

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

四川盆地典型农耕区土壤重金属含量、污染及其影响因素

刘属灵^{1,2}, 吴梅^{1,2}, 刘志远¹, 刘双燕¹, 刘永林^{1,2*}, 赵家宇^{1,2}, 刘怡^{1,2}

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 重庆师范大学 GIS 应用研究重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 以重庆市江津区为研究区, 采集 247 件表层土壤样品, 综合运用污染指数法、GIS 和地理探测器等分析方法以便阐明四川盆地典型农耕区土壤重金属含量、污染特征及其影响因素。结果表明: ①表层土壤中 Cd、Cu 和 Zn 的算术均值分别是渝西地区土壤背景值的 1.22、1.10 和 1.98 倍。②6 种重金属含量高值区主要分布于研究区北部、西部和中部局部地区, 低值区分布于东部和南部。③土壤污染指数整体以安全和警戒为主, 内梅罗综合污染指数(NPI)评价显示污染样点占总样点的 22.1%, NPI 最高值位于北部鼎山街道, 最低值位于南部四面山镇。④地层对土壤重金属含量分布的单因子解释力最强, 其次是地形因子; 地层和地形因子对土壤重金属含量分布的交互影响作用最强。研究结果发现地层和地形因子是影响研究区土壤重金属含量分布的关键因素。

关键词: 重金属; 空间分布; 污染特征; 地层; 地理探测器

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0347-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202201193

Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin

LIU Shu-ling^{1,2}, WU Mei^{1,2}, LIU Zhi-yuan¹, LIU Shuang-yan¹, LIU Yong-lin^{1,2*}, ZHAO Jia-yu^{1,2}, LIU Yi^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to identify heavy metal contents, the pollution characteristics and influencing factors of soil in typical farming areas in the Sichuan basin were analyzed, with Jiangjin District of Chongqing City chosen as the study area. Two hundred and forty-seven topsoil samples were collected and analyzed using the Nemerow index (NPI), geographical information system (GIS), and geodetector method. The results demonstrated that: ① the arithmetic means of Cd, Cu, and Zn in the topsoil were 1.22, 1.10, and 1.98 times that of the soil background values in western Chongqing, respectively. ② The high-value areas of the six heavy metals were mainly distributed in the northern, western, and central Jiangjin district, whereas the low-value areas were distributed in the eastern and southern Jiangjin district. ③ The NPI showed that the polluted sample points accounted for 22.1% of the total sample points, indicating that the overall soil pollution was mainly safety and vigilance in general. The high value of NPI was distributed in Dingshan street in the northern Jiangjin district. ④ The explanatory power of stratum on the distribution of heavy metal contents in the topsoil was the strongest, followed by that of the topographic factor. The interaction effect of the stratum and topographic factors on the distribution of heavy metal content in soil was the strongest. The results showed that the stratum and topographic factors were the key factors affecting the distribution of soil heavy metal contents in the study area.

Key words: heavy metals; spatial distribution; pollution characteristics; stratum; geodetector

土壤是陆地生态系统的重要组成部分,也是人类生存和发展的重要基础,在生态系统中起着重要的物质交换作用^[1]。据文献[2,3],我国城市、城郊和农村均存在不同程度的土壤重金属污染问题,涉及我国 83.9% 的省份和 22.5% 的地级市。由于重金属具有难降解、易累积和持久性等特征^[4],土壤重金属污染会改变土壤的理化性质,破坏生态环境,甚至导致灾难性的环境问题^[3]。此外,土壤重金属也会通过食物链被人体吸收和积累,危害人体健康^[5,6]。因此,土壤重金属污染所带来的环境问题日益受到学者和政府部门的重视。

自然因素和人为因素通过直接或间接过程影响土壤重金属累积及其污染的空间分异^[1,7]。自然状况下,成土母岩是土壤重金属的主要来源,可决定土

壤重金属含量、富集^[8,9],如:震旦纪和寒武纪黑色岩系发育的土壤 As 和 Cd 含量较高^[9];但随着成土过程加深,土壤性质对重金属富集逐渐增强,如:广西喀斯特区土壤 Cd 污染^[1,9]。随着社会发展,人类活动对土壤重金属含量影响增强^[1,3,10]。农业活动是人类活动的主要表现^[10],其主要通过化肥和农药等直接增加土壤重金属含量,或间接改变土壤 pH 和有机质含量等影响土壤重金属含量累积和空间分布^[10,11]。

四川盆地是我国重要的农耕区^[12,13]。有研究报

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502329); 重庆市教育委员会科学技术计划青年项目(KJZDK202100504, KJQN201900519); 重庆师范大学研究生科研创新项目(YKC21061)

作者简介: 刘属灵(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染与防治, E-mail: liushuling110407@163.com

* 通信作者, E-mail: liu3986130@163.com

道了四川盆地西部土壤中 Cd、Cu 和 Zn 等含量分布特征^[7],但四川盆地富硒土壤中重金属含量富集、污染特征及其影响因素研究尚不清晰.为此,以重庆市的粮食主产区且土壤富硒的江津区为研究区^[14],以土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 为研究对象,综合运用污染指数法、GIS 及地理探测器等分析方法,研究土壤重金属含量分布、污染特征及其影响因素.其具体研究目标为:①明确重庆市江津区表层土壤中 6 种重金属含量分布和污染特征;②厘清表层土壤重金属含量分布差异的关键影响因素.以为区域生态环境风险评价、区域土壤污染防治和人体健康风险管控等提供理论依据和基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江津区位于重庆市西南部(图 1),年均气温 18.4℃,年均降水量 1001 mm^[15,16].地形以山地和丘陵为主,地势由南北向长江河谷降低[图 2(d)]^[15].

地质构造上,研究区位于“川东褶皱”与“川黔南北构造带”过渡带^[17].白垩纪地层岩性以砂岩为主,分布于研究区南部的倒置中低山区;侏罗纪地层岩性以泥岩为主,主要分布于中部丘陵地带;早中三叠世地层岩性为砂质页岩和深灰色灰岩,三叠纪晚期地层岩性为碎屑岩,分布于北部背斜低山区[图 2(a)]^[14].土壤类型有水稻土、紫色土、黄壤和冲积土等[图 2(c)]^[15,18].

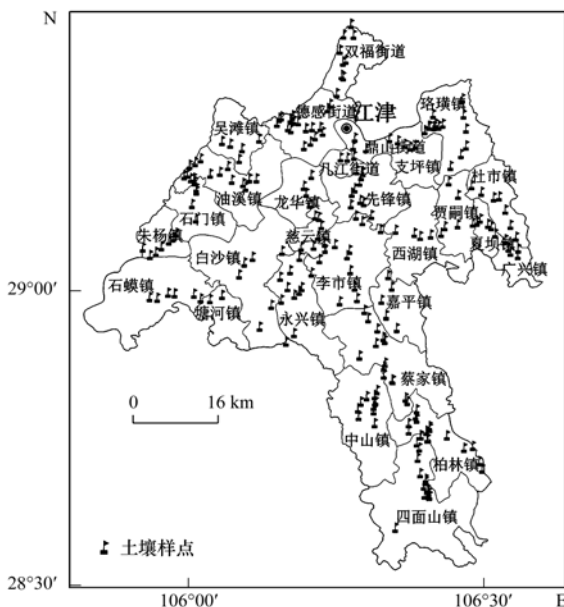


图 1 研究区域及采样点

Fig. 1 Map for soil sampling sites in study area

1.2 样品采集和室内分析

以地层为采样单元,兼顾土地利用方式,采集表层土壤样品 247 件(图 1),其中水田 41 件、旱地 121 件、园地 18 件、林地 57 件和草地 10 件.样品在室内自然风干,剔除土壤中植物根系、小碎石等杂质,研磨棒打碎土壤团块,过 2.0 mm 孔径筛(10 目),研磨至 0.149 mm(100 目)待测.氢氟酸、浓硝酸和高氯酸消解土壤样品,电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量^[19].超纯水为浸提液(水:土=2.5:1),采用玻璃电极法测定土壤 pH^[20].本实验过程中,使用两组空白样,两组土壤标准物质(GSS-1、GSS-3 或 GSS-6)与样品同时消解和分析测试,以控制实验质量.

1.3 影响因素获取

依据土壤发育过程理论,结合研究区地理环境,选取地层、土壤性质(pH 和土壤类型)、地形因素[海拔、坡度、坡向、TWI(地形湿度指数)]和土地利用等 8 个环境因子(图 2).地层数据源自 1:20 万地质图;海拔和土地利用数据源自野外现场调查.坡度、坡向和 TWI 基于 30 m 分辨率数字高程模型(DEM)提取.土壤类型数据(源自 <http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)经裁剪和提取后获取.

1.4 研究方法

1.4.1 污染指数法

污染指数法用于评价研究区土壤重金属污染状况^[21~23].土壤环境质量标准采用农用地土壤污染风险筛选值^[24].单因子污染指数(P_i)分级标准为: $P_i \leq 1$ 无污染; $1 < P_i \leq 2$ 轻污染; $2 < P_i \leq 3$ 中污染; $P_i > 3$ 重污染^[21].内梅罗综合污染指数(NPI)分级标准为:NPI ≤ 0.7 清洁(安全); $0.7 < \text{NPI} \leq 1.0$ 尚清洁(警戒线); $1.0 < \text{NPI} \leq 2.0$ 轻污染; $2.0 < \text{NPI} \leq 3.0$ 中污染; $\text{NPI} > 3.0$ 重污染^[22,23].

1.4.2 地理探测器

地理探测器(geodetector)是基于空间分异理论的空间关联探测模型^[25,26].本文主要运用因子探测器和交互探测器 2 个子模块定量识别土壤重金属空间分异的关键影响因子及不同地理因子对土壤重金属空间分异的交互影响.各地理因子重分类见表 1.

1.4.3 数据处理

Excel 2013 用于土壤重金属含量数据统计. ArcGIS 10.2 用于提取地理因子和分析土壤重金属空间分布. OriginLab 2019 和 CorelDRAW X7 用于制图.

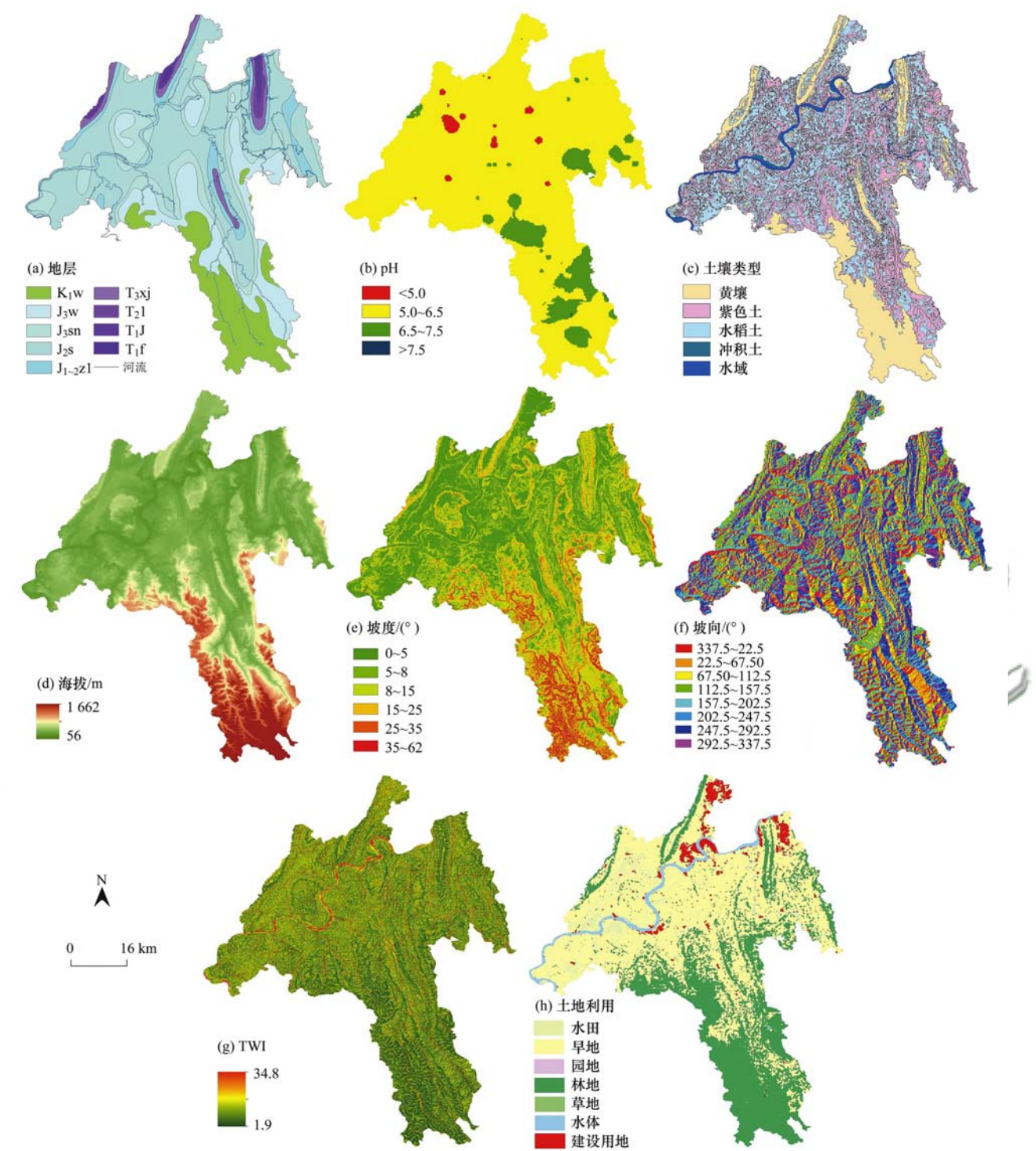


图2 研究区土壤重金属影响因素空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of influencing factors of soil heavy metals in the study area

表1 研究区影响因子重分类

Table 1 Research area impact factor reclassification										
因子	1	2	3	4	5	6	7	8	9	分段方法
地层	K ₁ w	J ₃ p	J ₃ sn	J ₂ s	J ₁₋₂ zl	T ₃ xj	T ₂ l	T ₁ j	T ₁ f	文献[27]
海拔/m	101 ~ 199	200 ~ 299	300 ~ 399	400 ~ 499	500 ~ 599	600 ~ 699	700 ~ 799	800 ~ 899	900 ~ 999	相等间隔
坡度/(°)	0 ~ 0.5	0.5 ~ 2	2 ~ 5	5 ~ 15	15 ~ 35	—	—	—	—	文献[28]
坡向/(°)	338 ~ 22	23 ~ 67	68 ~ 112	113 ~ 157	158 ~ 202	203 ~ 247	248 ~ 292	293 ~ 337	—	相等间隔
TWI	0 ~ 4	4.1 ~ 5	5.1 ~ 6	6.1 ~ 7	7.1 ~ 8	8.1 ~ 9	9.1 ~ 10	10.1 ~ 12	12.1 ~ 16	自然间断点
pH	<5.0	5.0 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	>7.5	—	—	—	—	—	文献[29]
土壤类型	紫色土	水稻土	黄壤	冲积土	—	—	—	—	—	文献[30]
土地利用	水田	旱地	园地	林地	草地	—	—	—	—	文献[31]

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征

研究区表层土壤 pH 为 4.06 ~ 7.92,算术均值(均值,下同)6.06,呈弱酸性.研究区 6 种重金属元素的含量均值分别为 Cd($0.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cr($60.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cu ($26.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Pb ($22.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Ni ($25.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 Zn ($166\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).Cr、Ni 和 Pb 含量均值低于渝西土壤背

景值^[32],而 Cd、Cu 和 Zn 含量均值分别为渝西土壤背景值的 1.22、1.10 和 1.98 倍,但与中国土壤背景值^[33]相比,Cd、Cu 和 Zn 含量均值是其 2.45、1.37 和 2.96 倍.以上表明,研究区土壤部分重金属具有一定程度的富集现象,尤其是 Cd 和 Zn.

变异系数(CV)反映土壤重金属空间变异程度,CV 值越大则土壤重金属分布越不均匀^[7,34,35].Zn、Cd 和 Cu 属于高度变异水平($\text{CV} > 36\%$)(表 2),Pb、Cr 和 Ni 属于中度变异水平($16\% < \text{CV} <$

表 2 研究区表层土壤重金属含量统计¹⁾

Table 2 Statistics of heavy metal content in surface soil of the study area							
特征参数	pH	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值	4.06	0.01	16.8	5.77	7.59	6.94	40.5
最大值	7.92	0.80	105	82.3	49.2	56.5	2 202
中位值	6.15	0.25	59.6	25.2	25.2	21.7	123
算术均值	6.06	0.27	60.5	26.8	25.9	22.4	166
标准差	0.70	0.12	15.5	9.96	6.54	6.77	168
CV	11.6	44.4	25.6	37.2	25.3	30.2	101
渝西土壤背景值 ^[32]	6.48	0.22	71.6	24.4	33.1	28.0	84.0
K_1	—	1.22	0.84	1.10	0.78	0.80	1.98
中国土壤背景值 ^[33]	—	0.11	56.2	19.6	23.5	25.4	56.1
K_2	—	2.45	1.08	1.37	1.10	0.88	2.96

1) pH 值无单位,重金属单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,CV 单位为%, K_1 表示土壤重金属含量均值与渝西土壤背景值的比值, K_2 表示土壤重金属含量均值与中国土壤背景值的比值

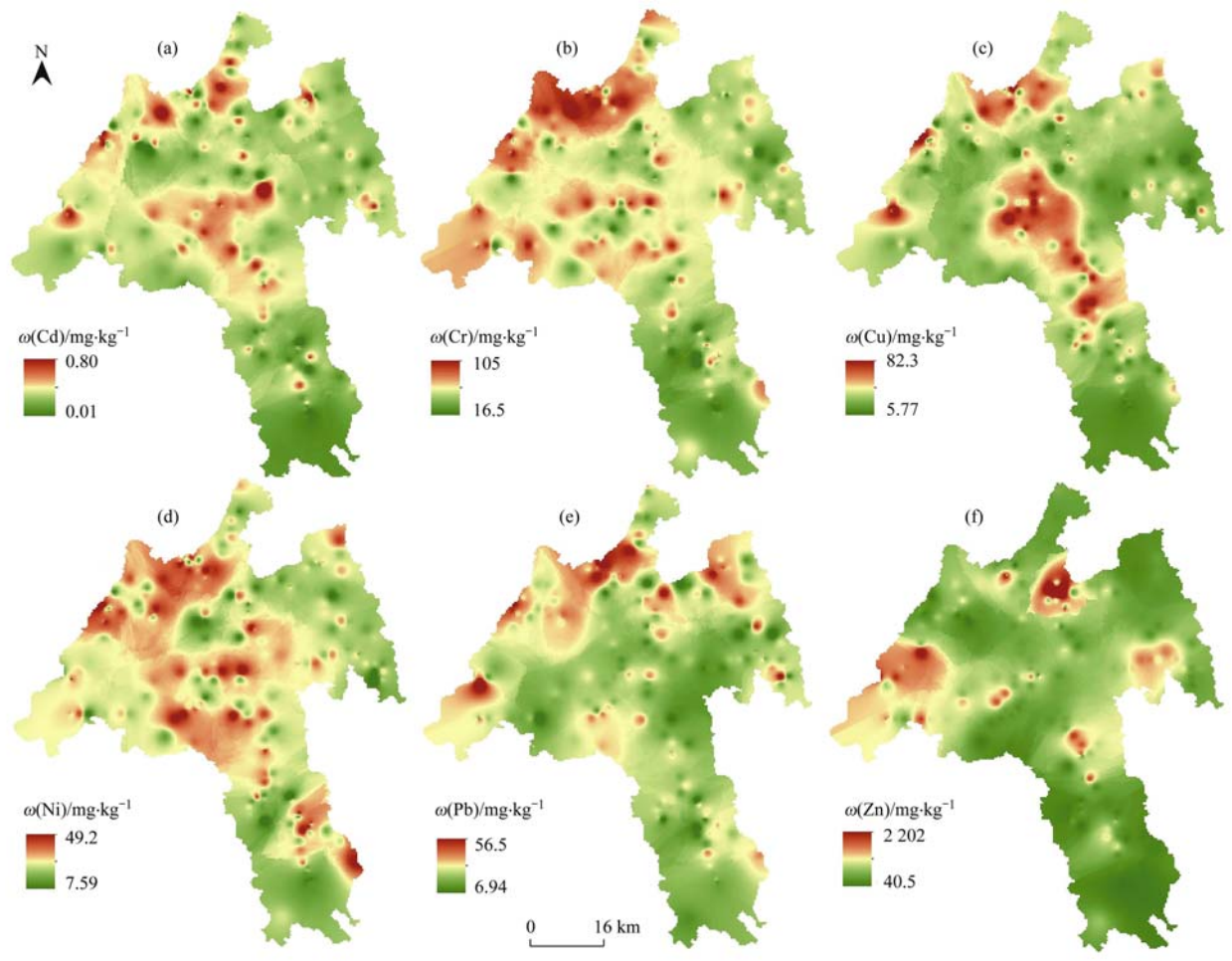


图 3 研究区土壤重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metals in the study area

36%), 表明研究区土壤重金属受到一定程度人为活动干扰。

2.2 土壤重金属空间分布特征

整体上, 研究区鼎山街道、德感街道和石门镇土壤重金属含量较高, 南部四面山镇和中山镇土壤重金属含量较低(图3)。具体来看, Cd 和 Cu 在研究区西北部和中部存在局部偏高现象, 其他区域含量较低[图3(a)和3(c)]。Cr 和 Ni 在研究区南部和东部含量相对较低, 其他区域含量较高, 最高值位于德感街道[图3(b)和3(d)]。Pb 和 Zn 在研究区北部与西部存在局部含量偏高, 而其他区域含量较低[图3(e)和3(f)]。

2.3 土壤重金属污染评价

P_i 评价结果如图4所示, 研究区6种重金属元素的 P_i 均值分别为: Cd(0.89)、Zn(0.80)、Cu(0.47)、Cr(0.38)、Ni(0.35)和Pb(0.25)。研究区土壤Cd、Zn和Cu分别有29.6%、21.5%和1.62%样点超过安全线($P_i > 1$), 其中Zn有3个重度污染点, Cd和Zn元素分别存在4个和10个中度污染点, Cd、Zn和Cu元素分别存在69个、40个和4个轻度污染点。Cr、Ni和Pb全部样点无污染。

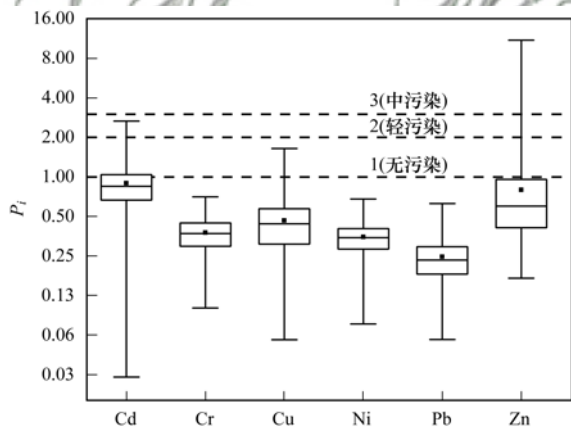


图4 研究区土壤重金属 P_i 评价

Fig. 4 Evaluation of soil heavy metal P_i in the study area

NPI 评价结果如图5所示, 研究区安全和警戒样点占比76.92%, 轻度污染样点占比21.46%, 中度污染样点占比1.21%, 重度污染样点占比0.40%。整体上, NPI 空间分布呈现西北高、东南低, 东部和南部污染指数多为安全或警戒。NPI 最高值位于研究区北部的几江、鼎山和德感这3个街道的交界处, 最低值位于研究区南部的四面山镇。

2.4 地理探测器

因子探测结果表明(图6), 海拔、地层和土壤pH对Cd解释力较强; 地层、坡度和TWI对Cr的解释力较强; 地层、坡向和海拔对Cu的解释力较强; 地层、坡向和土壤类型对Ni的解释力较强; 地

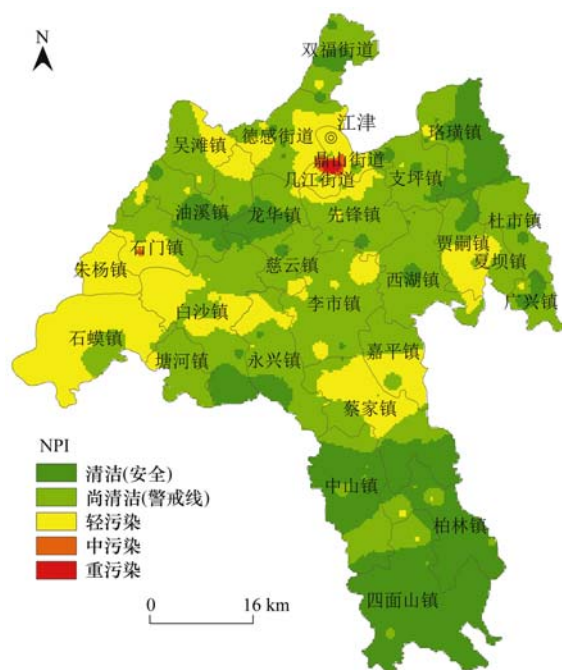


图5 研究区土壤重金属 NPI 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil heavy metal NPI in the study area

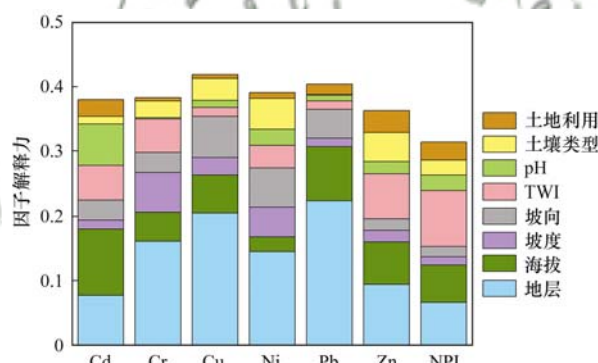


图6 研究区不同地理因子对土壤重金属的解释力

Fig. 6 Explanatory power of different geographical factors on soil heavy metals in the study area

层、海拔和坡向对Pb的解释力较强; 地层、TWI和海拔对Zn的解释力较强。

交互探测结果显示(图7), 两两因子交互后均为非线性增强。其中, 地层和TWI对研究区NPI的交互作用最强, 其次是TWI和坡向。地层和坡向的交互作用对Cd和Ni的影响最强, 地层和TWI的交互作用对Cr和Zn的影响最强, 海拔和地层的交互作用对Cu和Pb的影响最强。以上表明研究区土壤重金属累积受多种成土因素交互影响。

3 讨论

3.1 地层对表土中重金属的影响

成土母岩是土壤重金属的自然来源^[1,8]。研究区不同地层上发育的表层土壤重金属含量均值见图8, 出露于三叠系的表层土壤Cd、Cr、Cu、Ni和Pb

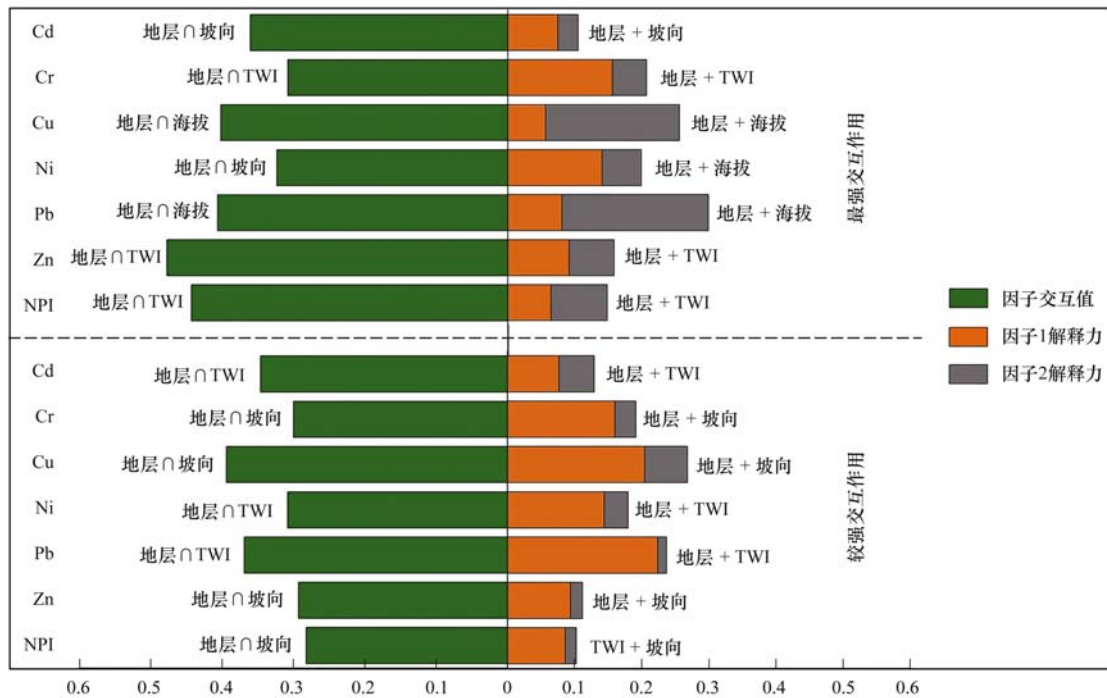


图7 研究区两两地理因子对土壤重金属交互探测结果

Fig. 7 Interaction detection results of soil heavy metals by two geographic factors in the study area

元素含量最高; 侏罗系发育土壤呈现 Zn 含量略高于三叠系; 白垩系发育土壤重金属含量最低. 地理探测器结果显示(图6和图7), 地层对 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的解释力最强, 地层与其他影响因子的交互作用对土壤 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等元素的影响最强, 这表明研究区土壤重金属含量分布主要受控于成土母岩.

自然状况下, 土壤化学成分受控于成土母岩^[8,14,36]. 研究区三叠纪地层岩性以浅海相灰岩和深湖相泥质岩为主^[37], 发育的表层土壤中黏土矿物和有机质含量较高^[13,38], 对风化产物中重金属具有较强富集作用, 因此三叠纪地层发育土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Pb 等重金属相对富集. 侏罗系沉积环境属于湖河相泥岩和粉砂岩沉积^[12,37,38], 风化后黏土矿物含量较高, 导致土壤中易富集 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Pb 等元素. 白垩纪地层岩性以砂岩为主^[12], 砂岩风化形成的土壤颗粒较大、组织疏松并多含石英砂粒, 土壤偏砂质, 导致重金属淋失较快, 不易富集^[12,38,39]. 因此, 研究区地层岩性物理和化学成分的差异导致了其发育土壤中重金属含量差异.

3.2 地形因子对表土中重金属的影响

因子探测器结果显示(图6), 海拔对土壤 Cd 元素的单因子解释力为 0.103, 为最高解释力水平. 除了 Cd, 地形因子对其它重金属元素的解释力仅次于地层. 交互探测器结果显示(图7), 地形因子与地层的交互作用对土壤 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等元

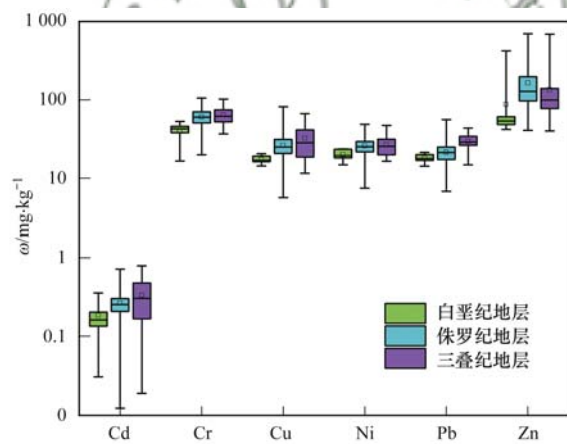
重金属通过 Kruskal-Wallis 非参数检验 ($P < 0.05$)

图8 不同地层单元表层土壤重金属含量

Fig. 8 Contents of heavy metal soils in different stratigraphic region

素影响最强.

地形可通过影响水热分布, 间接调控土壤基本理化性质而影响土壤重金属含量分布^[20,40]. 地理探测器结果显示(图6和图7), 海拔和坡度对各重金属含量的影响较大. 皮尔逊相关性分析结果显示(未列表), 海拔与 Cd、Cr、Cu 和 Zn 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 坡度与 Cr 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 坡度与 Cu 和 Zn 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$). 随着海拔和坡度的升高, 土壤重金属的含量会明显降低. 这可能是因为研究区位于西南地区, 降水较多, 高海拔和陡坡区域降水丰沛, 土壤侵蚀较严重, 导致重金属易淋失迁移至中低海拔平缓处累积下来^[41].

3.3 pH 和土壤类型对表土中重金属的影响

土壤 pH 是重要的土壤理化性质,土壤 pH 间接影响土壤重金属形态和价态,从而导致重金属迁移和富集^[40].地理探测器结果显示(图 6 和图 7),pH 对 Cd 元素的解释力为 0.064.皮尔逊相关性分析结果显示(未列表),土壤 pH 值与 Cd 和 Ni 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 Cu 呈显著正相关($P < 0.05$),与 Cr、Pb 和 Zn 无显著相关性.这可能是因为土壤 pH 值升高会促进土壤胶体和黏粒对重金属离子的吸附,且土壤 pH 是影响 Cd 吸附的关键因子,随土壤 pH 增加 Cd 的吸附能力增强^[2,40].

土壤类型是土壤理化性质的综合体现^[41].地理探测器结果显示(图 6 和图 7),土壤类型对 Ni 元素的解释力为 0.048,处于较强水平,对其他重金属含量影响较小,这可能是因为 Ni 在黄壤等酸性土壤中,易于溶解和迁移^[20,42],研究区黄壤主要分布在北部和南部中低山区,山区坡度较大,Ni 进一步淋失,不易积累.

3.4 土地利用方式对表土中重金属的影响

土地利用方式是人为活动的重要体现形式,其通过影响土壤理化性质而间接影响土壤重金属富集和迁移^[43,44].地理探测器结果显示(图 6 和图 7),土地利用对研究区土壤重金属含量影响较小.单因素方差分析结果表明,土地利用差异对土壤重金属含量无统计学意义($P > 0.05$).曹淑珍等研究发现工矿活动和农药化肥的不合理施用可能是造成农用地土壤重金属含量较高的主要原因^[15,18],农药化肥中通常含有 Cd 和 Cr 等重金属元素,长期施用的过程中农用地土壤会不断富集重金属^[45,46].

4 结论

(1)研究区表层土壤 Cd、Cu 和 Zn 含量均值分别是渝西地区土壤背景值的 1.22、1.10 和 1.98 倍.

(2)研究区北部、西部和中部地区土壤重金属含量较高,东部和南部地区含量较低.NPI 最高值位于北部鼎山街道,最低值位于南部四面山镇,均值为 0.866,污染样点占总样点的 22.1%.

(3)地层对 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的单因子解释力最强,而海拔对 Cd 元素的单因子解释力最强.地层与地形因子对土壤重金属的交互作用最强.这些表明,研究区土壤重金属含量分布主要受控于地层和地形因子.

参考文献:

[1] Huang S, Xiao L S, Zhang Y C, *et al.* Interactive effects of natural and anthropogenic factors on heterogenetic accumulations of heavy metals in surface soils through geodetector analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.

scitotenv.2021.147937.

- [2] Yuan G L, Sun T H, Han P, *et al.* Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **136**: 40-47.
- [3] Zhao L, Xu Y F, Hou H, *et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 654-662.
- [4] 张定熙, 孙涛, 王永敏, 等. 不同长度秸秆还田对土壤汞甲基化与水稻植株甲基汞富集的影响[J]. *环境化学*, 2019, **38**(7): 1488-1496.
- Zhang D X, Sun T, Wang Y M, *et al.* Effect of straw returning with different lengths on mercury methylation in paddy soil and methylmercury accumulation in rice plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(7): 1488-1496.
- [5] 张鹏岩, 秦明周, 陈龙, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3654-3662.
- Zhang P Y, Qin M Z, Chen L, *et al.* Study on distribution characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals in the Yellow River beach region in Kaifeng City[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3654-3662.
- [6] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- [7] 张丁, 黄睿, 高雪松. 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 946-956.
- Zhang D, Huang R, Gao X S. Spatial characteristics and potential ecological risk factors of heavy metals in cultivated land in the transition zone of a mountain plain[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 946-956.
- [8] Lv J S, Wang Y M. Multi-scale analysis of heavy metals sources in soils of Jiangsu Coast, Eastern China[J]. *Chemosphere*, 2018, **212**: 964-973.
- [9] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [10] Chi Y, Shi H H, Zheng W, *et al.* Simulating spatial distribution of coastal soil carbon content using a comprehensive land surface factor system based on remote sensing[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 384-399.
- [11] Sun L, Carey M, Yang L, *et al.* Source identification of trace elements in peri-urban soils in eastern China[J]. *Exposure and Health*, 2019, **11**(3): 195-207.
- [12] 程强, 寇小兵, 黄绍彬, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. *工程地质学报*, 2004, **12**(1): 34-40.
- Cheng Q, Kou X B, Huang S B, *et al.* The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, **12**(1): 34-40.
- [13] 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.
- [14] Liu Y L, Tian X L, Liu R, *et al.* Key driving factors of selenium-enriched soil in the low-Se geological belt: a case study in Red Beds of Sichuan Basin, China[J]. *CATENA*, 2021, **196**. doi: 10.1016/j.catena.2020.104926.
- [15] 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 等. 稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5535-5544.
- Cao S Z, Mu Y, Cui J X, *et al.* Cd pollution and safe planting zoning in paddy soils: A case study in a district of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5535-5544.
- [16] 周皎, 何欣芮, 李瑜, 等. 基于土壤重金属特征的绿色食品产地环境评价——以重庆(江津)现代农业园区为例[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 3070-3078.
- Zhou J, He X R, Li Y, *et al.* Evaluation of soil environmental quality in green food production based on spatial distribution of heavy metals—a case study of modern agricultural park in Jiangjin district, Chongqing[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 3070-3078.
- [17] Yuan Y Y, Liu Y L, Luo K L, *et al.* Hydrochemical characteristics and a health risk assessment of the use of river water and groundwater as drinking sources in a rural area in Jiangjin District, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, **79**(7), doi: 10.1007/s12665-020-8900-1.
- [18] 赵婉彤. 重庆市江津区土壤硒含量分布及影响因素的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- Zhao W T. Study on the distribution and influencing factors of soil Se of Jiangjin district, Chongqing municipality[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [19] HJ 803-2016, 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 主水提取-电感耦合等离子体质谱法[S].
- [20] Shen Z J, Xu D C, Li L L, *et al.* Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(15): 15698-15709.
- [21] 吕悦风, 孙华. 湖北某县域耕地土壤重金属空间分异特征、污染评价及来源分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(1): 95-102.
- Lv Y F, Sun H. Spatial differentiation characteristics, pollution evaluation, and source analysis of heavy metals in farmland soil in a county in northern Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(1): 95-102.
- [22] 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰土林地土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. *生态学报*, 2009, **29**(4): 2169-2177.
- Ning X B, Xiang W H, Fang X, *et al.* Heavy metal concentrations and pollution assessment of limestone forests in Huaxi district, Guiyang City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(4): 2169-2177.
- [23] 许桂苹, 王晓飞, 付洁. 土壤重金属污染评价方法研究综述[J]. *农村经济与科技*, 2014, **25**(1): 71-74.
- [24] 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].
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [26] Tao H, Liao X Y, Li Y, *et al.* Quantifying influences of interacting anthropogenic-natural factors on trace element accumulation and pollution risk in karst soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137770.
- [27] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [28] SL 190-2007, 土壤侵蚀分类分级标准[S].
- [29] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [30] GB/T 17296-2009, 中国土壤分类与代码[S].
- [31] GB/T 21010-2017, 土地利用现状分类[S].
- [32] 鲍丽然, 龚媛媛, 严明书, 等. 渝西经济区土壤地球化学基准值与背景值及元素分布特征[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(1): 31-40.
- Bao L R, Gong Y Y, Yan M S, *et al.* Element geochemical baseline and distributions in soil in Chongqing west economic zone, China[J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(1): 31-40.
- [33] 鄢明才, 顾铁新, 迟清华, 等. 中国土壤化学元素丰度与表生地球化学特征[J]. *物探与化探*, 1997, **21**(3): 161-167.
- Yan M C, Gu T X, Chi Q H, *et al.* Abundance of chemical elements of soils in China and supergenesis geochemistry characteristics[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1997, **21**(3): 161-167.
- [34] 刘永林, 雒昆利, 袁余洋. 重庆市江津区表层土壤中稀土元素含量与分布特征[J]. *中国稀土学报*, 2020, **38**(2): 215-224.
- Liu Y L, Luo K L, Yuan Y Y. Content and spatial distribution characteristics of rare earth of surface soil in Jiangjin district, Chongqing city[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2020, **38**(2): 215-224.
- [35] 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 等. 南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- Lai S Y, Dong Q Y, Song C, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in the eastern mountainous area of the Nanyang Basin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- [36] Świdwa-Urbańska J, Batlle-Sales J. Data quality oriented procedure, for detailed mapping of heavy metals in urban topsoil as an approach to human health risk assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **295**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113019.
- [37] 贾中民. 渝西北土壤重金属污染特征、源解析与生态健康风险评价[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- Jia Z M. Characteristics, source apportionment, and ecological health risk assessment of soil heavy metals contamination in Northwest Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [38] 李艳, 张薇薇, 程永毅, 等. 重庆紫色母岩及土壤 As、Hg 环境地球化学基线研究[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(4): 917-926.
- Li Y, Zhang W W, Cheng Y Y, *et al.* Environmental geochemical baseline of As and Hg in purple soil and its parent rock in Chongqing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(4): 917-926.
- [39] 廖德平, 龙启德. 贵州林业土壤[J]. *贵州林业科技*, 1997, **25**(4): 1-66.
- Liao D P, Long Q D. The soils for forestry in Guizhou[J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 1997, **25**(4): 1-66.
- [40] 成杭新, 彭敏, 赵传冬, 等. 表生地球化学动力学与中国西

- 南土壤中化学元素分布模式的驱动机制[J]. 地学前缘, 2019, **26**(6): 159-191.
- Cheng H X, Peng M, Zhao C D, *et al.* Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of dis-tribution patterns of chemical elements in soil, Southwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 159-191.
- [41] Gou Y, Wei J, Li J L, *et al.* Estimating purple-soil moisture content using Vis-NIR spectroscopy[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, **17**(9): 2214-2223.
- [42] 常同举, 崔孝强, 阮震, 等. 长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2381-2391.
- Chang T J, Cui X Q, Ruan Z, *et al.* Long-term effects of tillage methods on heavy metal accumulation and availability in purple paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2381-2391.
- [43] Rao K, Tang T, Zhang X, *et al.* Spatial-temporal dynamics, ecological risk assessment, source identification and interactions with internal nutrients release of heavy metals in surface sediments from a large Chinese shallow lake[J]. *Chemosphere*, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131041.
- [44] 王乔林, 宋云涛, 王成文, 等. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3693-3703.
- Wang Q L, Song Y T, Wang C W, *et al.* Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in Western Yunnan[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8): 3693-3703.
- [45] 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.
- [46] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 432-441.
- Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of southern Ningxia based on PMF model[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 432-441.



CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)