

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

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

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^{1,2}, 辛存林^{1*}, 于爽^{2*}, 薛红蕾³, 曾鹏², 孙平安², 刘凡²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 烟台市蓬莱区农业农村局, 烟台 265600)

摘要: 为了探究南方丘陵区土壤重金属污染特征及生态风险状况, 选择南方某省丘陵区作为研究区, 利用 2017 年采集的 60 个点位的土壤样品, 采用单因子污染指数(P_i)、内梅罗综合污染指数($P_{综}$)和潜在生态风险指数(RI)评估 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 这 8 种重金属含量特征和潜在生态风险程度, 并利用正定矩阵因子分解模型(PMF)解析其污染来源。结果表明: ① 研究区 8 种重金属元素的含量均有超标, 内梅罗综合污染指数显示, 研究区呈现轻度、中度和重度污染所占的比例分别为 63%、8% 和 2%, 无污染和轻微污染的样点占 27%, 因此基本处于轻度污染; ② 综合潜在生态风险指数表明, 土壤重金属 RI 为 39.58~224.15, 低等和中等生态风险的样点所占的比例为 73.33% 和 25%, 而重度生态风险的样点所占比例为 1.67%, 该样点生态风险程度虽然最高, 但重金属含量低于该省土壤元素背景值; ③ 通过 PMF 模型得到 6 个污染源: 自然源、农业活动源、铜矿采选和交通运输组成的混合源、工业活动源、交通源和生活垃圾排放源, 贡献率依次为 24.8%、17.7%、17.7%、17.6%、12.0% 和 10.2%。

关键词: 土壤; 丘陵区; 重金属; 源解析; 潜在生态风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4756-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202110172

Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas

WANG Yu^{1,2}, XIN Cun-lin^{1*}, YU Shi^{2*}, XUE Hong-lei³, ZENG Peng², SUN Ping-an², LIU Fan²

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi; Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. Agriculture and Rural Bureau of Penglai District, Yantai City, Yantai 265600, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of soil heavy metal pollution and ecological risk status in southern hilly areas, a hilly area of a southern province was selected as the research area, using soil samples collected at 60 points in 2017. The single factor pollution index (P_i), Nemerow comprehensive pollution index, and potential ecological risk index (RI) were used to evaluate the content characteristics and potential ecological risks of eight heavy metal elements (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn), and positive definite matrix factor analysis models (PMF) were used to analyze their sources of pollution. The results were as follows: ① the content of eight heavy metal elements in the study area exceeded the standard, and the Nemerow comprehensive pollution index showed that the proportions of light, moderate, and heavy pollution in the study area were 63%, 8%, and 2%, respectively. Unpolluted and lightly polluted samples accounted for 27% and were thus basically lightly polluted. ② The comprehensive potential ecological risk index showed that the RI of soil heavy metals was 39.58~224.15, the proportions of samples with low and medium ecological risks were 73.33% and 25%, respectively, and the proportion of sites with severe ecological risks was 1.67%. Although this site had the highest ecological risk, the content of heavy metals was lower than the background value of soil elements in the province. ③ Six pollution sources were obtained through the PMF model: natural sources, agricultural activity sources, mixed sources composed of copper mining and transportation, industrial activity sources, transportation sources, and domestic waste emission sources. The contribution rates of each source were 24.8%, 17.7%, 17.7%, 17.6%, 12.0%, and 10.2%, respectively.

Key words: soils; hilly area; heavy metals; source analysis; potential ecological risk

土壤是人类不可或缺、赖以生存的物质基础。人类消耗的大部分蛋白质和热量直接来自土壤^[1]。然而随着社会的不断发展, 大量污水和固体废弃物的排放, 以及化肥和农药的不合理使用, 造成了严重的土壤污染。土壤重金属污染物具有持久性、不可逆性、隐蔽性等特性, 不仅危害农田环境, 还可以通过食物链进入人体, 危害人体健康^[2]。文献[3]显示: 全国土壤总的点位超标率为 16.1%, 其中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的点位超标率分别为: 2.7%、7.0%、1.1%、2.1%、1.6%、4.8%、1.5% 和 0.9%。国家环保部门的调查和统计显示, 我国每年有 1.2×10^7 t 粮食受到重金属污染, 土壤

环境质量总体不容乐观。土壤作为农业生态系统物质和能量交换不可或缺的枢纽, 探明其重金属污染特征、生态风险状况和污染来源对于重金属污染的防治具有重要意义。

近些年来, 有学者通过一系列方法及模型解析土壤重金属污染来源, 常用的有: 化学质量平衡模型法(CMB)^[4]、正定矩形因子分解法(PMF)^[5]、主成分/

收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2022-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177075); 广西重点研发专项(桂科 AB21196050); 地质调查项目(DD20190452)

作者简介: 王玉(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染, E-mail: 1422389976@qq.com

* 通信作者, E-mail: xincunlin@163.com; yushihydrogeo@163.com

绝对主成分分数法 (PCA/APCS)^[6]、主成分多元线性回归 (APCS-MLR)^[7] 和 UNMIX^[8] 等受体模型. 其中 PMF 模型最早应用于大气颗粒物的来源分析, 近年来已被扩展至水体和土壤等污染物的源解析^[9].

目前针对土壤重金属含量、来源和潜在生态风险评价方面开展过较多研究工作. Keshavarzi 等^[10] 对伊朗东北部农业土壤重金属使用富集因子法和潜在生态风险指数进行研究, 结果表明 Cu、Zn 和 Mn 元素的富集度很高, 而 Cu 元素具有较高的生态风险; Proshad 等^[11] 评价孟加拉国鲁普萨河表层沉积物中重金属的分布并进行来源识别, 发现冬季沉积物重金属含量高于夏季, 富集因子和地质累积指数表明大部分沉积物样品都受到了 Cd 的严重污染; Bessa 等^[12] 对大西洋喀麦隆林贝海岸边缘沉积物中重金属的浓度和来源进行分析, 结果表明研究区受到中度污染, 风险为低~中度. 赵东杰等^[13] 针对滇黔桂岩溶区河漫滩沉积土壤重金属含量特征、来源和污染状况进行分析, 发现土壤中 Cd、Hg 污染较为严重; 洪涛等^[14] 采用 APCS/MLR 法对云南东南部峰丛洼地地区土壤重金属的来源以及贡献大小进行分析, 结果表明研究区重金属主要有 4 个来源: 化石燃料燃烧、交通运输、自然背景和农业生产; 闫晓露等^[15] 利用潜在生态风险指数法对辽东湾北部

滨海湿地土壤重金属进行研究, 结果表明 Cd 是主要的生态风险因子. 目前国内外土壤重金属污染的研究主要集中在河漫滩、洼地和湿地等区域, 极少涉及丘陵地区^[16,17]. 在我国, 根据文献^[3], 南方土壤污染比北方严重. 其中, 红壤丘陵区是南方土壤土地类型的典型代表性区域^[18], 但目前此类地区土壤重金属污染的研究相对比较匮乏, 且对土壤环境污染现状认识不足. 因此, 本文选取南方某省丘陵区土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 这 8 种重金属元素, 对其含量特征、污染程度和潜在生态风险进行评估, 并利用 PMF 模型对土壤重金属的来源进行解析, 以期为该地区土壤重金属污染的治理和修复提供数据支持和理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位置如图 1 所示. 该区域主要地貌类型以低山和丘陵为主, 局部有中山和低山, 土壤类型以红壤为主, 还有黄壤、紫色土、水稻和草甸土等. 气候类型属亚热带季风湿润气候. 境内富含萤石、钨、煤、金、稀土和石灰石等 20 多种矿产资源, 石灰石和花岗石储积量较大. 研究区土地总面积 2 853 km², 其中山地 2 440 km², 耕地 313 km².



图 1 研究区域及采样点分布示意

Fig. 1 Distribution diagram of study area and sampling sites

1.2 数据来源

本研究于 2017 年夏季采集土壤样品, 综合考虑土地利用类型和地貌类型等因素, 在研究区内采用网格布点与随机布点相结合的方法, 共采集了 60 个点位的土壤样品, 采样时利用 5 点采样法现场混合后装入聚乙烯自封袋密封保存. 土壤样品于 45℃ 以下的烘箱中烘干, 取出动植物残体及碎石等杂物, 四分法取样后用无污染的行星磨粉碎至 0.074

mm, 装袋备用^[19].

称取 0.1 g 土壤样品于聚四氟乙烯坩埚中, 加少量水湿润, 加入氢氟酸、盐酸、硝酸和高氯酸进行热消解, 所有样品消解处理后, 利用电感耦合等离子体原子发射光谱 (ICP-OES) 测定 Ni 和 Cr 元素的含量^[20]; 利用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定 Cd、Cu、Pb 和 Zn 元素的含量^[21]; 利用原子荧光光谱法 (AFS) 测定 As 和 Hg 元素的含量^[22]. 为保

证实验的准确度和精密度,所有样品进行 2 次平行测量,所用试剂均为优级纯,水均为超纯水. 采用国家土壤一级标准物质验证进行质量控制与保证,测定的相对偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内. 土壤样品的 pH 值采用电位法 (ISE) 进行测定.

1.3 评价方法

1.3.1 土壤环境质量评价模型

(1) 单因子污染指数 单因子污染指数可以

表 1 单因子污染指数评价标准

Table 1 Single factor pollution index evaluation standards					
单因子污染指数 (P_i)	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$3 < P_i \leq 5$	$P_i > 5$
污染等级	无污染 (安全)	轻微污染 (警戒线)	轻度污染	中度污染	重度污染

(2) 内梅罗综合污染指数 内梅罗污染指数法能够反映各污染物对土壤的影响,具有突出最大污染物对土壤环境质量的优点^[24]. 公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{avg}}^2 + P_{\text{imax}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_{avg} 为单因子污染指数的平均值; P_{imax} 为单因子污染指数的最大

简单有效地评估重金属污染状况和估计人类活动的影响,是对某一单项污染指标进行分析评价^[23].

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, P_i 为单因子污染指数; C_i 为重金属 i 的实测含量; S_i 为重金属 i 的背景值参考值 (该省土壤元素背景值). 单因子污染指数评价标准见表 1.

值. 综合污染指数评价标准见表 2.

(3) 土壤污染分担率 土壤污染分担率可以评价确定土壤的主要污染项目,污染物分担率从大到小排序,即反映污染物主次顺序^[25].

土壤污染分担率 = $\frac{\text{土壤某项污染指数}}{\text{各项污染指数之和}} \times 100\%$ (3)

表 2 综合污染指数评价标准

Table 2 Comprehensive pollution index evaluation standards					
综合污染指数 ($P_{\text{综}}$)	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	$P_{\text{综}} > 3.0$
污染等级	清洁 (安全)	尚清洁 (警戒线)	轻度污染	中度污染	重度污染

1.3.2 生态风险评价模型

1980 年,由 Hakanson^[26] 提出的潜在生态风险指数评价法,不仅考虑重金属的含量,还要综合考虑多种元素协同作用、毒性水平和环境对重金属污染的敏感性等因素^[2],因此,它被广泛用于评估土壤环境中的潜在生态风险,其计算公式为:

$$RI = \sum E_r^i = \sum [T_r^i \times (P_s^i / P_n^i)] \quad (4)$$

式中, RI 为重金属综合潜在生态危害风险指数; E_r^i 为单种重金属潜在生态危害系数; i 为第 i 种金属; P_s 为重金属质量浓度实测值; P_n 为参考值,以该省土壤背景值为参比; T_r 为毒性响应系数,8 种金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的响应系数分别为: 10、30、2、5、40、5、5 和 1^[13].

Hakanson 提出的 RI 生态风险分级标准是根据 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 和多氯联苯等参数的毒性系数权重之和进行估算,为减少低估研究区土壤中重金属生态风险的可能性,因此,每个生态风险等级对应的 RI 限值根据重金属种类及其毒性系数进行适当调整,调整后的综合潜在生态风险指数等级见表 3^[8,26,27].

表 3 生态风险评价指数与分级标准

Table 3 Ecological risk evaluation index and grading criteria			
E_r^i	单项污染物生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
$E_r^i < 40$	低	$RI < 110$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$110 \leq RI < 220$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$220 \leq RI < 440$	重
$160 \leq E_r^i < 320$	重	$RI \geq 440$	严重
$E_r^i \geq 320$	严重		

1.3.3 土壤重金属污染源解析方法

(1) 相关性分析 相关性分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度. 相关性系数的取值范围为 $-1 \sim 1$,相关系数越接近于 1 或 -1 ,相关度越强;相关系数越接近于 0,相关度越弱. 相关系数大于 0 为正相关;小于 0 为负相关;等于 0 为零相关^[28].

(2) 正定矩阵因子分解模型 正定矩阵因子分解模型 (美国 EPA PMF 5.0) 不需要确定源成分谱和受体成分谱,在因子分解过程中对每个单独的数据点使用误差估计以便更合理处理遗漏和不精确的数据,避免矩阵分解过程中出现负值,使结果更具可靠性^[29],因此本研究采用 PMF 模型来分析土壤中

重金属元素的来源. PMF 作为多变量因子分析模型, 它将受体原始数据矩阵($\mathbf{X}$) 分解为因子得分矩阵($\mathbf{G}$)、因子载荷矩阵($\mathbf{F}$) 和残差矩阵($\mathbf{E}$)^[30], 公式如下:

$$\mathbf{X}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{G}_{ik} \mathbf{F}_{kj} + \mathbf{E}_{ij} \quad (5)$$

式中, p 为因子个数; i 为第 i 个样品; j 为第 j 种元素; $\mathbf{X}_{ij}$ 为 i 个样品 j 种元素浓度构成的 $i \times j$ 矩阵; $\mathbf{G}_{ik}$ 为因子 k 对每个样品 i 的贡献; $\mathbf{F}_{kj}$ 为对于每个来源的物种分布; $\mathbf{E}_{ij}$ 为残差矩阵, 上述计算过程中各参数均无量纲.

在 PMF 模型中, 基于受限加权最小二乘法迭代计算矩阵 $\mathbf{X}$ 的分解, 该模型的主要目标是优化目标函数 Q 并使其最小化, 目标函数 Q 的计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{\mathbf{x}_{ij} - \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj}}{\mathbf{u}_{ij}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{\mathbf{e}_{ij}}{\mathbf{u}_{ij}} \right)^2 \quad (6)$$

式中, $\mathbf{u}_{ij}$ 为第 i 个样品中第 j 个元素浓度的不确定度大小, 不确定度 Unc 根据 EPA PMF 5.0 用户指南估算^[30]:

当每种元素的浓度小于或等于相应的方法检出限(MDL)时, 不确定度值为:

$$\text{Unc} = (5/6) \times \text{MDL} \quad (7)$$

当每种元素的浓度大于相应的 MDL 时, 不确定度值为:

$$\text{Unc} = [(\text{error fraction} \times \text{concentration})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2]^{1/2} \quad (8)$$

式中, error fraction 为误差分数; concentration 为重金属样品浓度; MDL 为方法检出限. 模型运行过程

中, 选取 4~7 个因子分别进行 20 次迭代运算, 需根据物种比例残差、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.

2 结果与讨论

2.1 丘陵区土壤重金属含量分析

研究区的土壤重金属含量统计见表 4, 土壤 pH 的范围为 4.18~6.07, 平均值为 4.98, 呈酸性土壤. 重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的范围分别为 0.55~19.33、0.05~0.59、4.92~98.92、3.03~40.41、0.02~0.15、1.98~40.03、12.87~64.09 和 23.12~110.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 4.25、0.14、49.56、17.55、0.06、17.11、30.82 和 57.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与该省土壤元素背景值^[31]相比, As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 分别有 4、35、30、21、8、27、24 和 17 个点位超过其背景值; 与全国土壤背景值^[32]相比, As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 分别有 4、35、27、16、12、12、29 和 15 个点位超过其背景值. 变异系数可以反映出土壤重金属污染与人类活动之间的关系, 变异系数越大则说明人类活动的参与度越高^[33], 以变异系数为标准对土壤重金属含量变异性进行简单分类: 变异系数小于 10%, 土壤重金属含量呈现弱变异性; 变异系数介于 10%~100% 之间, 土壤重金属含量呈现中等变异性; 变异系数大于 100%, 土壤重金属含量呈现强变异性^[34]. 本研究中重金属元素的变异系数在 10%~100% 之间, 属于中等变异, 表明研究区土壤重金属可能受到人为活动的影响^[14].

表 4 丘陵区土壤重金属含量统计¹⁾ ($n=60$)
Table 4 Soil heavy metal content statistics in hilly areas ($n=60$)

项目	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	该省土壤元素背景值	全国土壤背景值
pH	6.07	4.18	4.98	0.31	1.10	—	6.70
As	19.33	0.55	4.25	3.72	87.53	10.40	11.20
Cd	0.59	0.05	0.14	0.09	64.29	0.10	0.10
Cr	98.92	4.92	49.56	29.69	59.91	48.00	61.00
Cu	40.41	3.03	17.55	8.49	48.38	20.80	22.60
Hg	0.15	0.02	0.06	0.03	50.00	0.08	0.07
Ni	40.03	1.98	17.11	10.97	64.11	19.00	26.90
Pb	64.09	12.87	30.82	11.63	37.74	32.10	26.00
Zn	110.07	23.12	57.28	21.04	36.73	69.00	74.20

1) “—”表示没有相关数据; 除 pH 和变异系数外, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

研究区土壤重金属在不同类型土地中含量有所不同(图 2), 茶园中土壤重金属元素的平均含量最高, 果园最低, 说明茶园较果园重金属元素更富集, 可能是因为施肥等农业措施对茶园土壤重金属元素

的积累有较大的影响^[35], 有学者对该省果园土壤与茶园土壤重金属进行研究发^[36], 果园土壤重金属的含量均未超过无公害农产品的土壤环境要求, 而茶园土壤中, Cr、Hg 和 Pb 含量均明显偏高, 与本研

究相符. 与该省土壤元素背景值相比, 研究区 As 和 Zn 元素在不同类型土壤中的平均含量均低于背景值; Cd 在水田的平均含量高于背景值; Cr 在茶园和林地的平均含量高于背景值, 其中茶园的含量最高; Cu、Hg、Ni 和 Pb 在茶园的平均含量均高于背景值. 茶园土壤中重金属来源于土壤母质, 但同时也受到外源重金属的污染, 如化肥农药的不合理使用以及接近公路受汽车尾气排放等污染^[37], 导致 Cr、Cu、Hg、Ni 和 Pb 的含量较高.

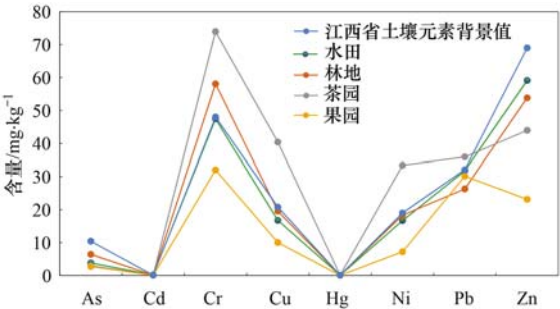


图2 丘陵区不同类型土地中重金属含量变化
Fig. 2 Changes in heavy metal content in different types of land in hilly areas

2.2 丘陵区土壤环境质量评价

通过 P_i 和 $P_{综}$ 的计算结果得出 (表5), As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的单项污染指数的均值为 0.41、1.42、1.03、0.84、0.75、0.90、0.96 和 0.83, 范围分别为 0.05 ~ 1.86、0.50 ~ 5.90、0.10 ~ 2.06、0.15 ~ 1.94、0.30 ~ 1.93、0.10 ~ 2.11、0.40 ~ 2.00 和 0.34 ~ 1.60. 通过 P_i 得出 As、Cu、Hg、Pb 和 Zn 属于无污染 (安全) 和轻微污染 (警戒线), Cr 和 Ni 属于轻度污染, 分别占总样点的 3% 和 2%, Cd 的污染最为严重, 出现了中度和重度污染. 而通过 $P_{综}$ 可以看出研究区轻度、中度、重度污染所占的比例依次为 63%、8% 和 2%, 无污染和轻微污染的样点占 27%.

从各元素的综合污染指数和污染物分担率来看, 土壤污染物分担率最大的是 Cd, 丘陵区土壤重金属污染程度大小排序为: Cd > Cr > Ni > Pb > Cu > Hg > As > Zn, 显示出丘陵区土壤受 Cd 污染较为严重. 该地区生产水稻和茶叶, 可能受化肥和农药施用的影响, 使得 Cd 污染问题引起较多关注^[38].

表5 丘陵区土壤重金属污染指数
Table 5 Heavy metal pollution index of soil in hilly areas

污染指数	元素	最大值	最小值	均值	不同污染级别样点比例/%					各元素综合污染指数	污染物分担率/%
					安全	警戒线	轻度	中度	重度		
P_i	As	1.86	0.05	0.41	93	7	0	0	0	1.35	9.2
	Cd	5.90	0.50	1.42	33	55	5	5	2	4.29	29.2
	Cr	2.06	0.10	1.03	50	47	3	0	0	1.63	11.1
	Cu	1.94	0.15	0.84	67	33	0	0	0	1.50	10.2
	Hg	1.93	0.30	0.75	82	18	0	0	0	1.46	9.9
	Ni	2.11	0.10	0.90	55	43	2	0	0	1.62	11.0
	Pb	2.00	0.40	0.96	60	40	0	0	0	1.57	10.7
	Zn	1.60	0.34	0.83	72	28	0	0	0	1.28	8.7
各监测点综合污染指数 ($P_{综}$)		4.35	0.58	1.36	7	20	63	8	2	—	—

2.3 丘陵区土壤潜在生态风险评价

通过对研究区土壤潜在生态风险进行计算 (表6), 结果显示, 研究区土壤重金属单项潜在生态风险指数 (E_i^i) 平均值的顺序为: Cd > Hg > Pb > Ni > Cu > As > Cr > Zn, 除 Cd 为中等生态风险外, 其余均为低生态风险. 从单个重金属的生态风险等级比例来看, 研究区 6 种重金属 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 均为低生态风险; 重金属 Hg 有 18.33% 的采样点为中等生态风险; Cd 有 25% 的采样点为中等生态风险, 6.66% 的采样点为较重生态风险, 1.67% 的采样点为重度生态风险. 根据综合潜在生态风险指数来看, 60 个采样点的重金属生态风险综合指数为 39.58 ~ 224.15, 低等、中等和重度生态风险所占的比例分别为 73.33%、25% 和 1.67%, 其中重度生态风险的采样点土地利用类型为水田, 其潜在生态风

险程度虽然最高, 但重金属含量较低, 低于该省土壤元素背景值, 这与匡荟芬^[38] 的研究较为一致. 在 8 种重金属元素中, Cd 和 Hg 对研究区土壤重金属综合生态风险指数的贡献最大, 其风险指数之和占综合指数的 77.94%, 表明 Cd 和 Hg 元素是研究区土壤中的主要污染物, 具有较强的生态风险性, 应引起足够的重视并采取保护措施^[13].

2.4 丘陵区土壤重金属污染源解析及相对贡献

2.4.1 相关性分析

研究土壤中重金属的相关性可以推断重金属的来源是否相同, 若各元素之间具有显著正相关, 则表明各元素之间具有相似的来源; 若各元素之间具有显著负相关, 说明各元素的来源存在差异, 甚至有一定的拮抗作用^[9]. 研究区土壤中不同元素之间的相关性分析结果表明 (表7), Ni 与 Cr 和 Zn 存在显著

($P < 0.01$) 的正相关关系,表明这 3 种元素可能具有同一污染源; Cu 和 Cd 之间呈显著性正相关($P < 0.01$),说明这两种元素可能有类似的来源; Cu、Hg 和 Cr 两两之间呈显著性正相关($P < 0.01$),说明这

些元素可能有相似的污染源; Pb 与 As、Cr 和 Ni 之间存在显著负相关,Pb 与 Cd、Cu 和 Hg 无显著相关性,表明 Pb 与其它元素的来源不同甚至可能存在拮抗作用,因此,Pb 可能具有单一来源.

表 6 丘陵区土壤重金属潜在生态风险评价结果

Table 6 Evaluation results of potential ecological risk of soil heavy metals in hilly areas

项目		E_r^i								RI
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
最大值		18.59	175.80	4.12	9.71	77.21	10.53	9.98	1.60	224.15
最小值		0.53	13.77	0.20	0.73	11.91	0.52	2.01	0.34	39.58
平均值		4.09	42.42	2.07	4.22	30.03	4.50	4.80	0.83	92.96
贡献率/%		4.40	45.63	2.23	4.54	32.31	4.84	5.16	0.89	100
生态风险等级比例/%	低	100	66.67	100	100	81.67	100	100	100	73.33
	中等	0	25	0	0	18.33	0	0	0	25
	较重	0	6.66	0	0	0	0	0	0	—
	重	0	1.67	0	0	0	0	0	0	1.67
	严重	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 7 丘陵区土壤中不同元素之间的相关性¹⁾

Table 7 Correlation between different elements in soils of hilly areas

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	-0.020	1						
Cr	0.610 **	0.244	1					
Cu	0.416 **	0.383 **	0.785 **	1				
Hg	0.255 *	0.151	0.339 **	0.354 **	1			
Ni	0.539 **	0.375 **	0.942 **	0.842 **	0.309 *	1		
Pb	-0.264 *	0.187	-0.537 **	-0.174	0.034	-0.393 **	1	
Zn	0.278 *	0.638 **	0.526 **	0.632 **	0.313 *	0.696 **	0.206	1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关($P < 0.05$), ** 表示在 0.01 水平上显著相关($P < 0.01$)

2.4.2 PMF 解析重金属来源

为了进一步分析研究区土壤中重金属的来源,采用 PMF 模型对其来源进行解析. 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^[39]. 本研究数据信噪比均大于 8,说明适合用该模型进行计算. 设定因子数(4~7),将其代入模型依次验证,经过多次运行调试,综合考虑 Q 值、残差值和 R^2 ,当因子数为 6 时,大部分参数值在 -3~3 范围内,计算结果趋于稳定;将实测值与模型预测值进行比较(表 8),发现 Cd 元素的拟合曲线 R^2 为 0.81,而其它重金属的拟合曲线 R^2 均在 0.9 以上,说明测量值与模拟值的相关性很强,拟合结果也很好,该因子具有代表性. 因此,本

文 PMF 源解析的最佳因子数为 6.

研究区土壤重金属污染源解析及贡献率如图 3 和图 4 所示,因子 1 对 Cu、Hg 和 Cr 的贡献率较高,其贡献率分别为 36.5%、35.8% 和 33.9%. 某铜矿位于研究区内,黄铜矿的风化和尾矿堆放会引起 Cu 的积累^[40],矿区开采产生的粉尘会随着大气飘散进入土壤;矿渣运输过程中,运输车辆未采取防渗漏措施,导致洒落在道路上的矿渣会随着雨水径流进入土壤^[41,42],造成土壤污染. 矿渣运输过程中需要大量的运输车辆,Chen 等^[43]发现在交通密度大的道路周围环境中存在 Cr 元素的积累;张爱国等^[44]发现汽车尾气的排放会导致土壤中 Hg 含量过高,通过大气沉降在土壤中积累. 因此,因子 1 代表铜矿采选和交通运输组成的混合源.

因子 2 对 Cu、Cd 和 Pb 的贡献率相对较高,其贡献率分别为 31.2%、24.6% 和 20.5%. 有研究表明,交通排放会造成 Pb 元素的累积,机动车、农业机械和设备会随着铅排放废气,造成土壤污染. 尽管自 2000 年起禁止生产、销售和使用含铅汽油,但铅在土壤中的积累仍然存在^[45];而 Cu 可能来源于发

表 8 实测值与 PMF 模型预测值拟合结果

Table 8 Fitting results of measured values and predicted values of PMF model

元素	斜率	R^2	元素	斜率	R^2
As	1.00	0.99	Hg	0.97	0.99
Cd	0.68	0.81	Ni	0.93	0.97
Cr	1.00	0.97	Pb	1.03	0.99
Cu	0.99	0.99	Zn	0.95	0.93

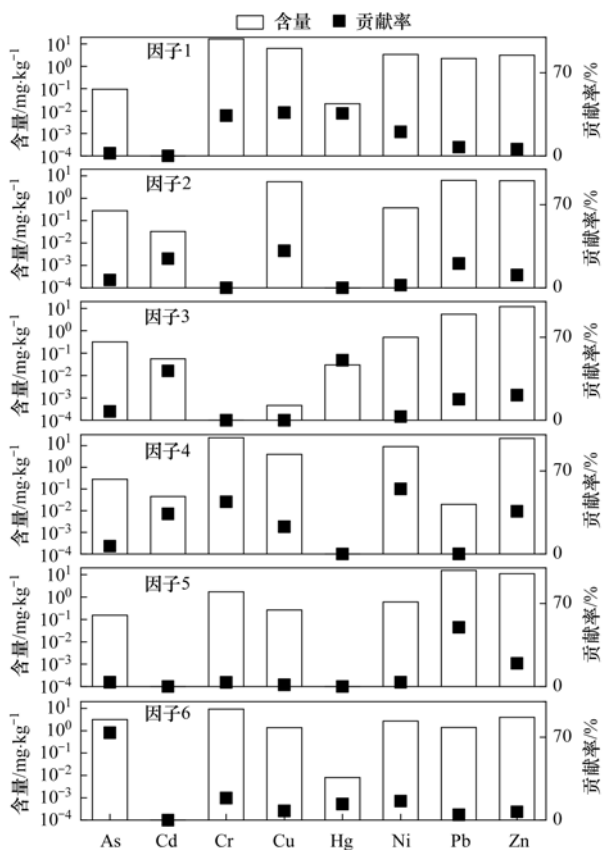


图3 重金属 PMF 源解析贡献

Fig. 3 Contribution of heavy metal PMF source analysis

动机部件的磨损以及汽油的泄漏^[46],Cd 在汽车制造过程中通常被用作电镀层以保护汽车材料不受腐蚀^[47,48].研究区内高速公路、国道、省道和乡道贯穿,交通工具排放的尾气中重金属元素通过大气沉降及空气吸附作用在土壤中积累,从而造成污染.因此,因子2 代表交通源.

因子3 对 Hg 和 Cd 的贡献率相对较高,其贡献率分别为 50.6% 和 41.6%.有研究认为,Hg 是农药和化肥的重要成分,具有挥发性和迁移性,大量使用农药化肥会对土壤造成严重的影响^[9].研究区土壤类型为茶园、林地、水田和果园,上述的分析发现,茶园中土壤重金属元素的平均含量最高,据相关资料显示,该省 80% 以上的茶园施用化肥^[49].Cd 通常来源于农业活动中农药和化肥等的使用^[50],孔樟良等^[51]发现长期施用磷肥对茶园土壤镉污染较为明显,一定程度上造成了重金属 Cd 的积累.因此,因子3 代表农业活动源.

因子4 对 Ni、Cr 和 Zn 的贡献率相对较高,其贡献率分别为 54.8%、44% 和 36%.由丘陵区土壤重金属含量统计表明,土壤中 Ni 和 Zn 元素的平均含量均低于该省土壤元素背景值,Cr 的平均含量为背景值的 1.03 倍,因此 Cr 元素除自然源以外,可能

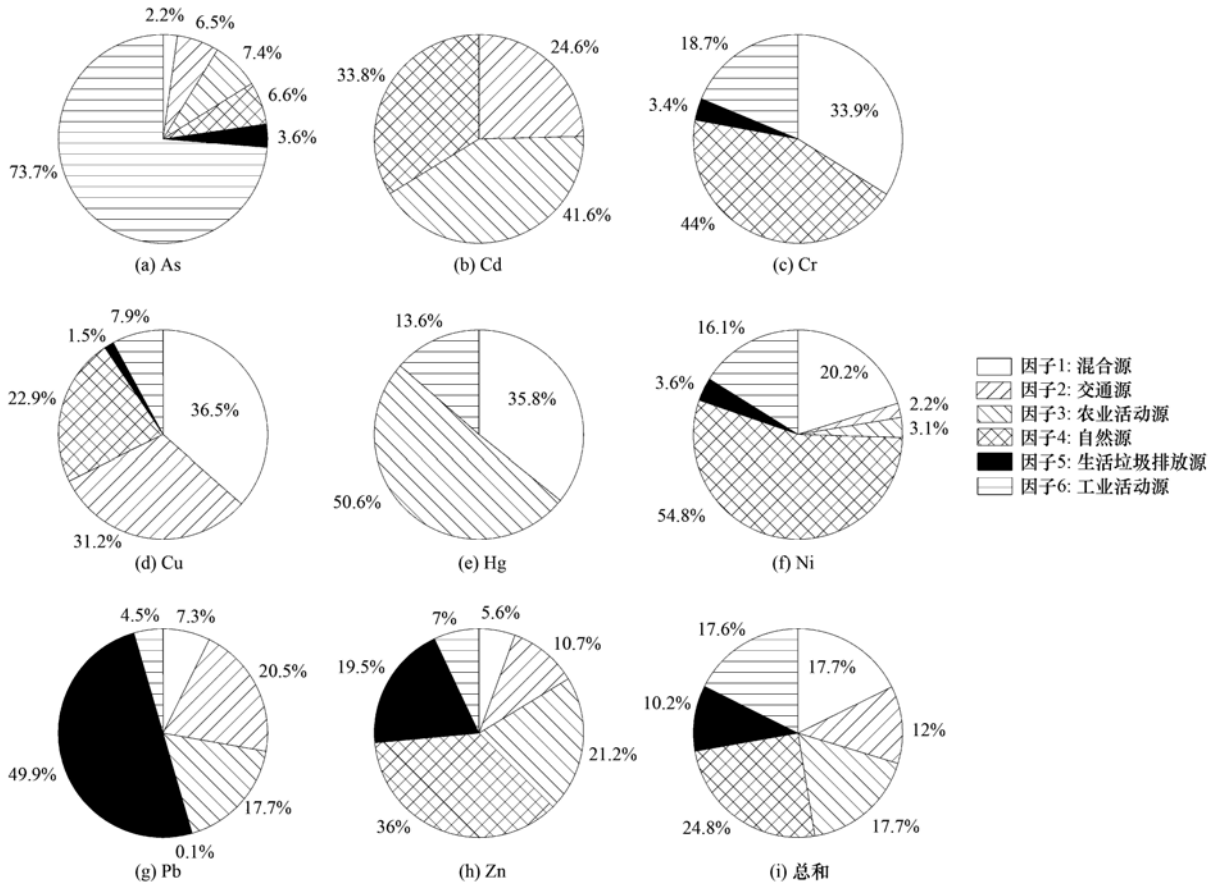


图4 土壤重金属不同污染源贡献率

Fig. 4 Contribution rate of different sources of soil heavy metals

还存在其它来源. 黄华斌等^[52]通过对九龙江流域农田土壤重金属来源的分析, 发现 Ni、Cr 和 Zn 元素为自然源因子. 除此之外, 还有大量研究表明 Ni、Cr 和 Zn 主要来源于土壤母质, 如针对南方丘陵区酸性土壤^[16]、武夷岩茶土壤^[53]和哈尔滨市土壤^[54]等研究都与本研究的结论较为一致. 因此, 因子 4 代表土壤母质即自然源.

因子 5 对 Pb 的贡献率相对较高, 其贡献率为 49.9%. 生活垃圾及其渗滤液中的重金属离子极易污染土壤^[55]. 有研究表明, 塑料类、厨余和灰土类是村镇生活垃圾中 Pb 的主要来源^[55, 56]. 研究区内某村存在将生活垃圾堆放在河边以及处理不当的问题, 据调查显示^[57], 研究区生活垃圾主要以厨余湿垃圾和干垃圾为主, 绝大部分任意堆积, 没有相应的清运和处理措施, 经雨水冲刷随地表径流进入附近土壤中. 因此, 因子 5 代表生活垃圾排放源.

因子 6 对 As 的贡献率相对较高, 其贡献率为 73.7%. 有研究表明, 土壤中重金属 As 的含量主要与煤等化石燃料的燃烧有关, 化石燃料的燃烧使大量的烟尘进入空气之中, 烟尘中的重金属随气流扩散并沉积在周围的土壤中^[58]. 研究区内有页岩砖厂和水泥制品厂等工业企业, 在生产过程中燃煤的使用导致排放的废气和粉煤灰通过大气沉降进入土壤, 导致了 As 元素的积累^[9, 59]. 因此, 因子 6 为工业活动源.

以上的研究得出, 研究区土壤重金属主要的污染源为自然源、农业活动源、铜矿采选和交通运输组成的混合源、工业活动源、交通源和生活垃圾排放源, 这 6 种来源的综合贡献率分别为 24.8%, 17.7%, 17.7%, 17.6%, 12.0% 和 10.2% (图 4). 总之, 人为活动起着主导作用, 大约 75.2% 的污染是由人为因素造成的, 特别是农业、铜矿采选及交通运输和工业活动是研究区重金属污染的主要来源.

3 结论

(1) 南方某省和全国土壤元素背景值对比, 各种重金属元素均有所超出; 在不同类型土地中重金属的含量有所不同, 茶园中土壤重金属元素的平均含量最高.

(2) 单因子污染指数显示, 研究区大多数重金属为无污染和轻微污染; 内梅罗综合污染指数显示, 土壤重金属呈现轻度、中度和重度污染的样点分别占 63%、8% 和 2%, 无污染和轻微污染的样点占 27%; 污染物分担率显示, 土壤受 Cd 污染较为严重.

(3) 研究区 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 这 6 种重金属为低生态风险, Cd 和 Hg 中度及以上风险等级分别占 33.33% 和 18.33%, 其中 Cd 重度生态风险等级占 1.67%. 重金属综合潜在生态风险指数的结果显示, Cd 和 Hg 是研究区土壤中生态风险最高的重金属.

(4) 通过 PMF 模型得出 6 个污染源: 铜矿采选和交通运输组成的混合源是 Cu、Hg 和 Cr 的主要污染来源, 贡献率分别为 36.5%、35.8% 和 33.9%; 交通源是 Cu、Cd 和 Pb 的主要污染来源, 贡献率分别为 31.2%、24.6% 和 20.5%; 农业活动源是 Hg 和 Cd 的主要污染来源, 贡献率分别为 50.6% 和 41.6%; 自然源是 Ni、Cr 和 Zn 的主要污染来源, 贡献率分别为 54.8%、44.0% 和 36.0%; 生活垃圾排放源是 Pb 的主要污染来源, 贡献率为 49.9%; 工业活动源是 As 的主要污染来源, 贡献率为 73.7%.

参考文献:

- [1] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [2] 田威, 李娜, 倪才英, 等. 江西省稻渔系统中土壤和稻谷重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(3): 331-339.
Tian W, Li N, Ni C Y, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals pollution in soil and rice for Jiangxi rice-fish Co-culture system[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(3): 331-339.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部国土资源部, 2014.
- [4] Huang Y, Deng M H, Wu S F, et al. A modified receptor model for source apportionment of heavy metal pollution in soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 354: 161-169.
- [5] 董驷睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 2103-2111.
Dong L R, Hu W Y, Huang B, et al. Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. China Environmental Science, 2015, 35(7): 2103-2111.
- [6] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4749-4756.
Wang R, Deng H, Yan M S, et al. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in southern Youyang County, Chongqing[J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4749-4756.
- [7] 霍明珠, 高秉博, 乔冬云, 等. 基于 APCS-MLR 受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 978-986.
Huo M Z, Gao B B, Qiao D Y, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soil based on the APCS-MLR model

- [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(5): 978-986.
- [8] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1421-1429.
- Lu X, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1421-1429.
- [9] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- Chai L, Wang X, Ma L, *et al.* Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- [10] Keshavarzi A, Kumar V. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soils of northeastern Iran [J]. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2020, **4**(2): 87-103.
- [11] Proshad R, Kormoker T, Islam S. Distribution, source identification, ecological and health risks of heavy metals in surface sediments of the Rupsa River, Bangladesh [J]. *Toxin Reviews*, 2021, **40**(1): 77-101.
- [12] Bessa A Z E, Ngueutchoua G, Janpou A K, *et al.* Heavy metal contamination and its ecological risks in the beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon) [J]. *Earth Systems and Environment*, 2021, **5**(2): 433-444.
- [13] 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.
- [14] 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞. 滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- Hong T, Kong X S, Yue X F. Concentration characteristics, source analysis, and potential ecological risk assessment of heavy metals in a peak-cluster depression area, southeast of Yunnan province [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- [15] 闫晓露, 孙才志, 胡远满, 等. 围垦对辽东湾北部滨海湿地土壤重金属含量的影响及生态风险评价[J]. *生态学报*, 2021, **41**(3): 1055-1067.
- Yan X L, Sun C Z, Hu Y M, *et al.* Effect of reclamation on soil heavy metal content of coastal wetland and ecological risk assessment in northern Liaodong Bay, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 1055-1067.
- [16] 李杰, 朱立新, 战明国, 等. 南方典型丘陵区酸性土壤重金属地球化学分布特征及来源分异解析[J]. *地质学报*, 2016, **90**(8): 1978-1987.
- Li J, Zhu L X, Zhan M G, *et al.* The geochemical distribution characteristics and source analysis of heavy metals in the typical hilly acidic soil region of South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, **90**(8): 1978-1987.
- [17] 郑国璋. 陕北黄土丘陵区农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(6): 1491-1495.
- Zheng G Z. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the farmland soils in loess hilly area of north Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(6): 1491-1495.
- [18] 邹金浪, 谢花林, 杨子生, 等. 基于 USLE 的土壤侵蚀敏感性评价及其空间自相关分析——以江西省兴国县为例[J]. *农业现代化研究*, 2011, **32**(6): 761-765.
- Zou J L, Xie H L, Yang Z S, *et al.* Assessment of soil erosion sensitivity and its spatial autocorrelation analysis based on USLE: a case study of Xingguo County in Jiangxi Province [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, **32**(6): 761-765.
- [19] 郑雄伟, 洪波, 张元培, 等. 湖北省潜江市北部表层土壤硒元素分布特征及其影响因素探讨[J]. *资源环境与工程*, 2019, **33**(4): 486-490.
- Zheng X W, Hong B, Zhang Y P, *et al.* Discussion on distribution characteristics of selenium in surface soil and its influencing factors in northern Qianjiang City, Hubei Province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2019, **33**(4): 486-490.
- [20] 汪丹, 何恬叶, 胡子文. 电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤中 10 种重金属[J]. *化学分析计量*, 2018, **27**(3): 28-31, 43.
- Wang D, He T Y, Hu Z W. Determination of 10 kinds of heavy metals in soil by inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2018, **27**(3): 28-31, 43.
- [21] 乐淑葵, 段永梅. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定土壤中的重金属元素[J]. *中国无机分析化学*, 2015, **5**(3): 16-19.
- Le S K, Duan Y M. Determination of heavy metal elements in soil by ICP-MS [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2015, **5**(3): 16-19.
- [22] 陈婉霞. 利用原子荧光法测定土壤中汞、砷元素样品前处理方法的研究[J]. *世界有色金属*, 2017, (23): 242-243.
- Chen W X. Study on the pretreatment method for the determination of mercury and arsenic in soil by atomic fluorescence spectrometry [J]. *World Nonferrous Metals*, 2017, (23): 242-243.
- [23] Chai L, Wang Y H, Wang X, *et al.* Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107507.
- [24] 孙贤斌, 李玉成. 基于 GIS 的淮南煤矿废弃地土壤重金属污染生态风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(2): 348-352.
- Sun X B, Li Y C. Potential ecological risk assessment of heavy metal distribution in the Datong deserted coal mining area in Huainan based on GIS [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(2): 348-352.
- [25] 孙淑芹. 福州市典型工业区土壤污染特征分析及其评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- Sun S Q. Characteristics and assessment of pollution in soil near the typical industry area in Fuzhou [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] 王帅, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江河口表层沉积物中重金属污染评价及来源[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(10): 1110-1118.
- Wang S, Hu G R, Yu R L, *et al.* Pollution assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments from Jiulong River estuary [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(10): 1110-1118.
- [28] 张婉军, 辛存林, 于爽, 等. 柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4234-

- 4245.
- Zhang W J, Xin C L, Yu S, *et al.* Spatial and temporal distribution and pollution evaluation of soluble heavy metals in Liujiang River basin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4234-4245.
- [29] 于旦洋, 王颜红, 丁茯, 等. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较[J]. *土壤通报*, 2021, **52**(4): 1000-1008.
- Yu D Y, Wang Y H, Ding F, *et al.* Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in China in last ten years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(4): 1000-1008.
- [30] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington: Environmental Protection Agency, 2014.
- [31] 徐光炎, 何纪力, 郭依勤, 等. 江西省地区土壤环境质量评价标准[J]. *中国环境监测*, 1992, **8**(3): 6-8.
- [32] 邹勇军, 胡小娟, 汪成铎, 等. 江西省赣县沙地土壤重金属的来源及环境等级评价[J]. *中国煤炭地质*, 2018, **30**(11): 66-73.
- Zou Y J, Hu X J, Wang C B, *et al.* Study on soil heavy metal source and environmental grade assessment in Shadi township, Ganxian County, Jiangxi Province[J]. *Coal Geology of China*, 2018, **30**(11): 66-73.
- [33] 李伟, 布多, 孙晶, 等. 拉萨巴嘎雪湿地土壤重金属分布及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2021, **40**(1): 195-203.
- Li W, Bu D, Sun J, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in the surface sediments of Bagaxue wetlands in Lhasa[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(1): 195-203.
- [34] 曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 等. 贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(1): 102-113.
- Zeng Q Q, Fu T L, Zou H Q, *et al.* Spatial distribution characteristics and sources of heavy metals in soil in a pepper growing area of county in Guizhou province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(1): 102-113.
- [35] 李仪, 章明奎. 杭州西郊茶园土壤重金属的积累特点与来源分析[J]. *广东微量元素科学*, 2010, **17**(2): 18-25.
- Li Y, Zhang M K. Characterizing accumulation and sources of soil heavy metals in tea gardens in western suburb of Hangzhou [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2010, **17**(2): 18-25.
- [36] 徐昌旭, 苏全平, 李建国, 等. 江西耕地土壤重金属含量与污染状况评价[A]. 见: 全国耕地土壤污染监测与评价技术研讨会论文集[C]. 海拉尔: 农业部环境监测总站, 2006.
- [37] 张惠, 马立锋, 伊晓云, 等. 典型绿茶茶园土壤重金属空间分布特性及环境质量评价[J]. *浙江农业科学*, 2015, **56**(9): 1385-1391.
- [38] 匡芸芬. 鄱阳湖区沉积物和土壤重金属污染特征、风险评价及源解析[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- Kuang H F. Pollution characteristics, risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments and soils of Poyang Lake area[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [39] 左锐, 汪立娜, 曹阳, 等. 基于正定矩阵分解的傍河水源地区土壤重金属污染源分析[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(4): 464-471.
- Zuo R, Wang L N, Cao Y, *et al.* Sources apportionment of soil pollution of heavy metals in riverside water source field based on positive matrix factorization method[J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(4): 464-471.
- [40] Song S M, Mathur R, Ruiz J, *et al.* Fingerprinting two metal contaminants in streams with Cu isotopes near the Dexing mine, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **544**: 677-685.
- [41] 张怡. 江西德兴铜矿地区重金属元素污染现状及对环境影响分析[J]. *中国金属通报*, 2019, (11): 142, 144.
- [42] 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): 139-175, 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): 139-175, 205.
- [43] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an second ringroad, NW China using multivariate statistical methods [J]. *Catena*, 2012, **98**: 73-78.
- [44] 张爱国, 魏兴萍. 西南典型岩溶槽谷土壤重金属污染与来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(12): 166-176.
- Zhang A G, Wei X P. Pollution and source analysis of heavy metals in soils of typical Karst troughs in Southwestern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(12): 166-176.
- [45] Guan Q Y, Wang F F, Xu C Q, *et al.* Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: a case study in Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Chemosphere*, 2018, **193**: 189-197.
- [46] Cheng Z, Chen L J, Li H H, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 621-629.
- [47] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [48] 徐玉玲, 冯巩固, 蒋晓煜, 等. 兰州市某交通干道土壤重金属分布特征及其对绿化植物的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(4): 1341-1348.
- Xu Y L, Feng G L, Jiang X Y, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in soil and its influence on greening plants in a main road of Lanzhou City, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(4): 1341-1348.
- [49] 孙永明, 叶川, 张昆, 等. 江西省茶叶产业发展分析报告[J]. *江西农业学报*, 2016, **28**(8): 110-114.
- Sun Y M, Ye C, Zhang K, *et al.* Report on development of tea industry in Jiangxi Province [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016, **28**(8): 110-114.
- [50] 陈志凡, 化艳旭, 徐薇, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田重金属污染源解析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 276-283.
- Chen Z F, Hua Y X, Xu W, *et al.* Analysis of heavy metal pollution sources in suburban farmland based on positive definite matrix factor model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 276-283.
- [51] 孔樟良, 谢国雄. 杭州市典型茶园土壤与茶叶中重金属的积累与来源分析[J]. *中国农学通报*, 2015, **31**(10): 226-231.
- Kong Z L, Xie G X. Accumulation and sources of heavy metals in soil and tea-leaf in typical tea gardens in Hangzhou [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, **31**(10): 226-231.

- [52] 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.
- [53] 叶宏萌, 李国平, 郑茂钟, 等. 武夷岩茶土壤铬、锌、镍元素的生物有效性及其影响因素[J]. 福建农业学报, 2019, **34**(6): 711-718.
Ye H M, Li G P, Zheng M Z, *et al.* Factors affecting bioavailability of chromium, zinc and nickel in soil at Wuyi rock tea plantations [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, **34**(6): 711-718.
- [54] 张慧, 郑志志, 马鑫鹏, 等. 哈尔滨市土壤表层重金属污染特征及来源辨析[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(10): 1597-1606.
Zhang H, Zheng Z Z, Ma X P, *et al.* Sources and pollution characteristics of heavy metals in surface soils of Harbin City[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(10): 1597-1606.
- [55] 靳琪, 高红, 岳波, 等. 村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4385-4392.
Jin Q, Gao H, Yue B, *et al.* Heavy metal content of rural living solid waste and related source and distribution analysis [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4385-4392.
- [56] 银燕春, 王莉淋, 肖鸿, 等. 成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 392-400.
Yin Y C, Wang L L, Xiao H, *et al.* Characteristics and sources of heavy metal pollution in urban, suburban and rural domestic waste of Chengdu, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(1): 392-400.
- [57] 周颖. 农村生活垃圾分类焚烧处理的环境效益分析——以江西省兴国县高兴镇为例[D]. 南昌: 江西农业大学, 2011.
Zhou Y. The environmental benefit analysis of classified rural waste burned——Gao Xing Zhen of Xing Guo in Jiangxi Province as an example [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2011.
- [58] 尹芳, 封凯, 尹翠景, 等. 青海典型工业区耕地土壤重金属评价及源解析[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 5217-5226.
Yin F, Feng K, Yin C J, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal in cultivated soil around typical industrial district of Qinghai Province[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(11): 5217-5226.
- [59] 韩琳, 徐夕博. 基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5114-5124.
Han L, Xu X B. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5114-5124.

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)