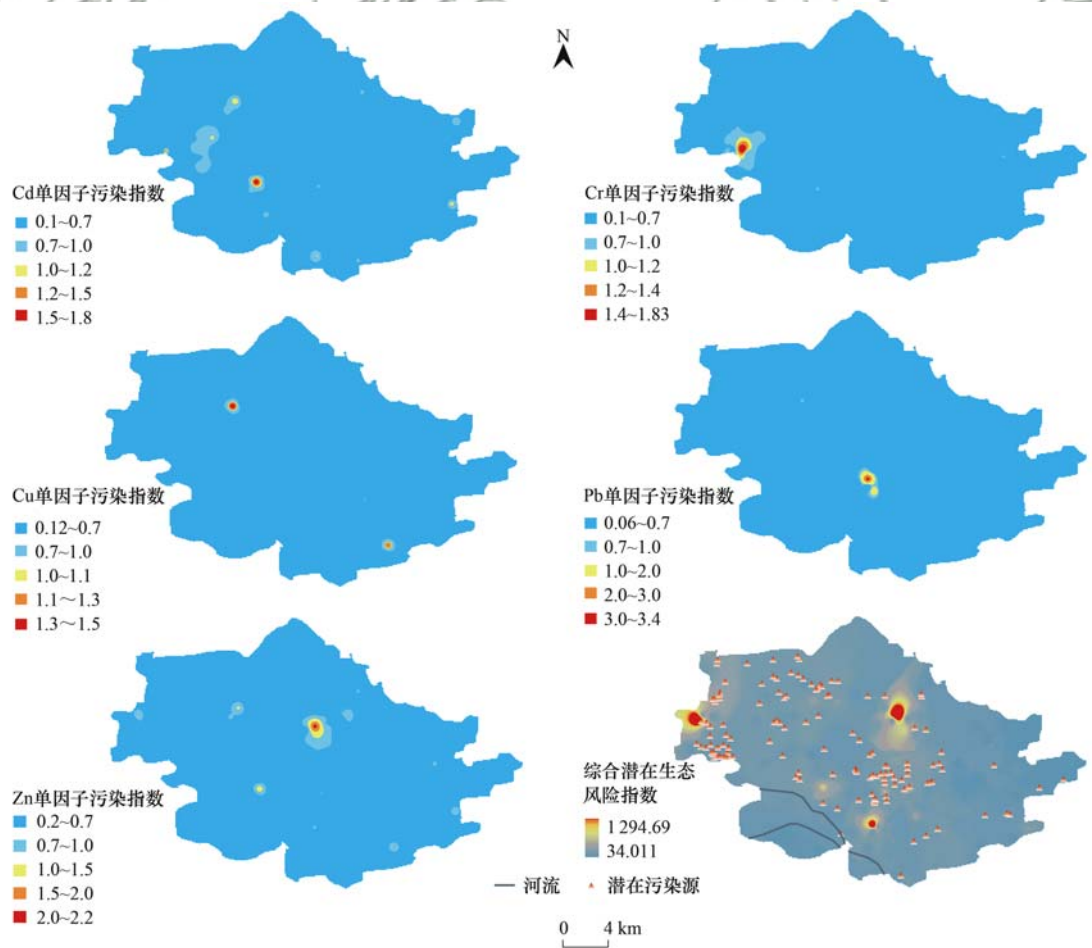


图6 研究区农田土壤污染单因子指数和综合潜在生态风险空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of signal pollution index and potential ecological risk in study area

耕休耕等,降低农产品超标风险.种植重金属低累积作物品种,利用作物对重金属低累积特性,减少土壤中重金属向农产品籽粒中转移,或向土壤中添加钝化材料,降低土壤重金属活性,减少其向植物体内迁移.同时建立农产品质量安全检测制度,每年开展农产品质量抽样检测,及时掌握土壤质量和农产品质量状况.

4 结论

研究区受化工、农药、机械装备等企业聚集、地质背景、历史污灌区和大气沉降等影响,农田土壤中重金属部分点位 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 超标,其中 Cd 最为严重,存在中等强度生态风险,并进一步向作物中转移,小麦存在 Cd 和 Pb 超标点位,且玉米存在 Cd 超标点位,但通过健康风险评价,食用研究区玉米对人体没有产生明显的负面影响,食用研究区小麦对人体产生负面影响的可能性较大.结合 PMF 源解析和空间分析结果,重金属 As 和 Ni 受土壤母质影响,大部分土壤 As 和 Ni 含量低于土壤环境背景值;受历史污灌和工业生产厂的分布影响,Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 主要分布在研究区中部、西部和南部,浚河沿岸附近 Cd 含量较高;受大气沉降的影响,Hg 主要聚集在研究区西北部.研究区北部和东部土壤重金属含量较低,划分为优先保护类土壤,西部、中部和南部部分点位重金属含量超标,划分为安全利用类.针对安全利用类土壤,应严控污染物的输入,采用农艺调控等措施,减少重金属向农作物的转移,降低食品安全健康风险.

参考文献:

- [1] Chen Y F, Li X D, Liu Y. Increasing China's agricultural labor productivity: comparison and policy implications from major agrarian countries[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, **9**(6): 575-584.
- [2] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 900-908.
Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 900-908.
- [3] Wang X, Cui Y X, Zhang X C, *et al.* A novel extracellular enzyme stoichiometry method to evaluate soil heavy metal contamination: evidence derived from microbial metabolic limitation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139709.
- [4] López J J, Echeverría J, Martín I S, *et al.* Dynamic testing in columns for soil heavy metal removal for a car park SUDS[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140229.
- [5] 王冕. 栾城农田大气氨影响因素分析及减排措施研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- Wang M. Analysis of factors affecting atmospheric ammonia in Luancheng farmland and study on emission reduction measures [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2019.
- [6] 全国土壤污染状况调查公报[J]. *中国环保产业*, 2014, (5): 10-11.
- [7] 周淑梅, 武菁, 王国贞. 华北平原农田生态系统服务评价及灌溉效益分析[J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(9): 1360-1370.
Zhou S M, Wu J, Wang G Z. Evaluation of agro-ecosystem services and analysis of irrigation benefit in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(9): 1360-1370.
- [8] 陈兆进, 李英军, 邵洋, 等. 新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2889-2897.
Chen Z J, Li Y J, Shao Y, *et al.* Bacterial community composition in cadmium-contaminated soils in Xinxiang city and its ability to reduce cadmium bioaccumulation in Pak Choi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2889-2897.
- [9] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(8): 1498-1506.
Yao R J, Yang J S, Xie W P, *et al.* Accumulation and potential ecological risk assessment of heavy metals in greenhouse soils from coastal area of Jiangsu Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(8): 1498-1506.
- [10] National Research Council, Committee on Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants. Science and judgment in risk assessment[M]. Washington: National Academies Press, 1994, 308.
- [11] 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.
- [12] 崔祥芬, 张琴, 田森林, 等. 中国稻田土壤镉污染及务农性暴露概率风险[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(8): 3878-3886.
Cui X F, Zhang Q, Tian S L, *et al.* Status of paddy soil Cd pollution and probabilistic health risk via agricultural contact in China[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8): 3878-3886.
- [13] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [14] Muller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine river[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**: 108-118.
- [15] 贾振邦, 周华, 赵智杰, 等. 应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, **36**(4): 525-530.
Jia Z B, Zhou H, Zhao Z J, *et al.* The application of the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in sediments in the Benxi section of the Taizi river [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, **36**(4): 525-530.
- [16] 郭威, 殷淑华, 徐建新, 等. 三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3333-3339.
Guo W, Yin S H, Xu J X, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of vanadium in sediments of the three gorges reservoir (Chongqing-Yichang section) [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3333-3339.

- [17] 刘灵飞, 龙健, 万洪富, 等. 贵州喀斯特山区铅冶炼厂对农业土壤污染特征的影响及风险评价[J]. 土壤, 2013, **45**(6): 1036-1047.
Liu L F, Long J, Wan H F, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in agricultural soils in an abandoned antimony smelter in Guizhou Karst areas[J]. Soils, 2013, **45**(6): 1036-1047.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [19] 沈城, 刘馥雯, 吴健, 等. 再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5125-5132.
Shen C, Liu F W, Wu J, *et al.* Distribution and ecological risk of heavy metals in the soil of redevelopment industrial sites[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5125-5132.
- [20] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地学前缘, 2021, **28**(4): 238-249.
Zhang S R, Wang C Y, Liu J H, *et al.* Assessments of heavy metal pollution in soils of the southwestern Xiong'an District and its ecological risk[J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(4): 238-249.
- [21] 熊佳, 韩志伟, 吴攀, 等. 独山铅冶炼厂周边土壤铅砷空间分布特征、污染评价及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 655-664.
Xiong J, Han Z W, Wu P, *et al.* Spatial distribution characteristics, contamination evaluation and health risk assessment of arsenic and antimony in soil around an antimony smelter of Dushan County[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 655-664.
- [22] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [23] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2086-2094.
Yu Z, Chen F, Zhang J F, *et al.* Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- [24] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [25] 于冬梅, 赵丽云, 赵文华. 中国成人谷类和膳食纤维摄入现状与趋势(1982-2015)[J]. Nutrition Reviews, 2020, **78**(S1): 41-50.
- [26] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [27] 陈雪, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 基于 GIS 和 PMF 的铜仁植烟土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2022, **41**(4): 794-801.
Chen X, Liu H Y, Wu P, *et al.* Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in tobacco-planting soils in southwest China based on GIS and PMF methods[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, **41**(4): 794-801.
- [28] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2719-2731.
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [29] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. PMF 模型解析土壤重金属来源的不确定性[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(2): 716-725.
Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Uncertainty analysis of soil heavy metal source apportionment by PMF model[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(2): 716-725.
- [30] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 1018-1027.
Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [31] 段友春. 基于 GIS 的鲁东南典型丘陵平原区农田土壤养分空间变异特征及影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(23): 61-68.
Duan Y C. Spatial variability characteristics and influencing factors of soil nutrients in farmland in typical hilly and plain area of southeast Shandong[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(23): 61-68.
- [32] 王诚煜, 李玉超, 于成广, 等. 葫芦岛东北部土壤重金属分布特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 5227-5236.
Wang C Y, Li Y C, Yu C G, *et al.* Distribution characteristics and sources of soil heavy metals in soils in the area of northeastern Huludao City[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(11): 5227-5236.
- [33] 崔那涛, 梁文楼, 石少坚, 等. 石家庄污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 地球与环境, 2010, **38**(1): 36-42.
Cui X T, Luan W L, Shi S J, *et al.* Soil heavy metal pollution assessment in the sewage irrigation region of Shijiazhuang city[J]. Earth and Environment, 2010, **38**(1): 36-42.
- [34] 茹淑华, 张国印, 王凌, 等. 河北省典型污灌区土壤和植物重金属累积特征研究[J]. 河北农业科学, 2008, **12**(10): 78-81.
Ru S H, Zhang G Y, Wang L, *et al.* Characteristics of heavy metals accumulation in soil and crops in typical sewage irrigation area of Hebei province[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, **12**(10): 78-81.
- [35] 魏敬池. 滦河流域地表水质与地下水水质污染研究[J]. 河北工业科技, 2014, **31**(5): 407-411.
Wei J C. Study of surface water and underground water pollution in the Xiao River basin[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2014, **31**(5): 407-411.
- [36] 齐雁冰, 楚万林, 蒲洁, 等. 陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属累积特征及评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1453-1460.
Qi Y B, Chu W L, Pu J, *et al.* Accumulation characteristics and evaluation of heavy metals in soil-crop system affected by wastewater irrigation around a chemical factory in Shenmu county[J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1453-1460.
- [37] 郭亮. 搬迁后的涂料企业污染场地土壤中重金属分布规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Guo L. Study on distribution of heavy metals in contaminated sites after the removal of the coating factory[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [38] 宋永伟, 周立祥, 刘奋武. 生物沥浸对精对苯二甲酸化工污泥脱水性能的提高及其重金属脱除效果[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(10): 2455-2460.
Song Y W, Zhou L X, Liu F W. Removal of heavy metals and dewaterability of pure terephthalic acid sludge facilitated by bioleaching[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(10): 2455-2460.
- [39] Dinu C, Vasile G G, Buleandra M, *et al.* Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants

- grown in a mining-contaminated soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(4): 2141-2154.
- [40] 焦位雄, 杨虎德, 冯丹妮, 等. Cd Hg Pb 胁迫下不同作物可食部分重金属含量及累积特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(9): 1726-1733.
- Jiao W X, Yang H D, Feng D N, *et al.* Heavy metal content and accumulation characteristics in the edible parts of different crops under Cd, Hg, and Pb stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1726-1733.
- [41] 秦越华, 强承魁, 曹丹, 等. 徐州市典型稻区土壤和稻米重金属含量及健康风险评价 [J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(9): 1546-1554.
- Qin Y H, Qiang C K, Cao D, *et al.* Contents and health risk assessment of heavy metals in soils and rice grains from typical rice-growing region of Xuzhou City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(9): 1546-1554.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

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)