

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献 ..... 赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)

基于卫星和地面监测的河西走廊 O<sub>3</sub> 浓度时空分布及潜在源区分析 ..... 李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)

海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征 ..... 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)

华东地区对流层 O<sub>3</sub> 和前体物 HCHO 及 NO<sub>2</sub> 的时空特征 ..... 王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)

2006 ~ 2020 年广东省大气甲醛排放演变特征 ..... 明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)

淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力 ..... 黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)

西安市城市降尘和土壤尘 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分特征 ..... 沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)

长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应 ..... 高爽, 遆超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)

黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系 ..... 裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)

古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因 ..... 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)

华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价 ..... 陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)

湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险 ..... 张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)

太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析 ..... 王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)

白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献 ..... 李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)

白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估 ..... 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)

雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应 ..... 李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)

鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析 ..... 于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)

不同臭臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群 ..... 张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)

反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响 ..... 李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)

密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响 ..... 辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茵, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 宋舒兴, 张俊亚 (4985)

城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制 ..... 赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)

高效异养硝化-好氧反硝化菌 *Glutamicibacter* sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制 ..... 魏渤惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)

大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制 ..... 岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)

不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响 ..... 贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)

淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估 ..... 张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)

黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估 ..... 耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)

固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估 ..... 马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖影云, 海金涛, 王欢 (5055)

鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征 ..... 赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)

聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响 ..... 陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)

聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响 ..... 郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)

聚乙烯与磺胺二甲噻啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响 ..... 赵肖琼, 张恒慧, 赵润柱, 张新梅 (5092)

离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算 ..... 张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 徐莉萍, 李永涛 (5102)

土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响 ..... 徐文彬, 饶良懿 (5114)

有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析 ..... 刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)

平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响 ..... 张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)

稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素 ..... 罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)

周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响 ..... 鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)

华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子 ..... 赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)

高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响 ..... 聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)

基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性 ..... 唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)

不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响 ..... 周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)

纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响 ..... 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如茵, 孟庆尧 (5204)

不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性 ..... 刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)

CuFeO<sub>2</sub> 改性生物炭对四环素的吸附特性 ..... 刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)

基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应 ..... 陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)

基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估 ..... 郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)

基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估 ..... 赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)

重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导 ..... 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)

安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析 ..... 贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)

湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估 ..... 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)

不同含量外源镉在土壤中的变化特征 ..... 周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)

CO<sub>2</sub> 泡沫混凝土碳封存潜力分析 ..... 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)

综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例 ..... 陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)

《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)

# 湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价

杨振宇, 廖超林\*, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

**摘要:** 水源地土壤环境质量状况关乎其流域内居民生命健康安全, 是生态环境保护研究中的热点科学问题. 选择湘东北典型河源区, 采集表层土壤样品共 87 件, 通过 GIS 技术和潜在生态风险指数法研究了土壤重金属 (Cd、Pb、Cr、Hg 和 As) 的空间分布特征和潜在生态风险, 并采用多元统计分析和正定矩阵因子分解 (PMF) 模型解释了其可能来源和贡献率. 结果表明: ① 湘东北典型河源区土壤呈酸性, 土壤重金属  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Hg})$  和  $\omega(\text{As})$  平均值分别为 0.20、41.07、130.51、0.29 和 11.63  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 对标背景值, 除 As 外均有富集; ② 土壤重金属综合潜在生态风险为中等风险等级, 其中 Cr、Pb 和 As 为轻微风险等级, Cd 和 Hg 均为强风险等级; ③ 土壤 Cd 和 Pb 具有同源性, 主要来源于农业活动, Cr 和 As 受生活垃圾排放和自然母质的双重影响, Hg 主要来源于化石燃烧及交通运输; ④ 生活垃圾排放源、自然母质源、化石燃烧及交通运输源和农业活动源对湘东北典型河源区土壤重金属的贡献率分别为 21.36%、35.92%、19.30% 和 23.42%, 人为源贡献率大于自然源. 研究结果对湘东北典型河源区的污染防治、生态修复和美丽乡村建设具有参考价值.

**关键词:** 河源区; 土壤重金属; 分布特征; 潜在生态风险; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5288-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202209145

## Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province

YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin\*, ZOU Yan, XIE Wu-jin, CHEN Xiao-wei, ZHANG Yu-fei

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Soil environmental quality in water source areas related to the residents' life, health and safety, has been the hotspot issues in science of ecological environment protection. A total of 87 surface soil samples were collected from typical river source areas in northeastern Hunan Province, using GIS technique and potential ecological risk assessment index to study the spatial distribution characteristics and Potential ecological risk of soil heavy metals (Cd, Pb, Cr, Hg and As), and the means of multivariate statistical analysis and positive definite matrix factor analysis models (PMF) were used to explain the possible sources and its contribution rates of heavy metals. The results show that: ① The soil located in the typical river source area of northeastern Hunan Province was acidic, and the mean of  $\omega(\text{Cd})$ ,  $\omega(\text{Pb})$ ,  $\omega(\text{Cr})$ ,  $\omega(\text{Hg})$ , and  $\omega(\text{As})$  in soil was 0.20, 41.07, 130.51, 0.29, and 11.63  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. And except As, all of them had enrichment tendency. ② The comprehensive potential ecological risk of soil heavy metals was at a medium level, among which Cr, Pb and As were at a slight level of potential ecological risk, and Cd and Hg all reached a strong level of risk. ③ Cd and Pb of soil had significant homology, which were derived from agricultural activity, Cr and As of soil were affected by both domestic waste discharge and natural parent material, and Hg of soil was mainly derived from fossil combustion and transportation. ④ There were four pollution sources which included household waste discharge source, natural parent material source, Fossil burning and transportation sources, as well as sources of agricultural activities in typical river source area in northeastern Hunan Province, which contributed the rates of heavy metals were 21.36%, 35.92%, 19.30% and 23.42%, respectively, and the contribution rate of man-made sources was higher than that of natural sources. To sum up, this study has reference value for pollution prevention, ecological restoration and beautiful village construction in river source area of northeastern Hunan Province.

**Key words:** river source area; soil heavy metals; distribution characteristic; potential ecological risk; source analysis

河流水源地的环境质量直接关系到所在区域居民的健康, 是我国环境监测和管理的重点区域<sup>[1,2]</sup>. 河流水源地土壤是污染物的重要“源”和“汇”, 其表层的土壤的重金属容易受到径流的影响, 发生土-水界面的迁移转化, 进而随径流和悬浮泥沙进入水体, 给环境和人类带来危害<sup>[3-7]</sup>. 因此, 了解土壤中重金属的分布特征和污染水平, 继而明晰污染来源及其贡献率, 采取有效的源头消减和调控措施, 是保护河流水源地土壤环境质量和维持流域生态安全的必要途径<sup>[8]</sup>.

土壤重金属污染具有隐蔽性强、潜伏周期长、毒性危害大和地域差异明显等特点<sup>[9,10]</sup>. 河流水源

地土壤作为向水体输送重金属的主要蓄积介质, 一旦发生污染必将造成大面积危害, 因此在生态环境保护过程中处于重要地位<sup>[11,12]</sup>. 近年来, 国内外学者针对河流水源地土壤重金属污染研究已开展过较多工作. 如 Bhuiyan 等<sup>[13]</sup> 对孟加拉国卡布里甘加河附近农田土壤中重金属使用富集因子法和 PMF 法进行研究, 结果表明 Cd、Pb 和 Cr 元素分别来源于

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571211); 湖南省高校科研重点项目(15A085)

作者简介: 杨振宇(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染与评价, E-mail: 330103468@qq.com

\* 通信作者, E-mail: cliao@163.com

农业活动、城市污水与纺织工业和自然背景; Cao 等<sup>[14]</sup>采用多元统计分析方法对天津市重要水源地于桥水库地区土壤重金属的来源和贡献率进行分析,结果表明研究区重金属含量主要受农业施肥、交通等人为活动的影响;朱静等<sup>[7]</sup>评价了武汉市饮用水源地土壤中重金属的分布并进行来源识别,发现水源地土壤重金属含量与距离市区的远近程度高度负相关.掌握水源地土壤重金属累积状况是实现流域重金属风险管控的基础.近年来,长株潭地区因遭受重金属污染的困扰<sup>[15,16]</sup>,众多学者围绕长株潭水环境中重金属污染已进行诸多研究,但并未将源头地区的生态环境质量纳入分析<sup>[17,18]</sup>,这可能会错估流域内土壤和水体中重金属的污染水平,进而导致过高的治理代价.本文选择湘东北典型河源区的某镇为研究区,基于3种土地利用类型分析土壤重金属(Cd、Pb、Cr、Hg和As)含量特征和空间分布规律,并开展土壤重金属潜在生态风险评价和源解析工作,以期为亚热带河源区的污染防治、生态修复和美丽乡村建设提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于湘东北的湘赣边界(28°15'~28°26'N, 114°03'~114°15'E),属亚热带季风性湿润气候区,年平均气温16~17℃、年平均降水量1400~1700 mm,无霜期长达230~240 d,境内海拔197.76~1453.89 m,属山地丘陵地貌(图1和图2),土壤成土母质以板页岩、花岗岩风化物为主,其土地利用方式以林地为主,同时兼具水田和旱地,共3种地类.研究区所在镇域是长株潭地区重要的商品粮基地,境内旅游资源丰富,且交通便利,东西贯

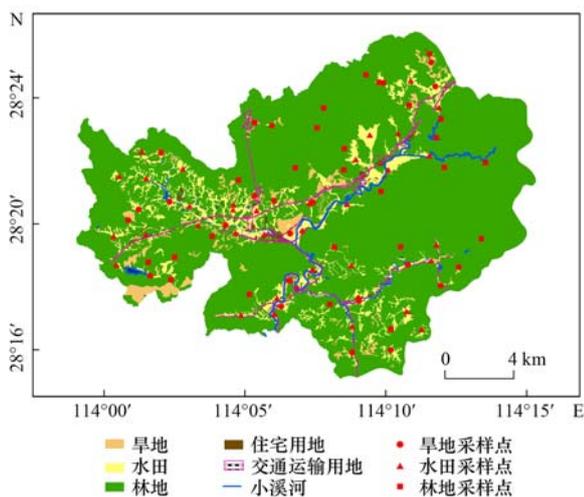


图1 研究区土地利用类型和采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of land use types and sampling sites in the study area

有S20大浏高速公路、S309省道和蒙华铁路等3条主干道,南北连接高速公路互通,带动了当地文旅产业发展.长期积累的人为扰动持续地压缩着生态保护的弹性空间.同时,境内发育的小河是湘江一级支流的源头,其水质关系着该流域乃至长株潭地区的居民饮水安全.

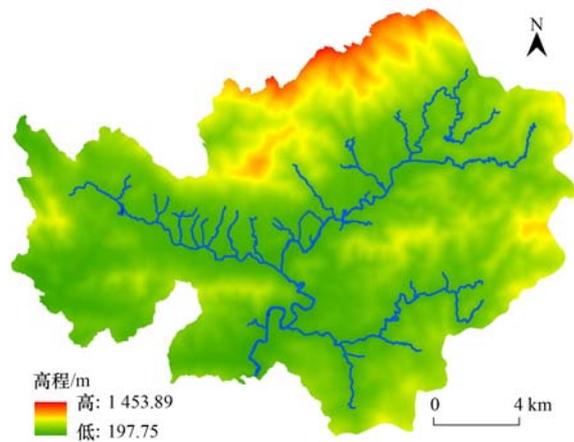


图2 研究区高程

Fig. 2 Elevation in the study area

### 1.2 遥感影像解译

通过“91卫图”网站平台下载2020年湘东北典型河源区镇域的遥感影像(16级),运用遥感影像处理软件ArcGIS 10.7进行分析操作,完成:①以研究区行政边界为基础提取目标区域影像;②影像目视解译捕获功能分区图斑;③创建渔网,按照国土资源部《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)要求,采用网格加图斑的方法,布设采样点.在确保样品点在研究区域空间上均匀分布的同时,保证样品点布设在具代表性的样区范围内.获取研究区域采样点分布(图1),用于分析河源区土壤重金属含量的空间分布特征.

### 1.3 样品采集与分析处理

参考《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)的勘测、处理方法,并综合考虑研究区内3种土地利用类型,采用梅花取样法于2021年9月在研究区内采集表层(0~20 cm)土壤样品87份(表1).采样时通过经纬度结合实际勘测对样点进行校准,所获土样经均匀混合按四分法保留至1~1.5 kg后避光备存,同时现场注明土壤样品点位信息(海拔和周边情况等).样品在实验室条件下剔除砾石和动植物残体,经自然风干、磨碎后过10目和100目尼龙筛,以备实验室测试分析<sup>[19]</sup>.

主要分析方法集中借鉴《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB/15618-2018).①土壤重金属元素全量测定:称取100目0.2000 g土壤样品于聚四氟乙烯坩埚中,加少量

水湿润,先后加入盐酸、硝酸、高氯酸和氢氟酸(4 mL、5 mL、2 mL和6 mL)进行热消解,所有样品消解过后,应用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MSNexION 300X型,美国PerkinElmer)检测Cd、Pb和Cr含量,检出限为 $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ [20]。称取100目0.2500 g土壤样品于消煮管中,加入稀释 $[V(\text{水}):V(\text{王水})=1:1]$ 的王水10 mL进行沸水浴消解,应用原子荧光光谱法(AFS-8220型,北京吉天)测定Hg和As含量,检出限分别为 $0.001 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [21,22];②土壤pH测定:称取10目10.00 g土壤样品,加入25 mL水(沸水经冷却处理后使用)搅拌浸提,应用电位法(STARTER 2100型,美国Ohaus)测定pH[23],仪器精度为pH 0.01。为保证实验的准确度和精密性,分析过程中所有样品按规范要求加10%空白样和3次平行样进行测定,所用试剂品级均为优级纯,以超纯水配制,盛装器皿均经过10%硝酸溶液浸泡24 h后使用。

表1 土壤样品基本概况

Table 1 Basic information of soil samples

项目	土地利用类型			
	水田	旱地	林地	
pH	范围	4.58~5.30	4.52~5.50	4.39~5.29
	均值	4.95	5.13	4.81
采样数/件	35	25	27	

## 1.4 土壤重金属潜在生态风险评价与源解析方法

### 1.4.1 潜在生态风险评价

瑞典学者Hakanson提出的潜在生态风险指数综合考虑了含量、环境效应和生态毒性的影响,被广泛应用于土壤中重金属的生态风险评估[24]。其计算公式如式(1)和式(2):

$$E_r^i = T_r^i \times P_r^i = T_r^i \times (C_s^i/C_b^i) \quad (1)$$

$$RI = \sum_i E_r^i \quad (2)$$

式中, $C_s^i$ 表示重金属元素*i*的实测含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $C_b^i$ 表示研究区域重金属元素*i*的背景值(采用《湖南土壤背景值及研究方法》中中长株-潭城市区域土壤元素环境背景值[25]); $T_r^i$ 表示重金属元素*i*的毒性响应系数,本文采用多数学者整理和采用的一般毒性系数[26,27]:Cd=30,Pb=5,Cr=2,Hg=40,As=10; $E_r^i$ 表示重金属元素*i*的单个元素潜在生态风险指数.RI表示*n*个元素的综合潜在生态风险指数。 $E_r^i$ 和RI的评价等级标准见表2。

### 1.4.2 源识别——多元统计分析

(1)相关性分析 相关性分析可用于统计分析

不同重金属元素之间是否具有物源性和相似迁移途径的重要方法.如果不同重金属元素之间没有相关性,表明这些元素并不是受单一因素影响,反之则推测元素间可能存在相似来源.众多研究中将Pearson相关系数作为重金属源解析中常用的相关性分析方法.

表2 潜在Hakanson指数评级标准

Table 2 Rating criteria for the potential Hakanson index

$E_r^i$	评价等级	RI	评价等级
$E_r^i \leq 40$	轻微潜在风险	$RI \leq 150$	轻微潜在风险
$40 < E_r^i \leq 80$	中等潜在风险	$150 < RI \leq 300$	中等潜在风险
$80 < E_r^i \leq 160$	强潜在风险	$300 < RI \leq 600$	强潜在风险
$160 < E_r^i \leq 320$	很强潜在风险	$RI > 600$	很强潜在风险
$E_r^i > 320$	极强潜在风险		

(2)主成分分析(PCA) 主成分分析需将多样品点间不同重金属元素和其他一系列具有复杂关系的变量进行客观分组,将初始的因子载荷矩阵通过正交旋转变换进行“降维”处理,再根据各重金属元素的因子载荷情况来识别主因子,获得各主成分因子得分。

### 1.4.3 源解析——正定矩阵因子分解(PMF)

PMF模型是美国国家环保署(USEPA)推荐使用的定量源解析方法[27],利用变量的权重系数来确定污染组分的误差,通过最小二乘法进行迭代运算,计算主要污染源及其贡献率.由于PMF模型具有不需要获取详细源成分谱、分解的因子载荷和得分非负以及可以利用数据不确定度来进行优化等优点,近年来被广泛应用于大气气溶胶、土壤和水体沉积物中持久性有毒污染源的定量解析.其基本计算公式为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{jk} + E_{ij} \quad (3)$$

式中, $X_{ij}$ 表示第*i*个样品中重金属*j*的实测含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $p$ 表示源的数量; $G_{ik}$ 表示各源*k*对各样品*i*的贡献率; $F_{jk}$ 表示各源*k*中重金属*j*的占比。 $E_{ij}$ 表示第*i*个样品中重金属*j*的误差。

在PMF模型中,为优化解析值使收敛最小化,将所有样本误差和不确定度的和定义为目标函数*Q*,如下式:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{jk}}{U_{ij}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right)^2 \quad (4)$$

式中, $U_{ij}$ 表示第*i*个样品中各重金属*j*元素含量的不确定度,本文不确定度 $U_{ij}$ 根据EPA PMF 5.0用户指南推荐方法进行估算。

当样品含量小于或等于相应方法检出限

(MDL)时,  $U_{ij}$ 为:

$$U_{ij} = (5/6) \cdot MDL \quad (5)$$

当样品浓度大于 MDL 时,  $U_{ij}$ 为:

$$U_{ij} = \sqrt{(EF \times c)^2 + (0.5 \times MDL)^2} \quad (6)$$

式中,EF 表示误差分数,  $c$  表示重金属样品含量, MDL 表示各重金属测定方法检出限. 模型运行过程中, 本文选取 5 种重金属因子进行 20 次迭代运算, 根据含量误差、信噪比(S/N)、观测值与预测值之间的相关性( $R^2$ )和  $Q$  值多次重复计算, 直至确定最佳因子数目.

### 1.5 数据统计与分析

研究区土壤重金属含量统计分析和污染评价通过 Excel 和 IBM SPSS Statistics 22 软件完成, 同时利用 Origin 2021 和 RStudio 构建数据图表. 土壤重金属含量空间分布采用 ArcGIS 10.7 进行克里金空间插值完成, 最后运行 EPA PMF 5.0 软件结合多元统计分析方法完成土壤重金属源解析.

表 3 土壤重金属含量统计特征

Table 3 Statistical characteristics of soil heavy metal content

项目	重金属元素				
	Cd	Pb	Cr	Hg	As
范围/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.08 ~ 0.41	23.76 ~ 65.25	49.52 ~ 309.81	0.11 ~ 0.69	1.88 ~ 72.86
均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.20	41.07	130.51	0.29	11.63
标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.08	9.32	39.95	0.12	9.52
变异系数/%	39.04	22.69	30.61	39.42	81.86
背景值 <sup>1)</sup> / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.07	30.00	68.00	0.09	15.00

1) 背景值取自湖南省长沙-株洲-湘潭三城市区域重金属元素含量<sup>[25]</sup>

### 2.1.2 不同土地利用类型土壤重金属含量特征

不同土地利用类型土壤 5 种重金属含量有所不同(图 3), 其中 Cd 含量平均值大小排序为: 旱地 > 水田 > 林地, 且旱地和水田显著( $P < 0.05$ )高于林地, Cr 和 As 含量平均值则表现相反, 为林地显著高于旱地和水田, 其均值大小排序为: 林地 > 旱地 > 水田; Pb 和 Hg 含量平均值均表现为: 水田 > 旱地 > 林地, 但 3 种土地利用类型间差异不明显. 整体上, 研究区不同土地利用类型土壤 Cd、Pb、Cr 和 Hg 含量平均值明显高于长-株-潭城市圈土壤元素背景值, As 含量平均值明显低于其背景值, 说明研究区不同土地利用类型土壤 5 种重金属元素含量受环境影响显著.

### 2.1.3 土壤重金属空间分布特征

土壤重金属含量空间分布特征如图 4 所示. Cd 和 Pb 含量的空间分布图斑相类似[图 4(a)和 4(b)], 均在研究区北部和南部有高值响应, 含量高值区主要分布在水田和旱地附近, 围绕耕作区进行富集, 而林地覆盖区(如东部和中部)明显处于 Cd、Pb 含量的低值区; Cr 含量空间分异性较大, 其高值

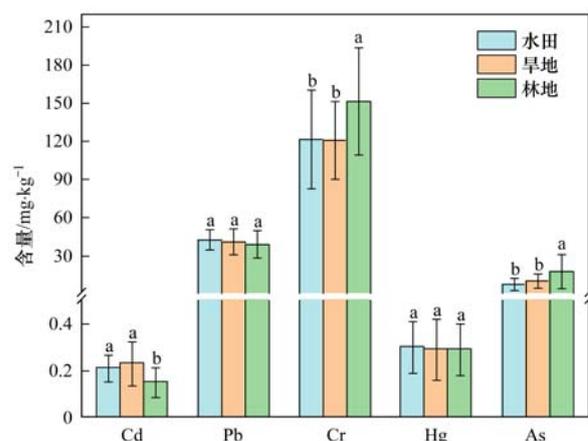
## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属含量和空间分布特征

#### 2.1.1 土壤重金属含量特征

研究区土壤属于典型的酸性土壤, pH 介于 4.39 ~ 5.50(表 1), 土壤 5 种重金属元素含量描述性统计结果见表 3,  $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$  和  $\omega(\text{Cd})$  平均值分别为: 130.51、41.07、11.63、0.29 和 0.20  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

依据湖南省长-株-潭城市圈土壤元素背景值<sup>[25]</sup>, Cr、Pb、Hg 和 Cd 含量平均值分别达对应元素背景值的 1.92、1.37、3.22 和 2.86 倍, 说明研究区除 As 外的上述 4 种元素均呈现明显的富集倾向. 变异系数显示, Pb 和 Cr 属于中等变异水平(CV 介于 16% ~ 36%), 而 Cd、Hg 和 As 则达到强变异水平(CV > 36%), 尤其 As 的变异系数超过了 50%, 表明其空间分异性较大, 受环境影响明显.



小写字母表示显著性水平( $P < 0.05$ ), 即相同字母间标记

无显著性差异, 不同字母间标记有显著性差异

图 3 不同土地利用类型土壤重金属含量

Fig. 3 Soil heavy metal content under different land use types

图斑均大致和研究区游憩景点相关[图 4(c)]; 而 As 含量的空间分布相对集中, 呈现林地覆盖区高于城镇居民区的特征[图 4(d)]; 此外, Hg 的高值含量图斑明显分布于山顶景区、乡镇居民点及沿线交通要道等人类活动密集区域[图 4(e)], 重点以 S20

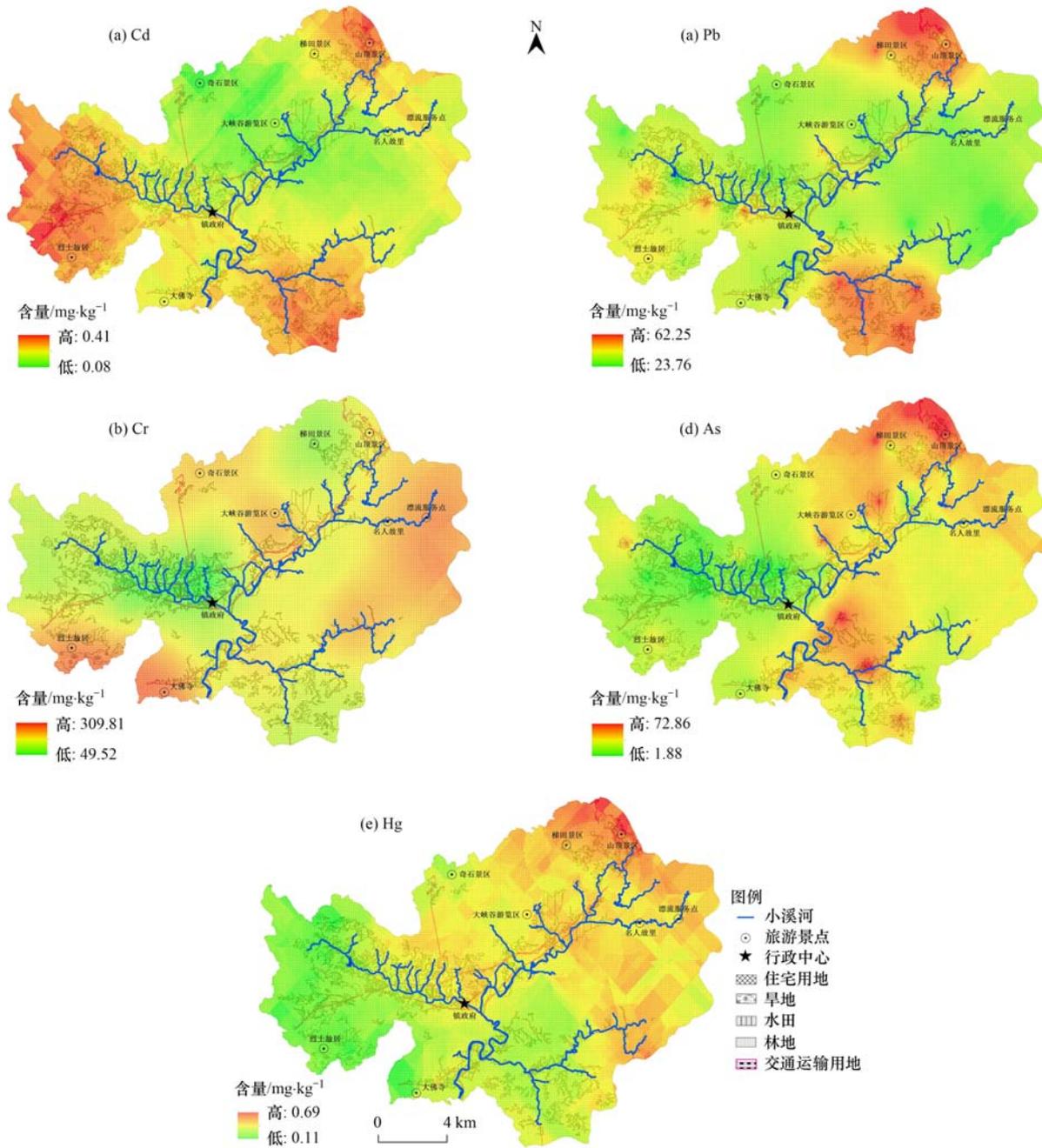


图4 土壤重金属含量空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of soil heavy metal content

大浏高速公路、蒙华铁路和高速公路互通等交通干线附近存在高值响应。

## 2.2 土壤重金属潜在生态风险评价和空间分布特征

### 2.2.1 土壤重金属潜在生态风险评价

研究区5种重金属元素的单因子潜在生态风险指数( $E_r^i$ )介于1.26~304.83之间(表4),其平均值按降序排列依次为:130.46(Hg)、84.49(Cd)、7.76(As)、6.84(Pb)和3.84(Cr)。其中,Hg和Cd的 $E_r^i$ 平均值达到强风险等级,且 $E_r^i$ 最大值分别达到了304.83和175.62,属很强风险等级,而其余3种元素(As、Pb和Cr)的 $E_r^i$ 平均值均低于10,表明

研究区存在较高的Hg和Cd潜在生态风险;而As、Pb和Cr的潜在生态风险较低。从单个重金属潜在生态风险等级比例看,研究区全样点无极强风险等级分布,其中Hg和Cd产生中等风险的样点分别占16.09%和47.12%,产生强风险的样点分别占58.62%和44.83%,产生很强风险的样点分别占25.29%和2.30%,而其余3种元素的样点基本均处于轻微风险等级,表明研究区Hg和Cd是污染非常突出的代表性元素,且Hg的潜在生态风险更高。

研究区综合潜在生态风险指数(RI)介于100.43~436.53之间,均值为233.39,其中仅

6.90%的样点属轻微风险等级,达到中等及强风险等级的样点比例分别为80.46%和12.64%,无很强风险等级的样点。整体上,综合潜在生态风险为中等风险等级。

表4 土壤重金属潜在生态风险评价指数

Table 4 Potential ecological risk assessment index of soil heavy metals

项目	潜在生态风险指数范围	均值	占比/%				
			轻微风险	中等风险	强风险	很强风险	极强风险
Cd	33.05 ~ 175.62	84.49 <sup>1)</sup>	5.75	47.12	44.83	2.30	0
Pb	3.96 ~ 10.87	6.84 <sup>1)</sup>	100	0	0	0	0
Cr	1.46 ~ 9.11	3.84 <sup>1)</sup>	100	0	0	0	0
Hg	48.29 ~ 304.83	130.46 <sup>1)</sup>	0	16.09	58.62	25.29	0
As	1.26 ~ 38.57	7.76 <sup>1)</sup>	98.85	1.15	0	0	0
全域 RI	100.43 ~ 436.53	233.39 <sup>2)</sup>	6.90	80.46	12.64	0	— <sup>3)</sup>

1)表示  $E_r^i$  指数; 2)表示 RI 指数; 3)“—”表示 RI 指数控制下无极强风险评级,见表2

2.2.2 不同土地利用类型土壤重金属潜在生态风险评价

从3种土地利用类型间土壤重金属的  $E_r^i$  平均值变化看(图5),水田和旱地土壤 Cd 的  $E_r^i$  明显高于林地,达到强风险等级;土壤 Pb 的  $E_r^i$  表现出和 Cd 相同的变化特征,即水田和旱地高于林地,但均

为轻微风险等级;土壤 Cr 和 As 的  $E_r^i$  均表现为:林地 > 旱地 > 水田,属轻微风险等级;而土壤 Hg 的  $E_r^i$  则表现为:水田 > 林地 > 旱地,均为强风险等级。整体上,3种土地利用类型土壤 Hg 和 Cd 存在较高的潜在生态风险,且以水田土壤的潜在生态风险最高。

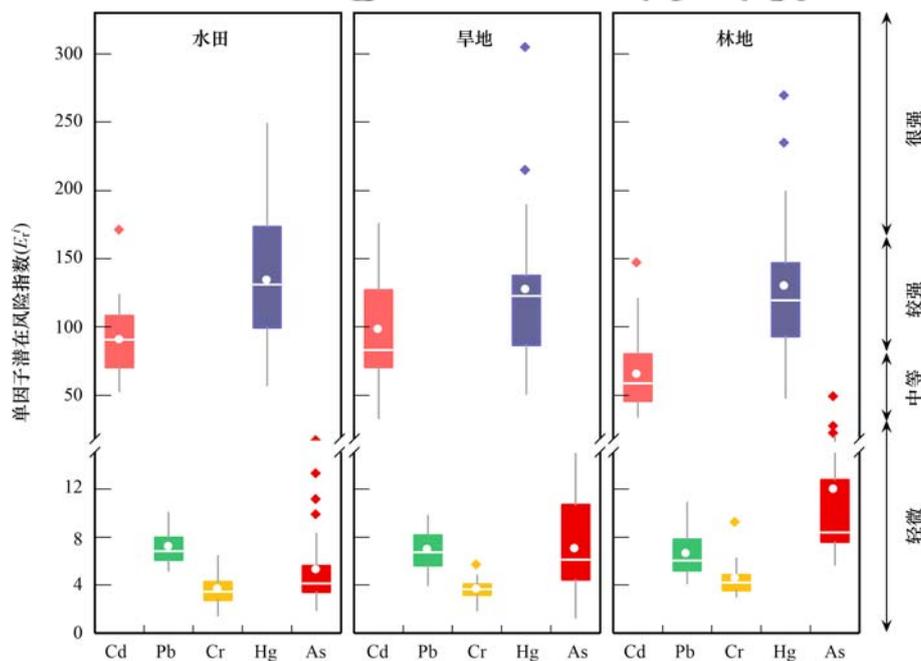


图5 不同土地利用类型土壤重金属单因子潜在生态风险指数 ( $E_r^i$ )

Fig. 5 Single factor potential ecological risk index ( $E_r^i$ ) of soil heavy metals under different land use types

3种土地利用类型间土壤 RI 平均值的大小降序排列为(表5):241.93(旱地)、239.58(水田)和217.46(林地),均为中等风险等级;不同风险等级的样点占比表明,水田、旱地和林地土壤样点

属中等风险等级的样点分别占85.71%、64.00%和88.89%,且均无很强风险等级的样点,表明3种土地利用类型的土壤存在中等程度的潜在生态风险。

表5 不同土地利用类型土壤重金属综合潜在生态风险指数 (RI)

Table 5 Comprehensive potential ecological risk index (RI) of soil heavy metals under different land use types

项目	潜在生态风险指数范围	均值	占比/%			
			轻微风险	中等风险	强风险	很强风险
水田	142.56 ~ 379.42	239.58	2.86	85.71	11.43	0
旱地	126.18 ~ 436.53	241.93	16.00	64.00	20.00	0
林地	100.43 ~ 407.51	217.46	3.70	88.89	7.41	0

### 2.2.3 土壤重金属潜在生态风险指数空间分布特征

研究区 RI 值的空间分布表明(图 6),潜在生态风险评级的高值区主要集中在镇域南部虎坳、三桥、小溪村附近和北部山顶景区附近. 以上区域遍集农耕田地或社会交互性很强的游憩景点,其中山

顶景区附近的潜在生态风险较为严重,RI 值高达 407.51,推测和其多年的文旅产业兴盛和景区建设相关. 潜在生态风险的低值区主要分布于镇域西部彭坊村以西、中北部高速公路互通两侧和中部集镇主要居民区以北等地,这些区域主要以开发程度较低和环保工作落实到位的林地保育区为主.

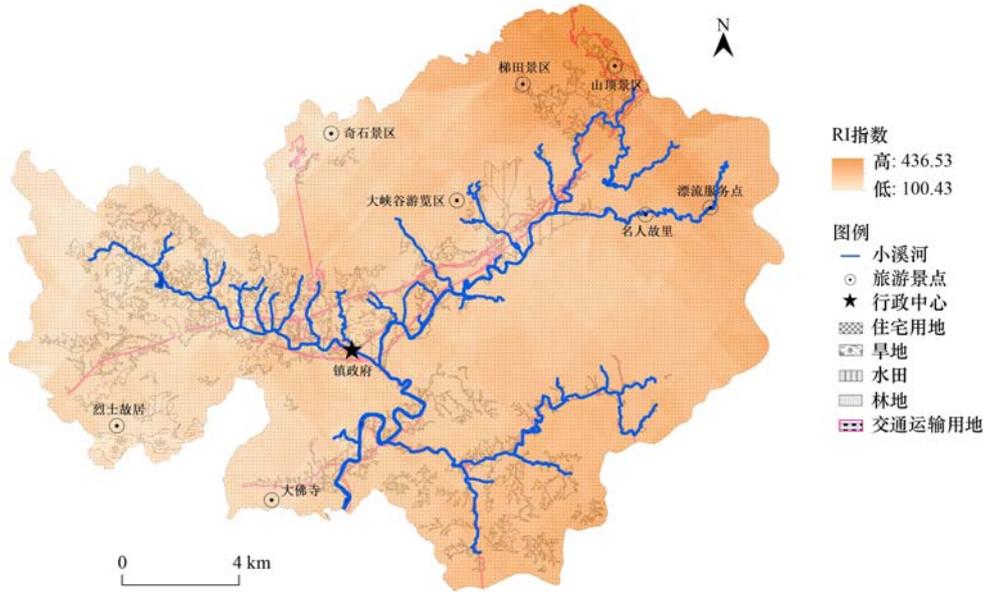


图 6 土壤重金属综合潜在生态风险指数 (RI) 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of integrated potential ecological risk index (RI) of soil heavy metals

综上,研究区重金属潜在生态风险居于中等风险水平,3 种土地利用类型的土壤平均潜在生态风险以水田最高,产生潜在生态风险的元素主要为 Hg 和 Cd; 在空间上,重金属潜在生态风险较为严重的区域主要分布于研究区北部山顶风景区,说明文旅产业开发存在潜在生态污染效应.

### 2.3 土壤重金属来源识别

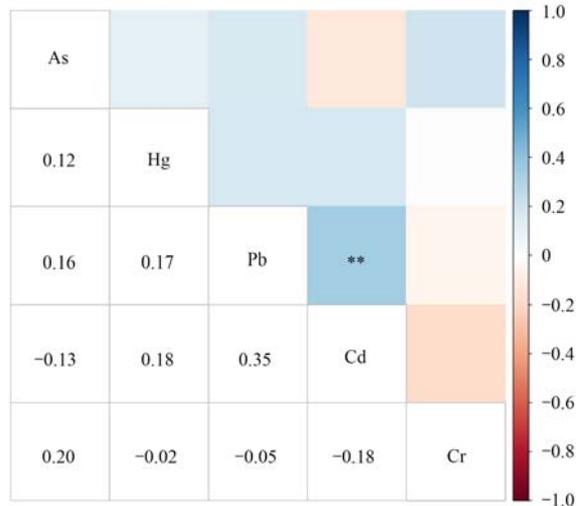
重金属在土壤中进行富集一般可分为两种主要的贡献源:自然源和人为源<sup>[8]</sup>. 本文将通过相关性分析和主成分分析方法对湘东北典型河源区土壤重金属的可能来源进行识别分析.

#### 2.3.1 相关性分析

相关性分析可显示重金属间的物源性,并推测重金属可能的来源<sup>[28,29]</sup>. 对研究区土壤中 5 种重金属进行 K-S 和 S-W 分析,检验结果符合正态分布,适合进行相关性分析. 相关性热图和 Pearson 相关性检验结果表明(图 7),仅 Cd 和 Pb 之间存在极显著正相关关系( $P < 0.01$ ,下同),表明这 2 种重金属元素的来源可能相同或影响因素类似;此外,Cr、Hg 和 As 之间均无显著相关性,推测 3 种重金属元素的来源可能相对独立.

#### 2.3.2 主成分分析

主成分分析(PCA)能够在相关性分析的基础上



\*\* 表示两元素间存在极显著相关关系( $P < 0.01$ );

色柱颜色表示:蓝(红)色越深,两元素间正(负)相关性越显著

图 7 土壤重金属相关性热图

Fig. 7 Correlative heat map of soil heavy metal content

进一步探讨重金属的污染来源<sup>[30,31]</sup>. 将研究区 5 种土壤重金属分布含量进行 KMO 统计量和 Bartlett 球形度检验,结果分别为 0.59 和 0.001,表明重金属元素间不相互独立且数据呈球形分布,符合主成分分析的要求. 利用 Origin 2021 运行 PCA 组件,以 3 种土地利用类型作为观察值进行分组,对研究区 5

种重金属含量进行主成分分析,采用最大方差旋转法提取出 4 个特征值分别为 1.52、1.29、0.86 和 0.78 的主成分,累积方差贡献率达 88.99%,很大程度上可解释研究区土壤重金属的污染来源,分析结果见图 8 和表 6。

第一主成分(PC1)贡献率为 30.44%,其中 Cd 和 Pb 在因子 1 上具有较高的正载荷,且两者间呈极显著正相关关系,表现出高度的同源性。有研究表明,在无工业企业分布的情况下,Cd 被认为是农业生产的标志元素,化肥等农用物质的不合理应用会带来 Cd 和 Pb 的长期积累<sup>[32,33]</sup>。同时农业生产过程中,使用以柴油或汽油为主要燃料的农用机械,其尾气排放对 Pb 富集产生重要贡献,而农机轮胎与地面磨损也会产生含 Cd 颗粒物在农田土壤进行累积<sup>[34]</sup>。由于研究区的工业以竹木加工为主,一定程度上可排除因大型工业企业通过生产途径向土壤输入重金属的可能。研究区南部、西部和北部的农耕地分布较集中,且与 Cd 和 Pb 空间分布的高值图斑[图 4(a)和 4(b)]高度重合;同时,近年来境内农业生产规模化、集约化不断发展,土地利用强度增大,农业投入品的连年输入可能是土壤 Cd 和 Pb 相对富集的主要因素。因此,认为 PC1 可归纳为农业活动源。

表 6 土壤重金属主成分

Table 6 Principal component of soil heavy metals

重金属	因子载荷			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Cd	0.63	-0.18	0.19	0.35
Pb	0.59	0.26	0.42	-0.05
Cr	-0.29	0.55	0.13	0.77
Hg	0.42	0.29	-0.85	0.09
As	-0.01	0.72	0.12	-0.52
特征值	1.52	1.29	0.86	0.78
方差贡献率/%	30.44	25.83	17.08	15.64
累积方差贡献率/%	30.44	56.27	73.35	88.99

第二主成分(PC2)和第四主成分(PC4)中载荷较高的元素均为 Cr 和 As。研究表明 Cr 和 As 与成土母质、成土过程和地质活动显著相关<sup>[35~37]</sup>,可以推测自然来源是影响 Cr 和 As 含量的因素之一;此外,研究区 Cr 含量高值区域分布于主要游憩景观资源附近[图 4(c)],可以认为旅游活动产生的生活垃圾可能是 Cr 积累的主要因素;而土壤 As 含量平均值远低于背景值,同时空间变异为强变异(表 3),因此可能除自然因素影响外,研究区的生活垃圾排放和农业活动等也是其主要影响因素之一。从主成分载荷看(表 6),Cr 在主成分 PC2 和 PC4 的载荷均为正向影响,说明两者均具有导致土壤 Cr 存在积聚的倾向;而 As 在主成分 PC2 和 PC4 中的载荷分别

表现为正、负向影响,说明 PC2 和 PC4 分别具有导致土壤 As 相对富积和亏损趋势;有研究表明 As 与自然成土母质或成土过程显著相关,但自然淋溶作用致使表层土壤中的全 As 含量不断输出,从而使表土 As 含量低于背景值<sup>[37,38]</sup>。综上,可推测 PC2 和 PC4 分别代表生活垃圾排放源和自然母质源。

第三主成分(PC3)仅对 Hg 的因子载荷负载明显。有研究显示,燃煤和有色金属冶炼是 Hg 富集产生污染的主要来源<sup>[36,39]</sup>。对比样点周边信息和资料分析发现,Hg 主要集聚分布于乡镇居民区和交通干线(如蒙华铁路)附近[图 4(e)],可能因研究区居民燃煤释放含汞废气和铁路运输产生的矿渣或粉尘等废弃物,最终通过大气沉降或地表径流进入土壤<sup>[40]</sup>,从而导致土壤 Hg 相对积累。因此,因子 PC3 可归纳为化石燃烧及交通运输组成的混合源。

## 2.4 土壤重金属来源解析

运用传统多元统计分析方法的基础上选择 PMF 模型来对源识别的因子进行定量解析,可达到所测量的重金属浓度和污染源之间化学质量平衡的目的<sup>[41,42]</sup>。本文在采用 PCA 判定污染源类别和主次关系的基础上,通过 PMF 模型对研究区 5 种重金属来源进行定量解析,并计算各源贡献率。有研究表明,信噪比大于 2 则代表数据适用于该模型,信噪比越大则样品检出的可能性越大,越适合模型<sup>[43]</sup>。本文数据信噪比均为 9,当模拟因子数为 4 时,计算方案最为稳定, $Q_{Robust}/Q_{True}$  (335.9/339.2)处于收敛最小值且残差处于 -3~3 之间,同时 5 种重金属的解析模型呈正态分布,说明测量值与模拟值的相关性很强(表 7),拟合结果可靠,模拟因子具有代表性<sup>[44,45]</sup>。因此,本文 PMF 模型的最佳因子数为 4,各重金属的污染源成分谱情况见图 8(a)。

表 7 实测值与 PMF 模型预测值拟合结果

Table 7 Fitting results of measured values and predicted values of the PMF model

项目	重金属元素				
	Cd	Pb	Cr	Hg	As
斜率	0.83	0.83	0.96	1.00	0.99
$R^2$	0.87	0.75	0.97	1.00	0.99

PCA 分析表明,研究区 5 种重金属存在 4 种污染源,其中 Cd 和 Pb 污染源主要为农业活动源,而污染源成分谱表明,Cd 和 Pb 对因子 4 贡献率最大,分别为 48.10% 和 31.10%,因此,因子 4 为农业活动源;Hg 污染源主要为化石燃烧及交通运输源,其污染源成分谱显示 Hg 对因子 3 的贡献率达 63.40%,因此,因子 3 为化石燃烧及交通运输源;Cr 污染源主要分为自然母质源和生活垃圾排放源,

其污染源成分谱显示,Cr 仅对因子 1 和因子 2 有贡献,且贡献率分别为 44.70% 和 55.30%,同时 Cr 对 2 种污染源载荷得分大小表现为自然母质源 > 生活垃圾排放源(表 6),判断因子 1 和 2 分别为生活垃圾排放源和自然母质源。

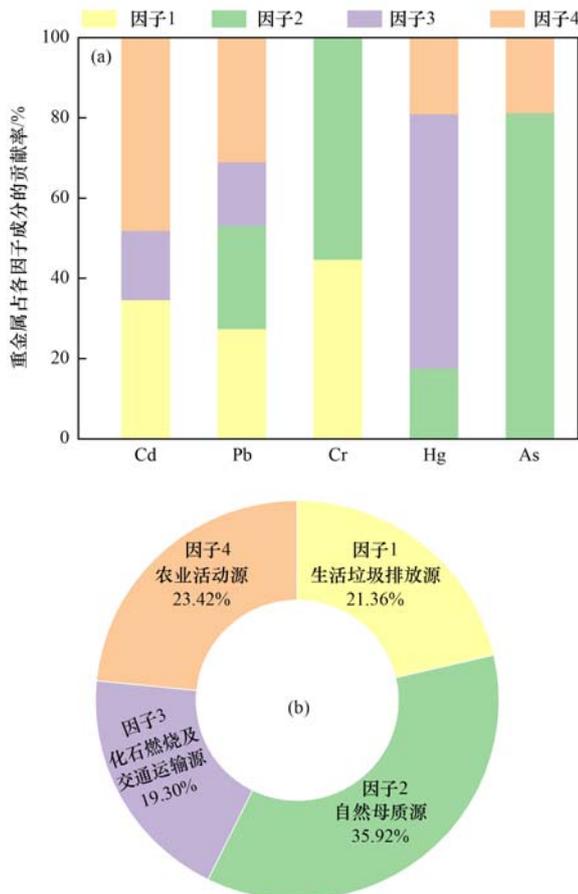


图8 土壤重金属 PMF 分析污染源成分谱及其组分贡献率

Fig. 8 PMF analysis of heavy metals in soil pollution sources and its contribution rate

从 4 种污染源对整个研究区土壤重金属污染的贡献率看[图 8(b)],生活垃圾排放源和自然母质源分别占 21.36% 和 35.92%,化石燃烧及交通运输源占 19.30%,而农业活动源的贡献率为 23.42%,表明研究区人类活动源贡献率大于自然源。

### 3 结论

(1)湘东北典型河源区土壤 pH 呈酸性,土壤中 Cd、Pb、Cr 和 Hg 含量平均值均高于湖南省长-株-潭城市群土壤背景值,仅 As 低于土壤背景值;

(2)湘东北典型河源区土壤重金属潜在生态风险居于中等风险水平,其中 Cr、Pb 和 As 处于轻微潜在生态风险等级,Cd 和 Hg 均达到强风险水平;

(3)湘东北典型河源区土壤 Cd 和 Pb 同源性显著,主要来源于农业活动;Cr 和 As 均主要受生活垃圾排放和自然母质的影响;Hg 主要来源于化石燃

烧及交通运输;

(4)湘东北典型河源区土壤重金属污染源可分为 4 种,即生活垃圾排放、自然母质、化石燃烧及交通运输和农业活动,其对土壤重金属富集的贡献率分别为 21.36%、35.92%、19.30% 和 23.42%,人为源贡献率大于自然源。

(5)应科学开展农事活动,加强游憩景点废弃物管理,合理燃煤及交通排放,确保湘东北河源区土壤安全利用。借以管控陆地风险源因素,以巩固湘东北生态环境屏障目标。

### 参考文献:

- [1] 张清华,韦永著,曹建华,等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1598-1607.  
Zhang Q H, Wei Y Z, Cao J H, et al. Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River Basin, and related health risk assessments [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1598-1607.
- [2] 王龙飞,程逸群,胡晓东,等. 江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 749-760.  
Wang L F, Cheng Y Q, Hu X D, et al. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in representative drinking water resources in Jiangsu Province[J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 749-760.
- [3] Gu C K, Zhang Y, Peng Y, et al. Spatial distribution and health risk assessment of dissolved trace elements in groundwater in southern China[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1), doi: 10.1038/s41598-020-64267-y.
- [4] 王蒙蒙,宋刚福,翟付杰,等. 陆浑水库沉积物重金属空间分布特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1331-1339.  
Wang M M, Song G F, Zhai F J, et al. Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments of Luhun Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(4): 1331-1339.
- [5] 姬超,侯大伟,谢丽,等. 基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5322-5332.  
Ji C, Hou D W, Xie L, et al. Analysis and prediction of health risk from heavy metals in drinking water sources based on time series model[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5322-5332.
- [6] Zhang M, Tang L, Ji H B. Elements and Pb isotopic composition as evidence for contaminant-metal dispersal in surficial soil and sediment of drinking water source in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 837, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155682.
- [7] 朱静,侯耀宗,邹书成,等. 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3215-3222.  
Zhu J, Hou Y Z, Zou S C, et al. Spatio-temporal distribution characteristic and risk assessment of heavy metals in soils around centralized drinking water sources in Wuhan[J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3215-3222.
- [8] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10):

- 2219-2238.  
Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- [9] 张义, 周心劝, 曾晓敏, 等. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2062-2070.  
Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2062-2070.
- [10] 张浙, 卢然, 伍思扬, 等. 长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3763-3772.  
Zhang Z, Lu R, Wu S Y, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of mine soil in Yangtze River Economic Belt[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3763-3772.
- [11] 蔡怡敏, 陈卫平, 彭驰, 等. 顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1763-1770.  
Cai Y M, Chen W P, Peng C, *et al.* Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils and sediments in Shunde waterway, southern China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1763-1770.
- [12] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 89-98.  
Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of metals in drinking water sources from the Luhun reservoir[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 89-98.
- [13] Bhuiyan M A H, Dampare S B, Islam M A, *et al.* Source apportionment and pollution evaluation of heavy metals in water and sediments of Buriganga River, Bangladesh, using multivariate analysis and pollution evaluation indices [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(1), doi: 10.1007/s10661-014-4075-0.
- [14] Cao X H, Li W, Song S, *et al.* Source apportionment and risk assessment of soil heavy metals around a key drinking water source area in northern China; multivariate statistical analysis approach[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, doi: 10.1007/s10653-022-01251-7.
- [15] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 260-265.  
Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Soil Contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 260-265.
- [16] 盛维康, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2230-2240.  
Sheng W K, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xiang River[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2230-2240.
- [17] Huang Z F, Liu C Y, Zhao X R, *et al.* Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in south China [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2020, **32**(1), doi: 10.1186/s12302-020-00305-w.
- [18] 陈用泷, 李思阳, 吴泽璇, 等. 湘江源头某河段水体重金属污染特征与健康风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 2022, **12**(2): 590-596.  
Chen Y S, Li S Y, Wu Z X, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals of a certain river in headwater stream of Xiangjiang River [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(2): 590-596.
- [19] Zhang H, Yu M, Xu H J, *et al.* Geochemical baseline determination and contamination of heavy metals in the urban topsoil of Fuxin City, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, **12**(6): 1001-1017.
- [20] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2469-2479.  
Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2469-2479.
- [21] GB/T 22105.1-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分: 土壤中总汞的测定[S].
- [22] GB/T 22105.2-2008, 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分: 土壤中总砷的测定[S].
- [23] HJ 962-2018, 土壤 pH 值的测定 电位法[S].
- [24] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4756-4766.  
Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al.* Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
- [25] 潘佑民, 杨国治. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [26] 张雅然, 车靠靠, 付正辉, 等. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3037-3047.  
Zhang Y R, Che F F, Fu Z H, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Lake Qinghai [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3037-3047.
- [27] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1609-1619.  
Zhao D J, Wang X Q. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the floodplain soils of the karst area of Yunnan, Guizhou, Guangxi [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- [28] 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 430-437.  
Huang H B, Lin C Q, Hu G R, *et al.* Source appointment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong River Basin based on positive matrix factorization [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 430-437.
- [29] 张又文, 韩建华, 涂棋, 等. 天津市郊农田土壤重金属积累特征及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(11): 1445-1452.  
Zhang Y W, Han J H, Tu Q, *et al.* Accumulation characteristics and evaluation of heavy metals in suburban farmland soils of Tianjin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(11): 1445-1452.
- [30] 韩存亮, 罗炳圣, 常春英, 等. 基于多种方法的区域农业土壤重金属污染成因分析研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, **38**(2): 176-183.

- Han C L, Luo B S, Chang C Y, *et al.* Identifying the source of soil heavy metal pollution in regional agricultural area based on multiple methods [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(2): 176-183.
- [31] 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 等. 地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2094-2103.  
Wang X W, Liu H Y, Gu X F, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in soils affected by different land use types in a superimposed pollution area with high geological background[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2094-2103.
- [32] Zhang Z X, Lu Y, Li H P, *et al.* Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 235-243.
- [33] 黄宏伟, 肖河, 王敦球, 等. 漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1714-1723.  
Huang H W, Xiao H, Wang D Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the water of Lijiang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1714-1723.
- [34] 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 等. 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2500-2509.  
Hu J, Zhao X Y, Wang T T, *et al.* Distribution characteristics, evaluation, and source analysis of heavy metals in soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- [35] Zhang S J, Ye H, Zhang A J, *et al.* Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of heavy metals in the surface soil of Lushan scenic area, Jiangxi Province, China [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**, doi: 10.3389/fenvs.2022.891092.
- [36] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太漪运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5073-5081.  
Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [37] 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 等. 东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3048-3057.  
Zhao X L, Li X, Lu H B, *et al.* Analysis of heavy metal pollution characteristics and potential ecological risks of surface sediments in Dongjiang Lake[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3048-3057.
- [38] 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 等. 阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4545-4555.  
Chen M, Pan Y X, Huang Y X, *et al.* Spatial distribution and sources of heavy metals in soil of a typical lead-zinc mining area, Yangshuo[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4545-4555.
- [39] 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.
- [40] 张耀, 孙刚, 王琪, 等. 湖北某铅锌矿区农用地重金属调查与类别划分[J]. *环境工程*, 2022, **40**(2): 139-145, 205.  
Zhang Y, Sun G, Wang Q, *et al.* Investigation and classification of heavy metals in agricultural land in a lead-zinc mining area in Hubei Province[J]. *Environmental Engineering*, 2022, **40**(2): 139-145, 205.
- [41] Zhang H X, Cai A Z, Wang X J, *et al.* Risk assessment and source apportionment of heavy metals in soils from Handan City [J]. *Applied Sciences*, 2021, **11**(20), doi: 10.3390/app11209615.
- [42] 王成, 赵艳萍, 谢鸣捷. 苏南典型工农业交错区土壤铅富集特征及源解析——基于 PCA-PMF 方法[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 279-287.  
Wang C, Zhao Y P, Xie M J. Characteristics of lead enrichment in the soil from a typical peri-urban agricultural area of the southern Jiangsu and source appointment based on the PCA-PMF method[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 279-287.
- [43] 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.
- [44] 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 等. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4578-4589.  
Che K, Chen C M, Zheng Q Y, *et al.* Heavy metal emissions from coal-fired power plants and heavy metal pollution characteristics and health risks in surrounding soils [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4578-4589.
- [45] 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 等. 承德市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2343-2354.  
He B W, Nie S S, Li Y L, *et al.* Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM<sub>2.5</sub> in Chengde[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2343-2354.

## CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities .....	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O <sub>3</sub> Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring .....	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island .....	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O <sub>3</sub> and Precursors HCHO and NO <sub>2</sub> in East China .....	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020 .....	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo .....	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an .....	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin .....	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin .....	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment .....	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain .....	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province .....	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming .....	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake .....	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake .....	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River .....	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qiu, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang .....	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels .....	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China .....	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir .....	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater .....	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 for Various Nitrogen Sources at Low Temperature .....	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism .....	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost .....	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin .....	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland .....	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan .....	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake .....	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm .....	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) .....	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean .....	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide .....	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone .....	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers; A Meta-analysis .....	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope .....	ZHANG Gao-ning, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals .....	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability .....	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain .....	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil .....	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials .....	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce .....	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress .....	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas .....	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO <sub>2</sub> -modified Biochar .....	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis .....	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model .....	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI .....	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing .....	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province .....	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province .....	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil .....	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO <sub>2</sub> Foamed Concrete .....	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling .....	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)