

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

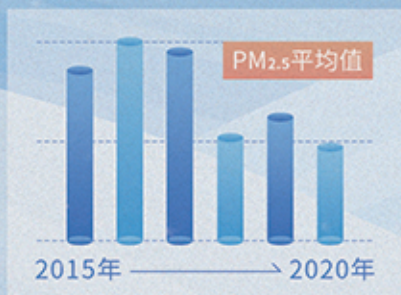
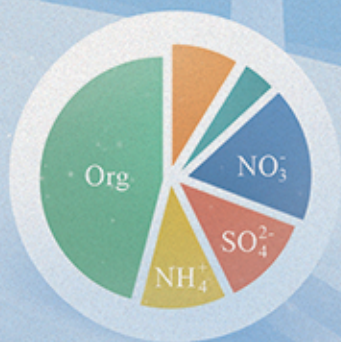
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测

杨阳¹, 李艳玲², 牛硕³, 陈卫平^{1*}, 王天齐¹, 王美娥¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津市疏浚工程技术有限公司重点实验室, 天津 300457; 3. 郑州大学河南先进技术研究院, 郑州 450003)

摘要: 系统分析重金属铅(Pb)在“源-土壤-小麦”传输途径中的累积特征是小麦 Pb 污染防治的关键. 以河南省济源市为例, 在区域调查的基础上, 耦合正定矩阵因子分解法、Freundlich 回归方程和 Monte Carlo 随机模拟方法, 构建特定源风险评估模型(SRAM), 预测不同场景下小麦籽粒 Pb 累积风险, 并结合空间分析方法对区域污染防治措施进行评估和优化. 结果表明, 大气沉降和磷肥应用是区域农田土壤 Pb 污染的主要来源, 贡献了小麦籽粒 Pb 超标累积的 29.0%. 土壤 pH 和阳离子交换量(CEC)是影响小麦籽粒 Pb 累积的关键土壤因子. 在受大气污染影响显著的高风险区域(研究区西北和西部), 通过相关措施提升土壤阳离子交换量($\sim 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)可将大气沉降源导致小麦籽粒 Pb 超标风险从 10.5% 显著降低至 2.39%.

关键词: 小麦籽粒; Pb 累积风险; 传输途径评估; 随机模拟; 源解析; 正定矩阵因子分解法(PMF)

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4212-07 DOI: 10.13227/j.hjks.202112223

Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model

YANG Yang¹, LI Yan-ling², NIU Shuo³, CHEN Wei-ping^{1*}, WANG Tian-qi¹, WANG Mei-e¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300457, China; 3. Henan Institutes of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Characterizing the lead (Pb) transfer in the “source-soil-wheat” chain is of great importance for the prevention and control of the Pb accumulation risk in wheat grain harvested from the croplands of China. In this study, we used the Jiyuan City, northern China, as a case study to investigate the influence of contamination sources and soil factors on the accumulation of Pb in wheat grain. A site-specific source risk assessment model (SRAM), coupling the positive matrix factorization model, Freundlich-type function, and the Monte Carlo simulation method, was developed to estimate the risk of Pb accumulation in wheat grain harvested from different scenarios. Based on the results of the spatial analysis, the effectiveness and potential risk of the control measures applied in the study area was also evaluated. Atmospheric deposition and phosphate fertilizer application were identified as major sources contributing to 29.0% of the Pb accumulations in wheat grain. Soil pH and cation-exchange capacity (CEC) were the primary causative factors affecting the Pb accumulation in wheat grain. Cropping wheat in the high Pb continuation risk areas (western and northwestern areas) of Jiyuan City caused a 10.5% likelihood of Pb to accumulate above the China food standard limit of $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW). This risk was significantly decreased to 2.39% when the CEC levels of affected soils was improved to $20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ and above.

Key words: wheat grain; lead accumulation risk; transfer evaluation; stochastic simulation; source apportionment; positive matrix factorization(PMF)

重金属铅(Pb)是生物体非必需元素^[1,2], 其毒性大, 迁移性强, 且易在小麦籽粒中富集^[3-5]. 经食用小麦进入人体的 Pb 会在肾脏、肝脏等器官累积, 引发高血压、骨质疏松和肾功能衰竭等多种疾病^[6-8]. 近 20 年来小麦 Pb 污染事件在北美^[9]、欧洲^[5,10] 和我国^[11] 等地均有报道^[9-11], 对人体健康造成严重威胁. 当前我国市售小麦 Pb 超标率在 10% 左右, 对我国人群 Pb 暴露风险的估算显示小麦是北方人群 Pb 摄入的主要来源(贡献率约为 15%)^[11]. 明晰土壤-小麦系统 Pb 迁移机制是保障粮食质量安全的关键.

小麦 Pb 累积受到不同污染源、土壤 pH、土壤有机质、土壤氧化还原电位和阳离子交换量等诸多因素影响^[4,12-14]. Li 等^[15] 指出我国中部地区某矿区周边 71.4% 的小麦 Pb 来源于大气沉降. Xing 等^[16] 指出磷肥施用贡献 5.41%~21.5% 的小麦 Pb 累积.

Wu 等^[17] 研究了我国 18 种类型土壤生产的小麦籽粒 Pb 的累积特征, 指出 pH 和土壤总 Pb 可以解释小麦 Pb 累积的 83.8%. 综合评估 Pb 在源-土壤-小麦系统的迁移过程和累积趋势有助于风险决策的科学性和合理性.

济源为我国北方小麦主产地之一, 同时也是亚洲最大的铅锌深加工基地, 2017 年全市铅产量 $1.12 \times 10^6 \text{ t}$, 占全国的 24%^[15,16]. 近年来的小麦籽粒 Pb 污染事件对该地农业生产造成了较大经济损失, 其小麦质量安全受到当地政府部门和民众的广泛关注^[18,19]. 本研究基于在济源的区域调查, 应用受体

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2021-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907353); 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室项目(SKLURE2020-2-5)

作者简介: 杨阳(1990~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为生态风险评估, E-mail: yyang@cees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

模型和多元分析阐明土壤-小麦系统 Pb 污染来源, 识别小麦籽粒 Pb 累积关键影响因子. 在此基础上构建特定源风险评估模型, 量化不同输入源对小麦籽粒 Pb 累积的影响程度, 以期为当地小麦 Pb 污染防治和民众健康防护提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于华北地区西部, 河南省西北部(东经 $112^{\circ}30' \sim 112^{\circ}45'$, 北纬 $35^{\circ}00' \sim 35^{\circ}10'$; 图 1), 总面积 363 km^2 , 总人口 67.6 万, 属暖温带季风气候, 土壤类型为褐土和潮土. 根据区域土地利用格局, 农田、工矿企业分布特点进行野外实地考察和样点布设, 采样点分布如图 1 所示.

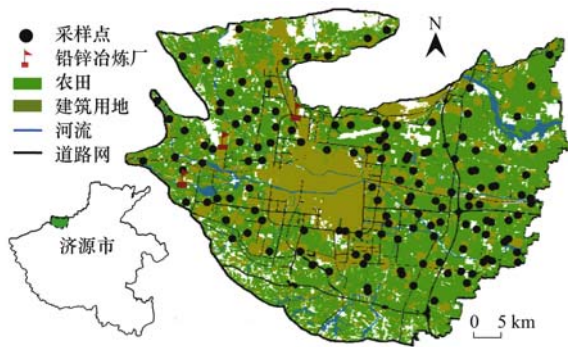


图 1 研究区土地利用概况及采样点分布示意

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

在每个小麦田随机布设 2~3 个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的样方, 采集 5~10 株完整小麦, 密封保存于样品袋中. 在每个小麦采样点同时采集表层土壤混合样品 1 份 (500 g, 采样深度 0~20 cm), 共采集 143 组土壤-小麦配对样品. 同时在距离农田和工矿企业较远的山区采集 10 个表层土壤混合样品 (每份 500 g, 采样深度 0~20 cm) 作为对照样品.

所有样品密封后带回实验室于阴凉处室温风干. 土壤样品经研磨后过孔径 0.15 mm (100 目) 尼龙筛, 密封保存用于测定土壤 pH, 有机质含量 (SOM), 阳离子交换量 (CEC) 等土壤基本性质, 分析方法参见文献 [20]. 应用 DTPA 提取剂 ($0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTPA- $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 - $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ TEA, $\text{pH} = 7.3$, 固液比 1:2) 浸提土壤有效态 Pb 含量 [5]. 应用四酸法 (HCl - HNO_3 - HF - HClO_4) 消解土壤样品 [19]. 小麦样品经自来水冲洗后将麦穗剪下, 再用去离子水清洗后于 105°C 下杀青 30 min, 60°C 烘至恒重, 脱壳后粉碎, 应用 HNO_3 - HClO_4 法消解小麦籽粒样品 [18].

应用 ICP-OES (Optima 8300; PerkinElmer, USA) 测定样品 K、Na、P、Cu 和 Zn 含量, 应用 ICP-MS (NexION 300; PerkinElmer, USA) 测定样品 Pb、

Cd、Cr 和 Ni 含量. 测定过程中采用国家标准物质 GSS-13 (华北地区土壤) 和 GSB-24 (华北地区小麦) 对土壤和植物进行质量控制, 测得标准回收率为 83.5%~108%. 区域土壤基本理化性质和土壤-小麦系统铅含量见表 1. 土壤 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{P})$ 和 $\omega(\text{K})$ 分别为 (1.37 ± 1.79) 、 (28.6 ± 6.78) 、 (84 ± 28.7) 、 (52.3 ± 7.57) 、 (25.9 ± 4.18) 、 (763 ± 219) 和 $(18\,650 \pm 2\,333) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 源识别模型

污染源识别与各类源贡献大小量化过程有助于小麦籽粒 Pb 污染治理工作的针对性展开. 在源解析受体模型中, 正定矩阵因子分析法 (PMF) 着眼于排放源对区域环境的影响并可将样本有效分解为源贡献矩阵 ($\mathbf{G}$) 和源成分谱矩阵 ($\mathbf{F}$) [21], 广泛应用于大气、土壤和沉积物污染物源解析研究中 [13, 19]. 其基本方程为:

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}_{ij}$ 表示元素 j 在第 i 个样点的含量; $\mathbf{g}_{ik}$ 表示 k 源在第 i 个样点的贡献, 即源贡献矩阵 ($\mathbf{G}$); $\mathbf{f}_{kj}$ 表示源 k 对元素 j 的贡献, 即源成分谱矩阵 ($\mathbf{F}$); $\mathbf{e}_{ij}$ 表示残差矩阵.

PMF 模型应用 Multilinear engine-2 算法进行多次迭代, 不断地分解原始矩阵 $\mathbf{x}$, 来得到源贡献矩阵 ($\mathbf{G}$) 和源成分谱矩阵 ($\mathbf{F}$), 使得到的目标函数 Q 达到最小值 [22]. 目标函数 Q 为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\mathbf{e}_{ij}/\mathbf{u}_{ij})^2 \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}_{ij}$ 表示元素 j 在第 i 个样点的不确定度.

依据 PMF 模型源解析结果, 各污染源在每个样点对土壤 Pb 的贡献如下:

$$X_i^k = C_i^k \times X_i \quad (3)$$

式中, X_i^k 表示 k 源在第 i 个样点对土壤 Pb 含量的绝对贡献量; C_i^k 表示 k 源在第 i 个样点对土壤 Pb 含量的贡献率; X_i 表示在第 i 个样点土壤 Pb 含量.

土壤-小麦系统 Pb 转运特征可应用 Freundlich-extend 方程 [17, 18] 进行表征:

$$\lg[C_i^w] = \alpha_0 + \alpha_1 \text{pH}_i + \alpha_2 \lg(X_i) + \sum \alpha_i \lg(S_i) \quad (4)$$

式中, C_i^w 表示第 i 个样点小麦籽粒 Pb 含量; S_i 表示土壤基础理化性质, $\alpha (i=0, 1, 2, 3, \dots, n)$ 表示方程拟合参数. 方程拟合结果依据均方根误差 (RMSE) 和方差进行评估 [12].

将源解析模型 [公式 (1)~(3)] 和 Freundlich-extend 回归模型 [公式 (4)] 相结合, 构建特定源风

险评估模型,用于预测源 k 对小麦籽粒 Pb 累积量的贡献:

$$C_i^w = 10^{\alpha_0 + \alpha_1 \times \text{pH} + \alpha_2 \times \lg(C_i^f \times X_i) + \sum \alpha_j \lg(S_j)} \quad (5)$$

考虑到土壤-农作物系统重金属累积的随机性和不确定性^[23,24],本研究在定量分析的基础上应用 Monte Carlo 模拟对小麦 Pb 累积关键参数进行抽样^[18,24],并将其代入方程揭示不同污染源不同土壤环境下小麦 Pb 累积趋势,提高风险决策的合理性和科学性.

1.3 数据分析

数据统计、相关分析和聚类分析采用 SPSS 23.0 软件实现.空间分析采用 ArcGIS 10.2 软件.受体模型源解析分析采用 USEPA 开发的 PMF 5.0 软件实现. Gaussian 分布方程拟合和 Monte Carlo 模拟通过 Matlab R2018a 软件实现,10 000次模拟时结果趋于稳定.

2 结果与讨论

2.1 土壤-小麦系统铅富集特征

研究区土壤 pH 平均值为 7.70,整体变幅较小,属碱性土壤(表 1).区域土壤-小麦系统 Pb 含量特征如表 1 所示.区域土壤总 Pb 含量变幅较大(35.8 ~ 379 mg·kg⁻¹),变异系数(CV)为 67.9%,存在显著的人类活动影响^[13,14].土壤 $\omega(\text{Pb})$ 平均值为 (89.1 ± 60.5) mg·kg⁻¹,是区域土壤 Pb 背景值

[(31.4 ± 10.9) mg·kg⁻¹,表 1] 的 2.61 倍,43.4% 的土壤样品 $\omega(\text{Pb})$ 高于国家土壤环境质量标准(80 mg·kg⁻¹; GB 15618-2018)^[25].区域土壤 $\omega(\text{有效态 Pb})$ (DTPA 提取态)范围为 1.24 ~ 132 mg·kg⁻¹,平均值为 21.7 mg·kg⁻¹(表 1).土壤 Pb 可利用系数(AR,有效态 Pb 含量/土壤总 Pb 含量)平均值为 18.8%,显著高于我国其他矿区周边农田土壤 Pb 可利用系数(9.21%)^[2],说明 Pb 在区域小麦土壤中的迁移能力和淋滤风险较高.

研究区小麦籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 范围为 0.02 ~ 0.42 mg·kg⁻¹(以 DW 计,下同)(表 1),小麦 $\omega(\text{Pb})$ 平均值为 0.177 mg·kg⁻¹,44.2% 的小麦籽粒 Pb 含量超过我国小麦籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 限定值(0.2 mg·kg⁻¹)^[26].生物富集因子(BCF)可表征农作物吸收和积累重金属的能力^[1,12].区域小麦 Pb 富集因子(BCF-Pb)平均值为 0.002 5 ± 0.002 3.应用 Gaussian 分布方程对区域小麦田 BCF-Pb 进行拟合,拟合结果显著($P < 0.001$),可决系数高达 0.97(图 2),可见区域 BCF-Pb 服从自然对数正态分布^[27].应用 Gaussian 分布方程进一步对我国小麦 BCF-Pb 进行拟合,结果显示美国小麦 BCF-Pb(平均值为 0.002)^[28] 和我国小麦(平均值为 0.003)^[27] 累积分布特征(对数正态分布)与本研究结果较为一致(图 2).可见区域小麦田 BCF-Pb 在风险评估中较为典型,并可对其它地区小麦 Pb 累积研究提供一定参考.

表 1 土壤理化性质及土壤-小麦系统 Pb 含量变化特征

Table 1 Physico-chemical properties of investigated wheat soils and the lead concentrations in the soil-wheat system									
项目	土壤 pH	$\omega(\text{有机质})$ /mg·kg ⁻¹	阳离子交换量 /mg·kg ⁻¹	区域土壤 $\omega(\text{Pb})$ /mg·kg ⁻¹	背景土壤 $\omega(\text{Pb})$ /mg·kg ⁻¹	DTPA 提取 $\omega(\text{Pb})$ /mg·kg ⁻¹	小麦 $\omega(\text{Pb})$ /mg·kg ⁻¹	土壤 Pb 可利 用系数(AR)/%	小麦 Pb 富集 因子(BCF)
最小值	6.07	7.47	5.52	35.8	23.1	1.24	0.02	5.40	0.000 415
最大值	8.37	157	23	379	58.5	132	0.42	42.4	0.013 6
平均值	7.70	28.9	15.5	89.1	31.4	21.7	0.177	18.8	0.002 47
标准差	0.40	15.9	5.01	60.5	10.9	22.6	0.102	0.810	0.002 31
变异系数/%	2.99	55	32.4	67.9	34.7	104	57.6	41.9	93.4

2.2 源解析

应用 PMF 源解析模型对区域农田土壤 Pb 来源进行解析.综合考虑模型信噪比(S/N), Q 值和 r^2 等观测值^[22],本例中 PMF 解析因子数量为 4,迭代计算次数为 20 次,各元素预测精度均较高(r^2 为 0.45 ~ 1.00).由图 3 可知,因子 1(F1)为区域小麦土壤 Pb 主要输入源,贡献率占到一半以上(52.0%).Qiu 等^[7]指出研究区冶炼厂周边大气沉降 Pb 通量高达 88.8 mg·(m²·month)⁻¹.Li 等^[15]指出研究区 Pb 沉降通量随着与冶炼厂距离的增加而减少.空间分析显示区域土壤 Pb 高值区集中分布在研究区西北和西部毗邻冶炼厂的区域(图 4).区域土壤 Pb 含量从西北到东南呈逐渐降低趋势,与当地盛行风向(西

风)基本一致(图 4).综上可知 F1 代表区域工业活动产生的大气沉降源.

因子 2(F2)主要载荷元素为 Pb(21.1%)、Cu(44.9%)、Zn(41.4%)、Cr(57.6%)、Ni(59.3%)和 K(53.5%)(图 3).土壤 Cr 和 Ni 直接或间接来源于地壳分化,常被用来代表土壤母质源^[3,8].研究区土壤 Cr 和 Ni 平均含量分别为 52.3 和 25.7 mg·kg⁻¹,低于河南省土壤背景值^[29].变异系数较低,分别为 14.5%、16.2%,说明研究区土壤 Cr 和 Ni 受人类活动影响较少.因此 F2 代表土壤母质源.因子 3(F3)主要载荷元素为 Pb(19.3%)和 P(59.2%)(图 3).农田土壤 P 受磷肥、农药等影响较大,在源解析中常用来代表农业活动源^[13,14].研究区磷肥施用量较

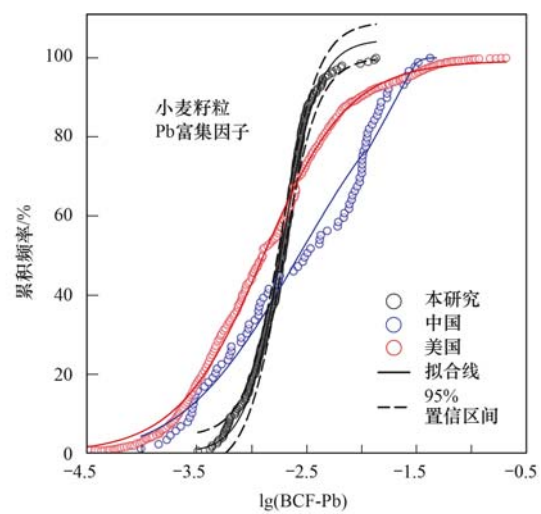


图2 小麦 Pb 富集因子 (BCF-Pb) 累积分布特征

中国和美国小麦 Pb 富集因子数据分别来自文献[27]和文献[28]; 小麦 BCF-Pb 累积分布应用 Gaussian 分布方程进行拟合, 其拟合方程为: $F(x) = 0.5 + 0.5 \times \text{erf}[(x - x_0)/b\sqrt{2}]$, 式中, $F(x)$ 表示 $\text{BCF} \leq x$ 时的累积概率, x_0 和 b 表示观测值的平均值和标准差, erf 为误差函数

Fig. 2 Cumulative probability distributions of the Pb BCF for wheat

高 ($62.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). Chen 等^[30]指出我国北方小麦田所用磷肥 Pb 含量较高, 施用 $50 \sim 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的磷肥会增加小麦土壤 18.6% 的 Pb 累积. 因此 F3 代表农业活动源.

因子 4 (F4) 对 Pb 贡献较小 (7.64%), 但对 Cd 贡献最为显著 (54.1%) (图 3). Qiu 等^[7]等指出研究区冶炼厂附近石河 (蟒河流域上游) 底泥存在严重的 Cd 污染现象. Li 等^[19]指出研究区土壤 Cd 空间分布特征与污染河流流向较为一致. 因此, F4 代表污水灌溉源. 受体模型与传统多元分析方法的联用有助于准确揭示区域农田土壤 Pb 时空变异及来源变化.

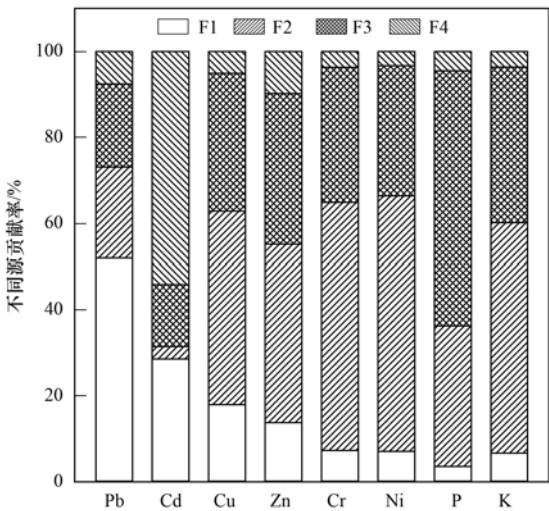


图3 区域农田土壤重金属不同污染源贡献率

Fig. 3 Factor profiles of trace elements in the investigated wheat soils

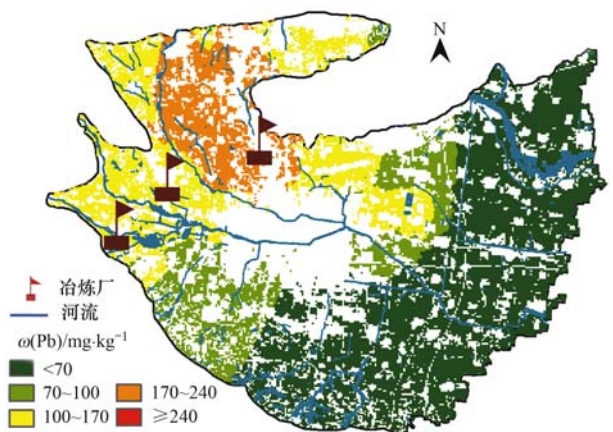
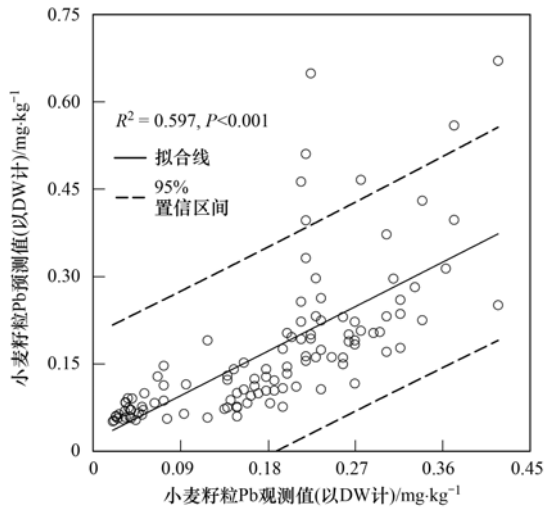


图4 区域农田土壤 Pb 空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of total Pb concentrations in the investigated wheat soils

2.3 影响因子识别

回归分析显示区域土壤 Pb 含量, 土壤 pH 和阳离子交换量 (CEC) 是影响小麦 Pb 累积的关键因子 (图 5). 区域土壤 pH 与 DTPA-Pb ($r = -0.397^{**}$) 和小麦籽粒 Pb 含量 ($r = -0.573^{**}$) 呈显著负相关. H^+ 易与被粘土、胶体及有机质颗粒等表面吸附的交换态 Pb^{2+} 发生离子交换^[1], 致使土壤 Pb^{2+} 活性增强, 进而被小麦吸收^[5,17]. 与土壤 pH 相比, 土壤 CEC 对小麦 Pb 累积影响更为显著 ($r = -0.559^{**}$). 在碱性小麦土壤中, 较高水平的阳离子交换量 (CEC) 会增加农田土壤中 Pb 的持留量, 从而减少作物对 Pb 的吸收^[4,12]. 土壤有机质、P、K 和 Zn 与土壤 pH 和 CEC 相关关系显著 (r 为 $-0.413^{**} \sim 0.398^{**}$), 可见以上因子对小麦 Pb 累积的影响主要是通过其对土壤 pH 和 CEC 的间接效应实现.



拟合公式: $C^w = 10^{[-0.017 - 0.135 \times \text{pH} + 0.737 \times \lg(X) - 1.02 \times \lg(\text{CEC})]}$, 式中, C^w 表示小麦籽粒 Pb 含量, X 表示土壤 Pb 含量

图5 小麦籽粒 Pb 含量预测值和观测值相关关系

Fig. 5 Relationship between the measured and predicted concentrations of Pb in the wheat grain

应用多元逐步回归方法对 Freundlich-extend 方程进行拟合. 由图 5 可知, 推导的转移方程可解释 Pb 在小麦籽粒中累积程度的 59.7%, 预测值多位于 95% 置信区间内, 拟合结果较好. 应用推导方程对小麦籽粒 Pb 含量进行预测, 结果显示小麦籽粒 Pb 含量随土壤 Pb 含量的增加而增加 ($\alpha_2 = 0.737$), 随土壤 pH 和 CEC 的增加而减小 ($\alpha_1 = -0.135$, $\alpha_3 = -1.02$; 图 5). 应用 Monte Carlo 模拟对小麦籽粒 Pb 累积量进行进一步的风险分析, 结果显示在受区域人为活动影响较小的山区 [土壤 $\omega(\text{Pb})$ 为 $(31.4 \pm$

$10.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表 1] 和无污染区域 [土壤 $\omega(\text{Pb}) < 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; GB 15618-2018]^[25] 收获的小麦籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 分别为 $(0.093 \pm 0.035) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.124 \pm 0.0497) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过我国小麦籽粒 Pb 含量限定值^[26] ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的风险概率分别为 1.88% 和 6.99% [图 6(a)]. 当土壤 Pb 含量上升到区域水平时 [$(89.1 \pm 60.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表 1], 该超标风险显著上升到 30.9% [图 6(a)]. 在研究区 Pb 污染高风险区 (西北和西部区域, 图 4) 进行的农业活动应引起当地政府部门和民众的足够重视.

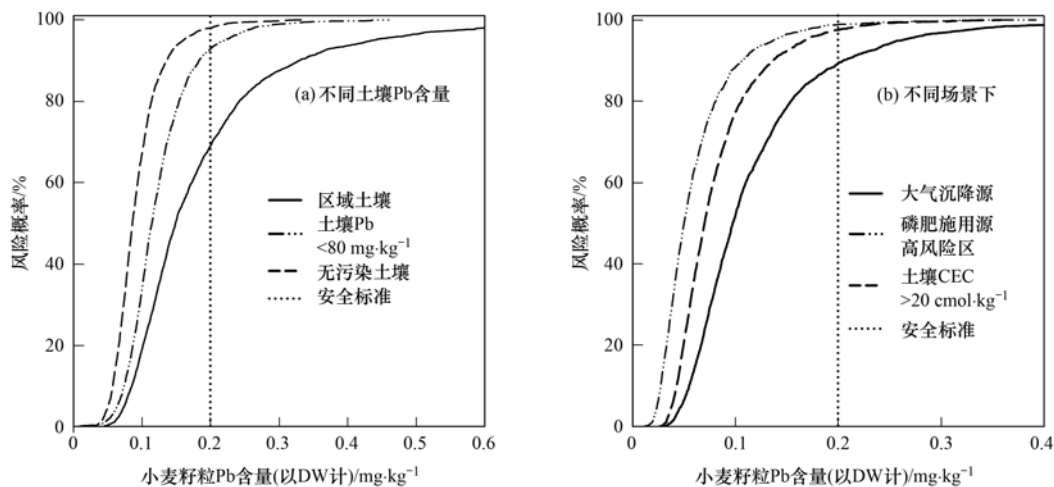


图 6 区域小麦籽粒 Pb 含量预测

Fig. 6 Estimated Pb concentrations in wheat grain harvested from different soils

2.4 风险评估

耦合 PMF 源解析结果和土壤-小麦 Pb 转移方程, 将小麦 Pb 累积方程转变为特定源风险评估模型, 并应用 Monte Carlo 模拟对结果进行不确定性分析^[31,32]. 由图 6(b) 可知, 由大气沉降源 (F1, 图 3) 造成的区域小麦籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 为 $(0.118 \pm 0.0724) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 DW 计), 超过我国小麦籽粒 Pb 含量限定值^[26] ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的风险概率为 10.5%. 由磷肥输入源 (F4, 图 3) 造成的区域小麦籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 为 $(0.0605 \pm 0.0384) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相应的小麦籽粒 Pb 超标风险为 1.06% [图 6(b)]. 由这两个污染源共同造成的小麦籽粒 Pb 超标风险为 29.0%, 针对重点污染源的区域性管控是降低小麦 Pb 污染的关键.

近年来, 当地政府采取了诸如设立减排目标、关闭重污染企业等手段以降低大气沉降对土壤 Pb 污染的影响^[33,34]. 然而, 在符合我国小麦 Pb 安全质量标准^[26] ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的情况下, 种植小麦产生的 Pb 年输出通量为 $110 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著低于我国农田土壤年均 Pb 沉降通量 ($202 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[35,36]. 即使不考虑灌溉水和肥料等 Pb 输入途径, 区域小麦籽粒 Pb 累积趋势在短期内仍然难以逆转. 而在受大气沉降影响显著的高风险区域 (研究区西北和西部,

图 4), 通过增施绿肥、叶面微肥和推广免耕等技术手段^[37~41] 提升土壤阳离子交换量至 $20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 可将这些区域的小麦籽粒 Pb 超标风险从 10.5% 显著降低至 2.39% [图 6(b)]. 优化区域冶炼企业布局, 加快技术升级, 清洁灌溉水等针对不同风险区域的管控措施可进一步降低区域小麦籽粒 Pb 累积风险. 土壤环境、气候因子和耕作管理水平不同会加剧土壤-小麦系统 Pb 累积的空间变异^[42~45]. 区域调查、系统分析和随机模拟的联合应用有助于降低模型预测的不确定性, 实现对区域小麦 Pb 污染风险的精准评估和有效管控.

3 结论

济源土壤-小麦系统 Pb 累积风险较高, 小麦 Pb 富集因子 (BCF) 对其他地区小麦 Pb 污染风险评估有一定参考作用. 大气沉降和磷肥施用是区域农田土壤 Pb 污染的主要来源, 其中大气输入源对小麦籽粒 Pb 累积风险的贡献率随区域环境不同而变化明显. 多场景模拟结果显示优化工矿企业布局, 清洁灌溉水等“一区一策”的措施应用可有效降低区域小麦籽粒 Pb 累积风险. 本研究构建的特定污染源农作物重金属累积风险评估模型有助于在区域尺度上进

行源头管控与消减,提升小麦籽粒 Pb 污染防治的针对性,对其他用地类型的重金属污染修复也有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] McBride M B, Shayler H A, Splithoff H M, *et al.* Concentrations of lead, cadmium and barium in urban garden-grown vegetables; the impact of soil variables[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **194**: 254-261.
- [2] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123289.
- [3] Zhang Y H, Hou D Y, O'Connor D, *et al.* Lead contamination in Chinese surface soils: source identification, spatial-temporal distribution and associated health risks[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, **49** (15): 1386-1423.
- [4] Uchimiya M, Bannon D, Nakanishi H, *et al.* Chemical speciation, plant uptake, and toxicity of heavy metals in agricultural soils [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, **68**(46): 12856-12869.
- [5] Khan S, Naushad M, Lima E C, *et al.* Global soil pollution by toxic elements: current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies-a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **417**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126039.
- [6] Romero-Freire A, Martin Peinado F J, van Gestel C A M. Effect of soil properties on the toxicity of Pb: assessment of the appropriateness of guideline values [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **289**: 46-53.
- [7] Qiu K Y, Xing W Q, Scheckel K G, *et al.* Temporal and seasonal variations of As, Cd and Pb atmospheric deposition flux in the vicinity of lead smelters in Jiyuan, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, **7**(1): 170-179.
- [8] Yang S Y, He M J, Zhi Y Y, *et al.* An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities [J]. *Environment International*, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105239.
- [9] Gavelek A, Spungen J, Hoffman-Pennesi D, *et al.* Lead exposures in older children (males and females 7-17 years), women of childbearing age (females 16-49 years) and adults (males and females 18 + years): FDA total diet study 2014-16 [J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2020, **37**(1): 104-109.
- [10] Malavolti M, Fairweather-Tait S J, Malagoli C, *et al.* Lead exposure in an Italian population: food content, dietary intake and risk assessment [J]. *Food Research International*, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109370.
- [11] Zhang X Y, Wang Z, Liu L, *et al.* Assessment of the risks from dietary lead exposure in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **418**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126134.
- [12] Ding C F, Ma Y B, Li X B, *et al.* Derivation of soil thresholds for lead applying species sensitivity distribution: a case study for root vegetables[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **303**: 21-27.
- [13] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, *et al.* Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: an integrated approach [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 650-661.
- [14] Zhang L X, Zhu G Y, Ge X, *et al.* Novel insights into heavy metal pollution of farmland based on reactive heavy metals (RHMs): pollution characteristics, predictive models, and quantitative source apportionment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **360**: 32-42.
- [15] Li L P, Zhang Y Q, Ippolito J A, *et al.* Lead smelting effects heavy metal concentrations in soils, wheat, and potentially humans [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113641.
- [16] Xing W Q, Cao E Z, Scheckel K G, *et al.* Influence of phosphate amendment and zinc foliar application on heavy metal accumulation in wheat and on soil extractability impacted by a lead smelter near Jiyuan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(31): 31396-31406.
- [17] Wu X S, Cai Q Y, Xu Q, *et al.* Wheat (*Triticum aestivum* L.) grains uptake of lead (Pb), transfer factors and prediction models for various types of soils from China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **206**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111387.
- [18] Yang Y, Li Y L, Chen W P, *et al.* Dynamic interactions between soil-cadmium and zinc affect cadmium phytoavailability to rice and wheat: regional investigation and risk modeling [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115613.
- [19] Li Y L, Chen W P, Yang Y, *et al.* Quantifying source-specific intake risks of wheat cadmium by associating source contributions of soil cadmium with human health risk [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **228**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112982.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1997, **37**(1): 23-35.
- [22] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, 2014.
- [23] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 等. 环境模型中敏感性分析方法评述 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4889-4896.
- Chen W P, Tu H Z, Peng C, *et al.* Comment on sensitivity analysis methods for environmental models [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4889-4896.
- [24] 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 等. 南方典型水稻土镉 (Cd) 累积规律模拟 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 353-358.
- Dai Y T, Fu K D, Yang Y, *et al.* Simulation cadmium (Cd) accumulation in typical paddy soils in South China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 353-358.
- [25] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行) [S].
- [26] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量 [S].
- [27] Zhang H Z, Luo Y M, Song J, *et al.* Predicting As, Cd and Pb uptake by rice and vegetables using field data from China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(1): 70-78.
- [28] Chen W P, Li L Q, Chang A, *et al.* Characterizing the solid-solution partitioning coefficient and plant uptake factor of As, Cd, and Pb in California croplands [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(1-3): 212-220.
- [29] 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.
- [30] Chen X X, Liu Y M, Zhao Q Y, *et al.* Health risk assessment

- associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114348.
- [31] 杨阳, 陈卫平, 李艳玲, 等. 基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4800-4805.
Yang Y, Chen W P, Li Y L, *et al.* Comprehensive risk evaluation of cadmium in soil-rice system based on uncertainty analysis[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4800-4805.
- [32] Yang Y, Chang A C, Wang M E, *et al.* Assessing cadmium exposure risks of vegetables with plant uptake factor and soil property[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 263-269.
- [33] Xing W Q, Zhao Q, Scheckel K G, *et al.* Inhalation bioaccessibility of Cd, Cu, Pb and Zn and speciation of Pb in particulate matter fractions from areas with different pollution characteristics in Henan Province, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **175**: 192-200.
- [34] Guo J L, Tu L P, Qiao Z R, *et al.* Forecasting the air quality in 18 cities of Henan Province by the compound accumulative grey model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **310**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127582.
- [35] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [36] Shi T R, Ma J, Wu X, *et al.* Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **164**: 118-124.
- [37] Seybold C A, Grossman R B, Reinsch T G. Predicting cation exchange capacity for soil survey using linear models[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**(3): 856-863.
- [38] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(5): 1047-1056.
Yang F, Xu Y, Cui Y, *et al.* Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(5): 1047-1056.
- [39] Amery F, Smolders E. Unlocking fixed soil phosphorus upon waterlogging can be promoted by increasing soil cation exchange capacity[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, **63**(6): 831-838.
- [40] Ramos F T, de Carvalho Dore E F, dos Santos Weber O L, *et al.* Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, **98**(9): 3595-3602.
- [41] 蔡祖聪, 马毅杰. 土壤有机质与土壤阳离子交换量的关系[J]. *土壤学进展*, 1988, **16**(3): 10-15.
- [42] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(2): 261-272.
Chen W P, Yang Y, Xie T, *et al.* Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(2): 261-272.
- [43] Zhang G B, Song K F, Miao X, *et al.* Nitrous oxide emissions, ammonia volatilization, and grain-heavy metal levels during the wheat season: effect of partial organic substitution for chemical fertilizer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **311**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107340.
- [44] Wang C, Jin H, Zhong C, *et al.* Estimating the contribution of atmosphere on heavy metals accumulation in the aboveground wheat tissues induced by anthropogenic forcing [J]. *Environmental Research*, 2020, **189**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109955.
- [45] Zhang X Y, Geng L P, Gao P P, *et al.* Bioimaging of Pb by LA-ICP-MS and Pb isotopic compositions reveal distributions and origins of Pb in wheat grain [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **802**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149729.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shay County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)