

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

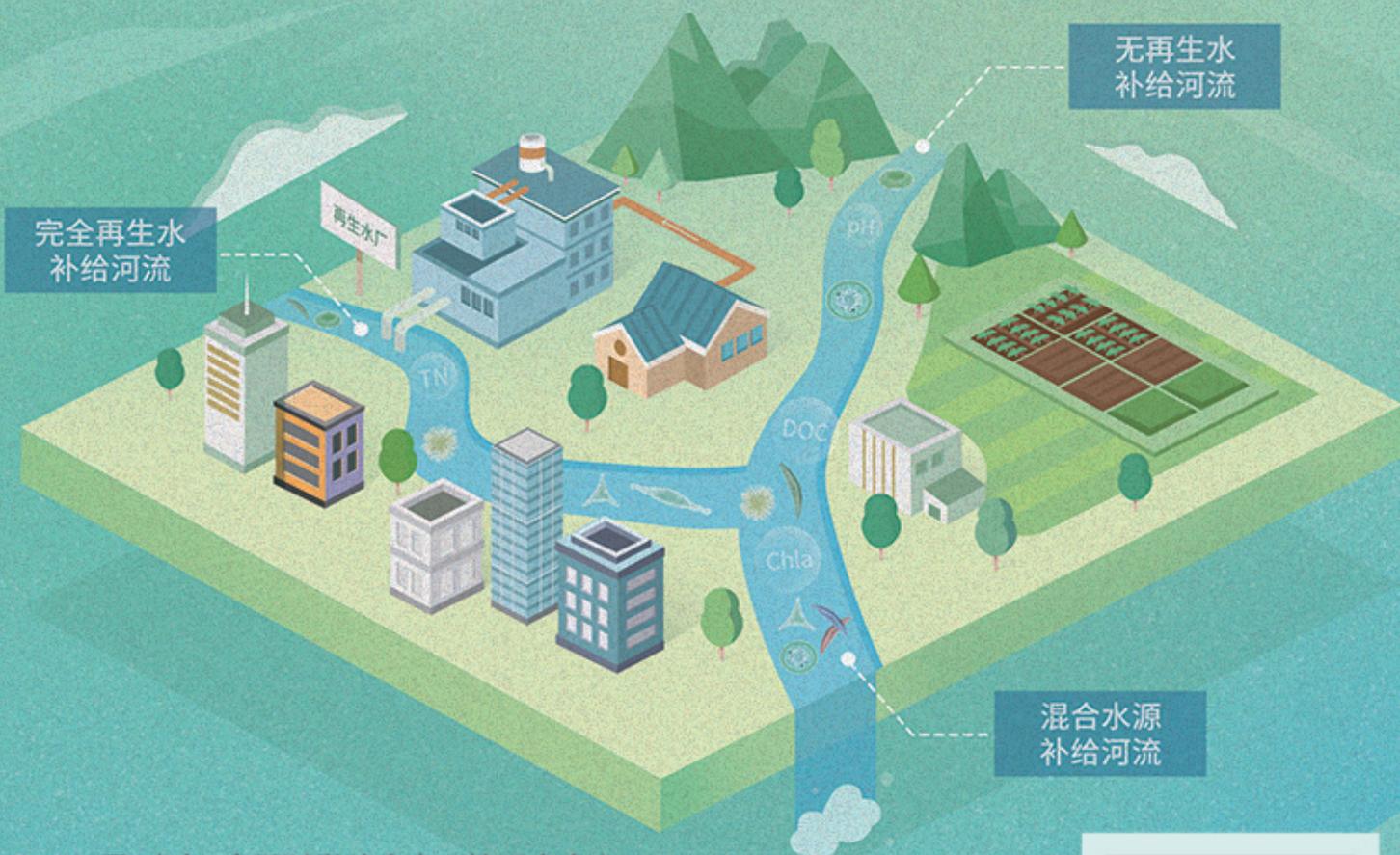
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素 ..... 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 ..... 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度时空分布特征及影响因素分析 ..... 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成及来源解析 ..... 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征与健康风险评估 ..... 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 ..... 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 ..... 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 ..... 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 ..... 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 ..... 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 ..... 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 ..... 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 ..... 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 ..... 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 ..... 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 ..... 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 ..... 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 ..... 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 ..... 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 ..... 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 ..... 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析 ..... 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 ..... 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 ..... 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 ..... 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 ..... 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 ..... 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) ..... 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 的去除 ..... 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 ..... 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 ..... 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 ..... 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 ..... 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 ..... 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 ..... 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 ..... 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 ..... 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 ..... 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 ..... 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 ..... 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 ..... 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 ..... 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 ..... 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 ..... 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 ..... 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 ..... 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 ..... 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 ..... 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 ..... (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)

# 地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例

刘永林<sup>1,2</sup>, 吴梅<sup>1,2</sup>, 刘睿<sup>1,2</sup>, 李军<sup>1,2</sup>, 倪润祥<sup>3</sup>, 刘双燕<sup>1,2</sup>, 田兴磊<sup>4\*</sup>, 赵家宇<sup>1,2</sup>, 刘怡<sup>1,2</sup>, 夏传波<sup>4</sup>

(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; 3. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125; 4. 山东省地质科学研究院, 济南 250013)

**摘要:** 中国地质构造复杂, 不同地质构造区地质演化史差异显著, 对其上发育的土壤重金属含量分布、污染特征及来源亦具有影响. 以秦岭地槽和上扬子地台交界区重庆市城口县为研究区, 采集表层土壤样品 115 件, 综合运用地累积指数、污染指数和正定矩阵因子分解模型 (PMF) 分析不同地质构造单元区表土重金属含量分布、污染特征和来源. 结果表明: ①整体上, 该区表土重金属处于中度污染水平, 其中 Cd 为主要污染元素; ②表土中 Cd 超标点位主要分布在乌坪断裂以北地区; ③发育于秦岭地槽区埃迪卡拉纪-早寒武世地层之上的土壤中重金属含量显著高于上扬子地台区相同时代地层之上的土壤; ④研究区表土重金属来源主要为成土母岩风化及交通和燃煤活动, 其中成土母岩风化的贡献率为 75%, 是控制研究区表土重金属含量分布和污染的主要因素. 这为研究不同地质构造区土壤重金属含量分布、富集和来源提供了范例和科学依据.

**关键词:** 重金属; 含量分异; 秦岭地槽; 上扬子地台; 正定矩阵因子分解模型 (PMF)

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5742-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201104

## Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China

LIU Yong-lin<sup>1,2</sup>, WU Mei<sup>1,2</sup>, LIU Rui<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, NI Run-xiang<sup>3</sup>, LIU Shuang-yan<sup>1,2</sup>, TIAN Xing-lei<sup>4\*</sup>, ZHAO Jia-yu<sup>1,2</sup>, LIU Yi<sup>1,2</sup>, XIA Chuan-bo<sup>4</sup>

(1. Geography and Tourism College, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 4. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China)

**Abstract:** The geological structure of China is complex, and the geological evolution history of different geological structure areas is significantly different, which also affects the distribution, pollution characteristics, and sources of heavy metals in the topsoils. In this study, Chengkou County of Chongqing Municipality, located in the junction between the Qinling geosyncline and the Upper Yangtze platform, was selected as a case study area. Statistical analysis and a positive matrix factorization model (PMF) were employed to assess the content, spatial distribution, pollution characteristics, and source apportionment of heavy metals in the topsoil derived from different geological tectonic units. The results showed that: ① the heavy metals in the topsoils were at a moderate pollution level, and Cd was the major polluting element. ② The topsoils in which Cd exceeded the standard were mainly distributed in the northern region of Wuping Fault. ③ The median values of Cd, Cu, Ni, Sb, and Zn in topsoils derived from the Lower Cambrian and Ediacaran strata of the Qinling geosyncline were higher than those of the Upper Yangtze platform. ④ The main sources of heavy metals in the topsoil of the study area were the weathering of parent rocks, transportation, and coal-burning activities, and the weathering of parent rocks contributed 75%, which was the main factor controlling the distribution and pollution of heavy metals in the topsoil of the study area. These results could provide a good example and scientific basis for further illustrating the distribution, enrichment, and source of topsoil heavy metals in different geological structure areas.

**Key words:** heavy metals; content differences; Qinling geosyncline; Upper Yangtze platform; positive matrix factorization model (PMF)

重金属具有毒性、不可降解性和持久性, 因此, 土壤重金属含量分布、富集和来源受到国内外学者广泛关注<sup>[1-3]</sup>. 我国正在经历快速的城市化、工业化和农业化, 导致的土壤重金属污染问题比较严重<sup>[4-9]</sup>. 据全国土壤污染调查显示<sup>[8]</sup>, 土壤重金属总的超标率为 16.1%, Cd、Ni 和 Cu 是主要污染因子.

但至今, 土壤重金属空间分异机制尚未完全解释清楚. 通常土壤重金属源于自然作用(母岩风化、成土过程等)和人为活动(工业排放、农业活动、采

矿等)<sup>[1,2,10,11]</sup>. 自然状况下, 母岩风化和成土过程控制土壤重金属含量分布. Yang 等<sup>[1]</sup>研究了广西典型岩溶区表土中重金属含量分布, 表明发育于石灰岩上的土壤中重金属含量远高于碎屑岩区土壤. Zinn 等<sup>[10]</sup>发现巴西高原发育在超基性岩和基性岩之上

收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-04-08

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项目(KJZDK202100504, KJQN201900519)

作者简介: 刘永林(1983~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤重金属污染与源解析, E-mail: liuyonglin130@163.com

\* 通信作者, E-mail: xinglei\_tian@163.com

的土壤 Cr 含量最高. 何愿等<sup>[12]</sup>发现大巴山腹地万源地区黑色页岩发育的土壤 Cd 和 Cr 含量最高. 此外, 随着社会经济的快速发展, 人类活动对土壤重金属含量分布的影响急剧增加. Liu 等<sup>[13]</sup>的研究表明, 我国 135 个大型煤矿周边土壤中重金属含量高于土壤背景值. 化石燃料燃烧也是土壤重金属的重要来源<sup>[13-15]</sup>.

总之, 关于土壤重金属含量分布和来源, 前人已经做了大量工作, 并取得可喜的成果. 但以往研究, 多集中于成土母岩的岩性对土壤重金属含量分布的影响, 而未考虑成土母岩形成时的沉积环境及所在构造单元对现今土壤重金属含量分布的影响. 因为, 地质时期地层和沉积物中的微量元素在不同地质构造单元的不同地质时代岩性中的含量具有差异性<sup>[16-20]</sup>, 这可能会导致其上发育的土壤元素含量组合也具有显著差异.

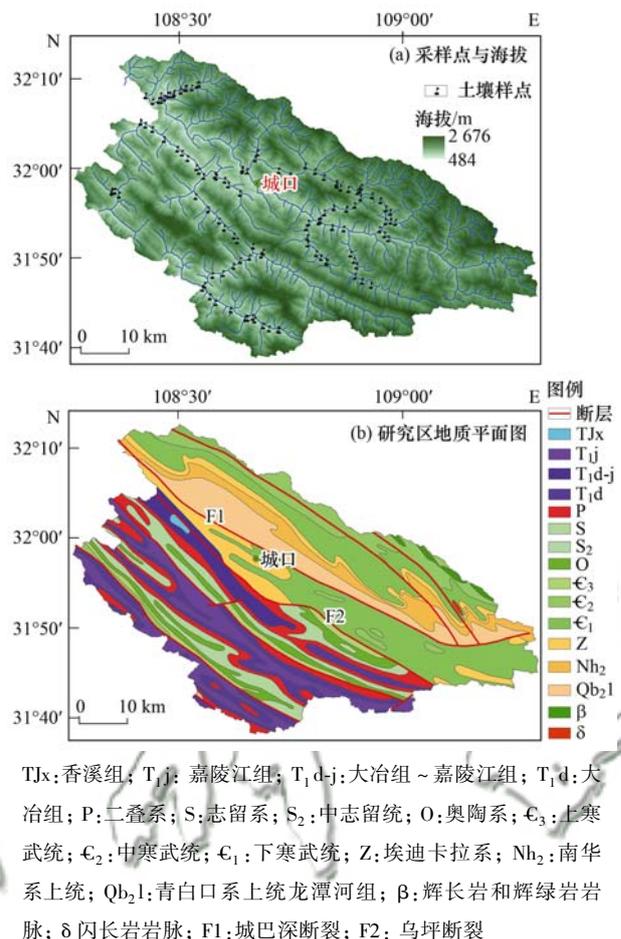
为此, 选择位于秦岭地槽和上扬子地台交界处的重庆市城口地区为研究区, 分析不同构造单元同一地质时代地层上发育的土壤重金属含量、富集和污染特征, 并定量解析土壤重金属的来源. 具体研究目标为: ①表层土壤重金属含量分布特征; ②评价研究区表土重金属污染特征; ③定量解析表土重金属来源. 通过揭示地质构造发展过程差异对表土重金属空间分异的影响机制, 以期为区域土壤重金属污染防控与生态环境综合治理和修复提供理论支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市东北部, 地处大巴山南麓. 区内年均降水量 1 261 mm, 年均气温 13.8℃ 属于亚热带季风气候. 境内地形地貌复杂, 地势东南偏高, 西北偏低[图 1(a)]. 地质构造上, 城口县位于南秦岭~大巴山逆冲带和四川前陆盆地结合部位, 城巴深断裂(F1)为两个构造单元的分区断裂[图 1(b)], 褶皱和断层走向呈北西至南东[图 1(b)]. 埃迪卡拉系(Z)地层分布在县城北部地区, 岩性以灰绿、紫红色凝灰质砂岩夹页岩为主; 寒武系(C)主要分布在县城南部的东安~厚坪、修齐和北部地区, 岩性以浅灰色鲕状灰岩和砖红色白云岩为主; 奥陶系(O)分布在庙坝~蓼子~明中, 岩性为灰黑色炭硅质页岩, 炭质页岩; 志留系(S)主要分布在庙坝、白芷、周溪西南端及咸宜, 岩性为灰黄及灰绿色粉砂质泥岩、页岩、粉砂岩和夹灰岩; 二叠系(P)主要分布在高燕和白芷附近及西南侧的双河~周溪~咸宜一带, 岩性为灰黑、灰色厚层状灰岩, 炭质页岩;

三叠系(T)主要分布在坪坝~铜罐沟巨型冲断以南区域, 岩性为砾岩、白云岩和灰岩[图 1(b)]. 土壤类型多属山地黄壤, 有机质含量高.



TJx: 香溪组; T<sub>1j</sub>: 嘉陵江组; T<sub>1d-j</sub>: 大冶组~嘉陵江组; T<sub>1d</sub>: 大冶组; P: 二叠系; S: 志留系; S<sub>2</sub>: 中志留统; O: 奥陶系; C<sub>3</sub>: 上寒武统; C<sub>2</sub>: 中寒武统; C<sub>1</sub>: 下寒武统; Z: 埃迪卡拉系; Nh<sub>2</sub>: 南华系上统; Qb<sub>2l</sub>: 青白口系上统龙潭河组; β: 辉长岩和辉绿岩岩脉; δ: 闪长岩岩脉; F1: 城巴深断裂; F2: 乌坪断裂

图 1 研究区样点分布和地质背景

Fig. 1 Map for soil sample sites and geologic setting in the study area

### 1.2 样品采集与化学分析

野外采样时, 为将土壤与地层一一对应, 利用研究区 1:20 万地质图, 在地层露头附近约 10 m 范围内随机采集 3~4 个点, 然后组成 1 件混合土壤样品, 采样深度为 0~20 cm. 研究区共采集 115 件表层土壤, 每件混合土壤样品约 1.0 kg, 同时记录样点经纬度和海拔(图 1). 土壤样品装入聚乙烯塑料袋, 带回实验室, 风干, 过筛, 检出石子和植物根茎等杂物. 依据区域地球化学样品分析方法(DZ/T 0279-2016)的规定, 研磨过 2.0 mm 孔径筛(10 目), 测定土壤 pH; 四分法取 10 目样品, 研磨过 0.15 mm 孔径筛(100 目)测定土壤有机质(SOM)和重金属含量. 重铬酸钾容量法测定 SOM. 称取 100 mg 土壤样品, 置于 100 mL PTFE 烧杯中, 加入浓硝酸、高氯酸和氢氟酸(3:1:3, 体积比), 盖上聚四氟表面皿, 于电热板静置过夜. 次日, 打开电热板消解(电热板表面温度 180℃), 消解至烧杯内液体透明且无残渣.

取下冷却,加 1~2 mL 超纯水,再在电热板加热 10 min,再取下冷却,定容至 25 mL 塑料管待测.用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,Elan DRC-e)测定土壤 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb 和 Zn 的含量.通过标准物质(GBW07401、GBW07403 或 GBW07406)控制实验质量,同时做空白样以消除试剂影响.样品检测相对标准偏差(RSD)值小于 10%.

### 1.3 数据分析和数据处理

综合用地累积指数、单因子指数和内梅罗指数等方法对比评价研究区土壤中重金属含量、富集和污染特征.运用相关性分析和正定矩阵因子分解模型(positive matrix factorization model,PMF)进行土壤重金属源解析.

#### 1.3.1 地累积指数法

地累积指数( $I_{geo}$ )常被用于评价环境介质中元素的污染水平<sup>[21]</sup>.其计算见公式(1):

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times S_i)] \quad (1)$$

式中, $C_i$ 为土壤中重金属*i*实测含量值; $S_i$ 为参比值; $k$ 为修正系数,取 1.5. $I_{geo} < 0$  无污染(I), $0 < I_{geo} \leq 1$  轻污染(II), $1 < I_{geo} \leq 2$  中度污染(III), $2 < I_{geo} \leq 3$  中至重度污染(IV), $3 < I_{geo} \leq 4$  重度污染(V), $4 < I_{geo} \leq 5$  重至极重度污染(VI), $I_{geo} > 5$  极重度污染(VII).由于研究区无土壤背景值参考,故以重庆市土壤背景值作为参比值<sup>[22]</sup>.

#### 1.3.2 单因子指数和内梅罗指数法

基于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中的筛选值,运用单因子指数( $P_i$ )和内梅罗综合指数( $P_N$ )评价研究区土壤重金属污染状况<sup>[23]</sup>.目前,农用地土壤污染风险管控标准中无 Sb 参考值,因此,本文参考文献[24]建议的 Sb 参考值为  $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .单因子指数( $P_i$ )适用于评价单一元素污染状况<sup>[25]</sup>. $P_i \leq 1$  表示未污染(清洁), $1 < P_i \leq 2$  表示轻度污染, $2 < P_i \leq 3$  表示中度污染, $P_i > 3$  表示重度污染.

内梅罗综合污染指数( $P_N$ )可评价土壤的综合污染状况<sup>[25,26]</sup>. $0 < P_N \leq 0.7$  表示清洁(安全), $0.7 < P_N \leq 1.0$  表示尚清洁(警戒), $1.0 < P_N \leq 2.0$  表示轻度污染, $2.0 < P_N \leq 3.0$  表示中度污染, $P_N > 3.0$  表示重度污染.

#### 1.3.3 正定矩阵因子分解模型(PMF)

PMF 由数学家 Paatero 等<sup>[27]</sup>开发.PMF 用于解析土壤重金属来源,已经被证明是有效的<sup>[14,20,28,29]</sup>.关于 PMF 详细介绍见文献[27,30].

#### 1.3.4 统计分析

统计分析结果表明,每个参数均不符合正态分布,为此,文中均值采用中值.Spearman 用于表示参数

间相关性;Mann-Whitney U 和 Kruskal-Wallis 检验用于分析参数间差异性.SPSS 20.0、Excel 2016、OriginLab 2016 和 ArcGIS 10.2 用于统计分析和绘图.所有的相关性和显著性差异都在  $P < 0.05$  水平.

## 2 结果与分析

### 2.1 表土中重金属含量统计特征

研究区表土 pH 为 4.70~8.16,中值为 7.26(表 1),主要以中性土壤为主(6.5~7.5).研究区表土  $\omega(\text{SOM})$  为 0.20%~16.2%,算术均值和中值分别为 2.77% 和 2.49%.

研究区表土中  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Sb})$  和  $\omega(\text{Zn})$  范围分别为 0.08~14.0、27.4~301、6.10~224、16.8~158、6.47~58.7、0.26~18.4 和 26.5~819  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .其中,Cd( $0.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Cu( $41.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Ni( $37.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Sb( $1.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和 Zn( $136 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的中值分别是重庆市土壤背景值的 2.14、1.68、1.18、1.30 和 1.66 倍,表土中 Cr 和 Pb 中值约等于重庆市土壤背景值.

对比我国农业耕地土壤重金属污染风险管控标准<sup>[23]</sup>,Pb 未超标;分别有 67.83%、1.74%、11.30%、2.61%、2.61% 和 18.26% 的土壤样品 Cd、Cr、Cu、Ni、Sb 和 Zn 超过风险筛选标准值;14.78% 样品 Cd 含量超过土壤风险管制值.因此,Cd 是研究区土壤中主要污染重金属,可能会危害当地生态环境.

研究区表土中 Cd、Cr、Cu、Sb 和 Zn 的标准偏差(SD)或变异系数(CV)相对较高(表 1),表明具有显著的空间变异<sup>[5,6,30]</sup>.但表土中 Pb 的 SD(7.60)、CV(27.0)、偏度(0.82)和峰度(2.44)都是最低,表明 Pb 的含量分布相对较均匀.

Spearman 相关分析结果表明(表 2),大多数重金属元素间具有显著相关关系.其中,Cd、Cu、Ni、Sb 和 Zn 之间均呈极显著正相关关系( $r > 0.750$ ,  $P < 0.01$ ),表明这些重金属元素可能具有同来源.Cr 与其它重金属具有显著正相关关系( $r > 0.400$ ,  $P < 0.01$ ),表明 Cr 的来源可能较复杂.Pb 仅与 Cr、Cu 具有较弱的显著正相关关系,表明研究区表土中 Pb 的来源与其它元素不同.土壤 pH 仅与 Cr 具有显著性正相关( $r = 0.277$ ,  $P < 0.01$ ),SOM 与所有的重金属都无显著性相关关系(表 2),表明土壤 pH 和 SOM 不是影响土壤重金属含量分布的主要因素.

### 2.2 地累积评价土壤重金属污染

研究区表土重金属  $I_{geo}$  中值(表 3)由高到低为: Cd、Zn、Cu、Sb、Ni、Cr 和 Pb,其中 Cd、Zn 和 Cu

表 1 研究区表土中重金属含量统计特征<sup>1)</sup>

Table 1 Descriptive statistics of different heavy metals in topsoil at the study area

参数	最小值	最大值	算术均值	中值	SD	CV	偏度	峰度	重庆 <sup>[22]</sup>
pH	4.70	8.16	7.15	7.26	0.54	7.51	-1.59	4.29	nd
$\omega(\text{SOM})/\%$	0.20	16.2	2.77	2.49	1.88	68.1	3.61	22.59	nd
$\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.08	14.0	1.48	0.61	2.06	139.0	3.25	13.81	0.28
$\omega(\text{Cr})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	27.4	301	79.5	73.2	32.0	40.2	4.14	22.89	74.4
$\omega(\text{Cu})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.10	224	51.8	41.3	33.5	64.5	2.85	9.78	24.6
$\omega(\text{Ni})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.8	158	44.7	37.3	22.1	49.4	2.70	9.08	31.6
$\omega(\text{Pb})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.47	58.7	27.9	26.9	7.6	27.0	0.82	2.44	28.1
$\omega(\text{Sb})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.26	18.4	2.62	1.67	3.1	116.4	3.67	14.98	1.28
$\omega(\text{Zn})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	26.5	819	191	136	138.4	72.5	2.46	6.74	81.9

1)SD 表示标准偏差, CV 表示变异系数, nd 表示文献中无数据

表 2 研究区表土中重金属相关系数矩阵<sup>1)</sup>

Table 2 Spearman's correlation coefficients for heavy metals and altitude in the study area

	pH	SOM	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn
SOM	-0.028								
Cd	0.037	0.028							
Cr	0.277 **	-0.014	0.581 **						
Cu	0.127	-0.117	0.767 **	0.649 **					
Ni	0.091	-0.101	0.775 **	0.617 **	0.878 **				
Pb	-0.014	0.054	0.129	0.441 **	0.227 **	0.143			
Sb	0.100	-0.057	0.870 **	0.577 **	0.826 **	0.814 **	0.161 *		
Zn	0.032	-0.148	0.806 **	0.516 **	0.853 **	0.854 **	0.099	0.841 **	
H	-0.256 **	-0.082	0.244 **	-0.081	0.219 **	0.277 **	-0.286 **	0.224 **	0.368 **

1)H 表示海拔; \*\*表示  $P < 0.01$ , \*表示  $P < 0.05$

的  $I_{\text{geo}}$  中值位于 0 ~ 1 之间,为轻度污染,其余 4 种重金属  $I_{\text{geo}}$  中值小于 0,表明无污染.具体而言,26.1% 和 17.4% 的土壤样品 Cd 分别处于轻度污染和中度污染,22.6% 土壤样品 Cd 处于中度至重度污染,极少数样品为重度以上污染; Cu、Sb 和

Zn 分别有 60%、31.3% 和 60.1% 的样品处于轻度至中度污染,极个别样品为中至重度污染; Cr 和 Pb 的  $I_{\text{geo}}$  多小于 0,只有极个别样品处于轻度或中度污染.表明研究区表土以 Cd 污染为主,其次为 Zn 和 Cu.

表 3 研究区表土中重金属的  $I_{\text{geo}}$  统计特征<sup>1)</sup>Table 3 Statistical characteristics for  $I_{\text{geo}}$  of the topsoil in the study area

参数	最小值	最大值	算术均值	中值	不同地累积污染水平个数						
					I	II	III	IV	V	VI	VII
Cd	-2.36	5.06	0.92	0.54	36	30	20	15	11	2	1
Cr	-2.03	1.43	-0.56	-0.61	107	7	1	0	0	0	0
Cu	-2.60	2.60	0.29	0.16	42	58	11	4	0	0	0
Ni	-1.49	1.74	-0.20	-0.35	82	28	5	0	0	0	0
Pb	-2.70	0.48	-0.65	-0.65	109	6	0	0	0	0	0
Sb	-2.89	3.26	-0.02	-0.20	73	26	10	3	3	0	0
Zn	-2.21	2.74	0.38	0.15	40	53	17	5	0	0	0

1) I 表示无污染, II 表示轻污染, III 表示中度污染, IV 表示中至重度污染, V 表示重度污染, VI 表示重至极重度污染, VII 表示极重度污染

### 2.3 表土重金属内梅罗污染评价和空间分布

以我国农田土壤重金属筛选值为参比值,运用内梅罗指数评价研究区表土重金属污染特征.结果显示,表土中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb 和 Zn 的单因子污染指数 ( $P_i$ ) 范围分别为: 0.27 ~ 46.77、0.14 ~ 1.53、0.06 ~ 2.24、0.17 ~ 1.58、0.05 ~ 0.49、0.02 ~ 1.22 和 0.11 ~ 3.27[图 2(a)]. 从中值看,仅 Cd 处于中度污染,其余重金属处于无污染水平.所

有样品中 Pb 处于未污染水平;多数样品中 Cr、Cu、Ni 和 Sb 处于未污染水平,只有极个别样品处于轻度至中度污染;分别有 13.9% 和 4.34% 的样品 Zn 处于轻度污染和中 ~ 重度污染水平;表土 Cd 处于未污染、轻度污染、中度污染和重度污染样品占比分别为 23.5%、24.3%、11.3% 和 40.9%,表明表土中 Cd 主要处于中度 ~ 重度污染,为研究区土壤主要污染重金属.空间分布看,土壤中 Cd 和 Zn 超标

点位多分布于乌坪断裂(F2)以北地区[图 2(b)和 2(c)]. 乌坪断裂(F2)以北主要为晚前寒武纪~晚古

生代地层,乌坪断裂以南主要为中生代地层[图 1(b)].

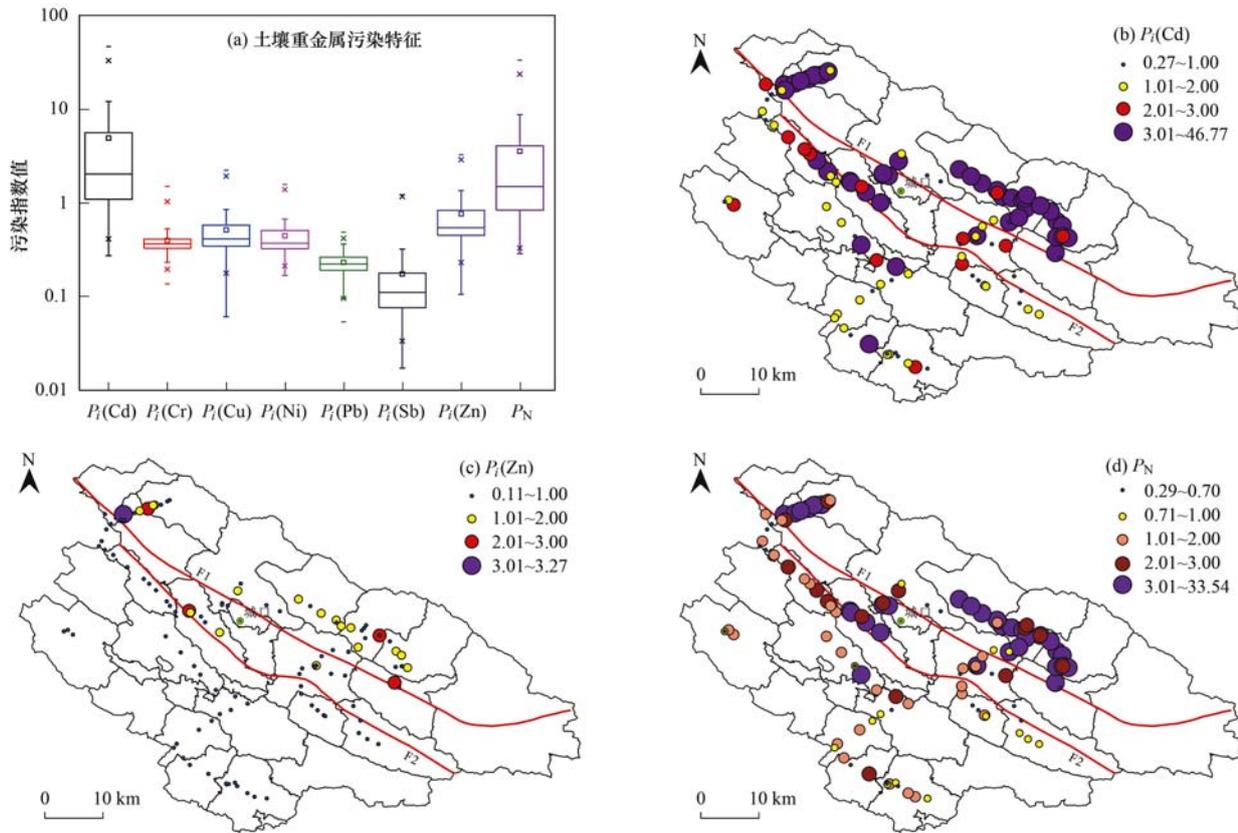


图 2 研究区表土中重金属污染特征和空间分布

Fig. 2 Pollution characteristics and spatial distribution of soil heavy metals in the study area

$P_N$  可综合反映表土中重金属污染水平.  $P_N$  为 0.29~33.5, 中值为 1.50. 整体上, 研究区表土为中度污染. 处于安全、警戒、轻度、中度和重度污染样品占总样本比分别为 17.4%、13.0%、25.2%、13.0% 和 31.4%. 研究区较高的  $P_N$  主要分布于乌坪断裂(F2)以北的埃迪卡拉纪和寒武纪地层[图 2(d)], 表明成土母岩可能是控制研究区 Cd、Zn 及其土壤重金属污染分布的主要因素.

### 3 讨论

#### 3.1 成土母岩对表土重金属空间变异的影响

地质构造上, 研究区处于秦岭地槽和上扬子地台交接带<sup>[18]</sup>. 图 3(a) 显示, 秦岭地槽区表土中 Cd、Cu、Ni、Sb 和 Zn 含量高于上扬子地台区, 但表土中 Pb 含量则相反. 图 3(b) 和图 3(c) 显示, 发育于秦岭地槽区下寒武统上的土壤 Cd、Cu、Ni、Sb 和 Zn 含量显著高于上扬子地台区下寒武统的, 而发育于不同构造单元埃迪卡拉纪地层之上的土壤重金属含量亦具有显著差异. 这些表明, 不同地质构造单元, 即使是地层时代相同, 但其形成的构造沉积环境具有差异, 亦可导致土壤中重金属含量具有显著分异.

自然条件下, 成土母岩中重金属含量分异控制着土壤重金属含量差异<sup>[1,10,32~34]</sup>. 秦岭地槽区主要出露下寒武统黑色岩系、埃迪卡拉系黑色硅质岩和白云岩以及南华系凝灰质岩类[图 1(b)]. 有研究表明, 下寒武统和埃迪卡拉系黑色岩系显著富集多种重金属元素<sup>[35~38]</sup>; 南华系凝灰质岩主要物源为富含重金属的火山喷发物<sup>[39,40]</sup>. 上扬子地台区主要岩性为寒武系黑色岩系和碳酸盐岩、奥陶系碳酸盐岩、志留系砂岩和灰岩、下三叠统碳酸盐岩和砂岩. 除了下寒武统出露富集重金属的黑色岩系之外<sup>[17,41,42]</sup>, 其余地层中重金属含量均较低<sup>[16,43,44]</sup>. 因此, 秦岭地槽区地层与上扬子地台区地层中重金属含量的差异, 可导致其上发育的土壤重金属含量和污染程度具有显著性差异[图 2(c) 和图 3]. 此外, 研究区较高的  $P_N$  值土壤主要分布于乌坪断裂(F2)以北的埃迪卡拉纪和寒武纪地层之上[图 2(d)], 同样表明成土母岩可能是控制研究区 Cd、Zn 及其土壤重金属污染分布的主要因素.

秦岭地槽区和上扬子地台区都出露早寒武世和埃迪卡拉纪地层, 但其上发育的土壤重金属具有显著性差异[图 3(b) 和图 3(c)]. 原因可能如下: ①两

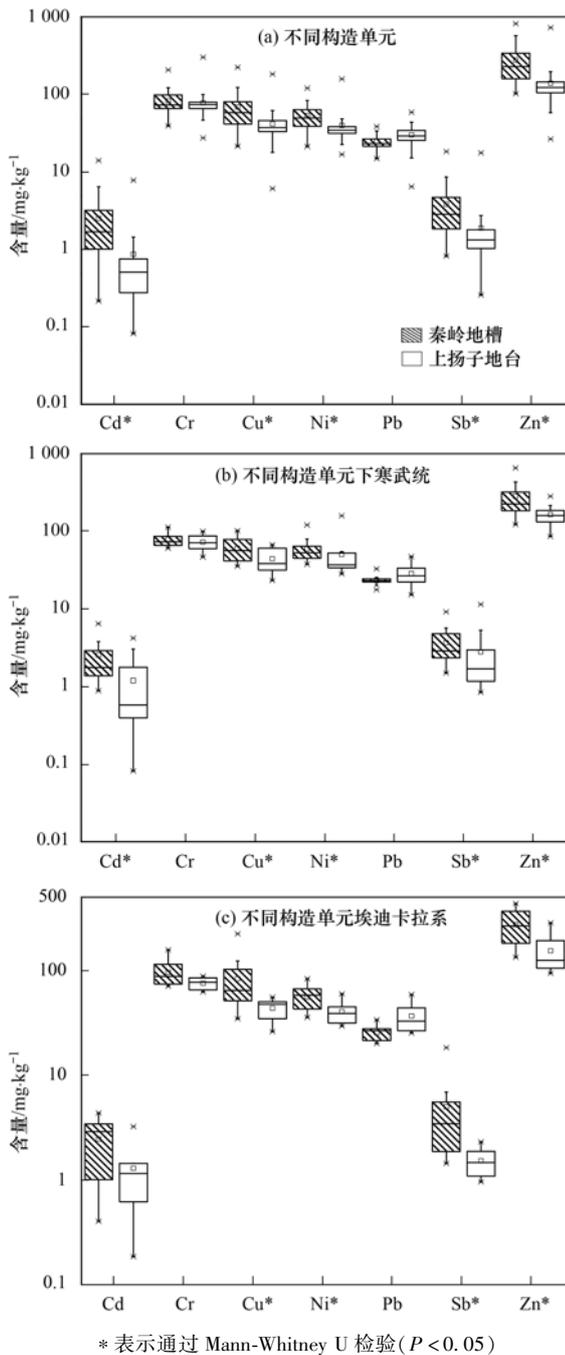


图3 研究区不同构造单元发育的土壤中重金属含量箱型图  
Fig. 3 Box-plot of heavy metal content in the topsoil at different tectonic units and strata

个构造单元下寒武统都发育有黑色岩系<sup>[35,41,42]</sup>,但秦岭地槽区下寒武统沉积环境为强还原的陆棚-半深海环境,富含有机质,易于吸附重金属<sup>[45]</sup>.相反,上扬子地台区下寒武统沉积环境为弱氧化-还原的潮间带-浅海环境,有机质相对较低,吸附的重金属含量也相对较低<sup>[17,45]</sup>. ②秦岭地槽埃迪卡拉系主要为陆棚-半深海相的黑色硅质岩、黏土岩和白云岩,而上扬子地台区埃迪卡拉系主要为陆表海相的白云岩和黑色粉砂质页岩<sup>[46]</sup>. 综上分析可知,岩石形成的沉积环境,即沉积相的差异是导致成土母岩虽然

岩性相近,但重金属含量具有显著差异的主要原因之一,从而导致发育其上的土壤重金属含量和污染程度具有显著差异.

### 3.2 表土中重金属源解析

基于 PMF 5.0 软件,设定因子数为 2、3、4 和 5,运算次数设为 20 次. 通过以下标准选择最佳因子数: ① $Q_{\text{robust}}$  和  $Q_{\text{true}}$  差值,  $Q_{\text{robust}}/Q_{\text{expected}}$  值; ②实测值与预测值的相关系数 ( $R^2$ )<sup>[21,28,29,47]</sup>. 经过多次计算,当因子数为 3 时,大部分物种比例残差在 -3.0 ~ 3.0 之间; 重金属含量预测值和实测值相关系数 ( $R^2$ ) 在 0.630 (Ni) ~ 0.997 (Cd) 之间,这些表明研究区表土重金属建模良好. 据文献<sup>[21,28]</sup>,建模良好也并不能完全解析重金属的来源,还要结合相关系数、重金属污染程度、GIS 分析以及成土母岩、交通、农业和工矿分布等综合解析表土重金属来源.

因子 1 对 Zn、Cu、Ni、Cr、Pb 和 Sb 的贡献率分别为 55.1%、52.6%、51.4%、35.6%、35.1% 和 33.8% (图 4),而对 Cd (0.05%) 贡献率最低. Zn、Cu、Ni、Cr、Pb 和 Sb 的地累积指数中值小于 0 或接近 0,且 6 种元素内梅罗评价均处于无污染水平. 对于污染程度较低的重金属元素一般被认为主要源于岩石风化<sup>[21,49]</sup>. 另外,因子 1 对 Zn、Cu、Ni、Cr、Pb 和 Sb 的贡献率都超过 30% (图 4),表明 6 种重金属元素具有相同来源的可能性较大. 因此,因子 1 主要为自然源.

因子 2 对 Cd (83.1%) 贡献最高 (图 4), Sb (51.4%)、Zn (40.7%)、Cu (31.7%)、Ni (24.2%)、Cr (20.1%) 和 Pb (9.3%) 贡献依次降低. 内梅罗污染评价表明,研究区表土主要受到 Cd 元素污染<sup>[表 3,图 2(a)]</sup>,其 CV 值也最高<sup>(表 1 和表 2)</sup>. 研究区重金属相关系数表明<sup>(表 2)</sup>,除 Pb 外,Cd 与其余 5 种重金属都具有显著正相关关系,说明 Cd 与其余 5 种重金属可能具有相似的来源. 研究区地处秦岭地槽和上扬子地台交接带,金属矿产资源丰富,尤其是锰矿和铅锌矿,但结合研究区金属矿产分布<sup>[35,45]</sup>和 Cd 单因子污染指数分布<sup>[图 2(b)]</sup>,发现两者之间并没有显著空间相关性,表明金属矿开采对表土 Cd 污染程度较低. 另外,为响应国家生态环保政策,研究区早已关停区域内的矿山企业. 图 2 和图 3 显示,表土中 Cd 与成土母岩具有很好的一一对应关系,晚前寒武纪-早古生代地层黑色岩系之上发育的表土 Cd 含量最高,说明成土母岩是控制研究区表土 Cd 含量分布的主要因素. 因此,因子 2 也应归因于岩石风化和成土过程.

因子 3 中 Pb (55.7%) 和 Cr (44.3%) 具有较高

贡献率,而对其余重金属元素的贡献率相对较低(图4)。研究区Pb和Cr的地累积指数中值最小,且两种元素CV值也最小(表1)。表2显示,Cr与Pb之间呈现显著正相关关系( $r=0.441$ ,  $P<0.01$ ),这些表明Pb和Cr可能具有相同来源。前人研究表明,Pb主要源于化石燃料、汽车尾气、汽车轮胎和刹车片<sup>[49~51]</sup>,是交通源的主要标志污染物。据文献<sup>[11]</sup>,汽车尾气排放占据全球大气Pb排放量的2/3。研究区受地形地貌条件限制[图1(a)],这可能会导致交通尾气流通不畅,致大气或灰尘中Pb沉降。表2中Pb与海拔呈显著负相关关系,以及在任何地层发育的表层土壤中Pb含量相近,这些表明,

Pb可能主要源于交通污染。其次,研究区小煤矿分布较多,历史上当地居民会用燃煤取暖和做饭,将煤中Cr排放至大气。Cr与海拔也呈负相关关系( $r=-0.081$ ,  $P>0.05$ ),在一定程度上说明,土壤中部分Cr来源于大气沉降。因此,因子3为交通和燃煤源。

综上所述,可以将因子1和因子2归并为自然源,即成土母岩风化,主要是黑色岩系风化。因子3为交通和燃煤活动。成土母岩风化和交通、燃煤活动对研究区表土重金属来源贡献率分别为75%和25%,表明成土母岩是控制研究区表土重金属含量分布和污染程度的主要因素。

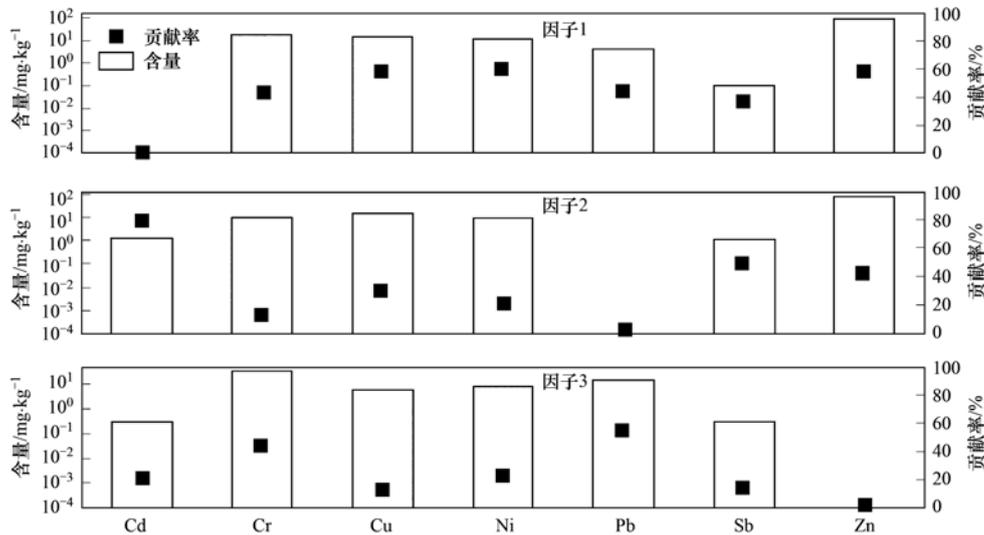


图4 基于PMF解析的土壤重金属来源轮廓

Fig. 4 Profiles of sources of heavy metals from PMF model

#### 4 结论

(1)城口地区表土中 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Sb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的中值分别为0.61、41.3、37.3、1.67和136  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过重庆市土壤背景值。地累积指数和内梅罗指数均表明Cd是该地区表土中的主要污染元素。其中,地累积指数表明,26.1%和17.4%的土壤样品Cd分别处于轻度污染和中度污染,22.6%土壤样品Cd处于中度至重度污染,极少数样品为重度以上污染,其余重金属多处于未污染至轻度污染。

(2)土壤中Cd和Zn超标点多位于乌坪断裂以北地区,该地区主要为埃迪卡拉纪和寒武纪地层。秦岭地槽区表土中多数重金属含量高于上扬子地台区,其中埃迪卡拉纪~早寒武世地层之上的土壤重金属含量显著高于上扬子地台区相同时代地层。结果表明成土母岩形成时的构造沉积环境差异可导致其上发育的土壤重金属含量差异。

(3)研究区表土重金属来源主要为成土母岩风

化和交通、燃煤活动,其贡献率分别为75%和25%,表明成土母岩是控制研究区表土重金属含量分布和污染的主要因素。

#### 参考文献:

- [1] Yang Q, Yang Z F, Filippelli G M, *et al.* Distribution and secondary enrichment of heavy metal elements in karstic soils with high geochemical background in Guangxi, China[J]. *Chemical Geology*, 2021, **567**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120081.
- [2] 张浙, 卢然, 伍思杨, 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.
- [3] Ren Z Q, Xiao R, Zhang Z H, *et al.* Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: a case study in the coastal city of Zhejiang Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019, **33**(11): 2109-2118.
- [4] Guo K G, Xiang W, Zhou W D, *et al.* In situ plant bionic remediation of cadmium-contaminated soil caused by a high geological background in Kaihua, Zhejiang Province, China[J]. *Chemosphere*, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128693.

- [ 5 ] Yang S H, Qu Y J, Ma J, *et al.* Comparison of the concentrations, sources, and distributions of heavy metal(loid)s in agricultural soils of two provinces in the Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114688.
- [ 6 ] Wang F F, Guan Q Y, Tian J, *et al.* Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor[J]. *CATENA*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104573.
- [ 7 ] 张倩, 韩贵琳. 贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3269-3277.  
Zhang Q, Han G L. Speciation characteristics and risk assessment of soil heavy metals from puding karst critical zone, Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3269-3277.
- [ 8 ] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 全国土壤污染状况调查公报[J]. *中国环保产业*, 2014, (5): 10-11.
- [ 9 ] Yuan X H, Xue N D, Han Z G. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **101**: 217-226.
- [ 10 ] Zinn Y L, De Faria J A, De Araujo M A, *et al.* Soil-parent material is the main control on heavy metal concentrations in tropical highlands of Brazil[J]. *CATENA*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104319.
- [ 11 ] Fry K L, Wheeler C A, Gillings M M, *et al.* Anthropogenic contamination of residential environments from smelter As, Cu and Pb emissions: Implications for human health [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114235.
- [ 12 ] 何愿, 张成江, 徐争启, 等. 万源市土壤重金属地球化学特征及污染评价[J]. *物探化探计算技术*, 2009, **31**(3): 277-282.  
He Y, Zhang C J, Xu Z Q, *et al.* Geochemical characterization and evaluation of heavy metal elements in cultivated soil of Wanyuan area[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, **31**(3): 277-282.
- [ 13 ] Liu X Y, Shi H D, Bai Z K, *et al.* Heavy metal concentrations of soils near the large opencast coal mine pits in China[J]. *Chemosphere*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125360.
- [ 14 ] Wang J W, Zhang Y S, Wang T, *et al.* Effect of modified fly ash injection on As, Se, and Pb emissions in coal-fired power plant [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **380**, doi: 10.1016/j.cej.2019.122561.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Yang S C, Hu W X, Wang X L. Mechanism and implications of upwelling from the Late Ordovician to early Silurian in the Yangtze region, South China[J]. *Chemical Geology*, 2021, **565**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120074.
- [ 17 ] Liu Z X, Yan D T, Du X B, *et al.* Organic matter accumulation of the early Cambrian black shales on the flank of Micangshan-Hannan Uplift, northern upper Yangtze Block, South China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.petro.2021.108378.
- [ 18 ] 赵坤, 李婷婷, 朱光有, 等. 中国华南渝东北城口地区下寒武统烃源岩发育环境与形成机制[J]. *沉积学报*, 2020, **38**(5): 1111-1122.  
Zhao K, Li T T, Zhu G Y, *et al.* Development environment and formation mechanism of lower cambrian source rocks in the Chengkou area, northeast Chongqing, south China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, **38**(5): 1111-1122.
- [ 19 ] Liu R P, Xu Y M, Zhang J H, *et al.* Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaoqingling Gold Belt, China[J]. *China Geology*, 2020, **3**(3): 402-410.
- [ 20 ] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 941-951.  
Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Characteristics of cadmium enrichment and pollution evaluation of a soil-crop system in a typical karst area[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 941-951.
- [ 21 ] Bhuiyan H M A, Karmaker S C, Bodrud-Doza M, *et al.* Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods[J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128339.
- [ 22 ] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2020, **47**(6): 1625-1636.  
Bao L R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- [ 23 ] 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].
- [ 24 ] 孙在金, 赵淑婷, 林祥龙, 等. 基于物种敏感度分布法建立中国土壤中镉的环境基准[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(4): 774-781.  
Sun Z J, Zhao S T, Lin X D, *et al.* Deriving soils environmental criteria of antimony in China by species sensitivity distributions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(4): 774-781.
- [ 25 ] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [ 26 ] Bi X Y, Zhang M H, Wu Y J, *et al.* Distribution patterns and sources of heavy metals in soils from an industry undeveloped city in Southern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **205**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111115.
- [ 27 ] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [ 28 ] 刘书淮, 王德伟, 施泽明, 等. 城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析: 以天府新区青龙片区为例[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1535-1545.  
Liu S H, Wang D W, Shi Z M, *et al.* Geochemical characteristics and source apportionment of soil elements in an urban-rural integration area: a case study in the Qinglong area of Tianfu new district[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1535-1545.
- [ 29 ] Wu J, Li J, Teng Y G, *et al.* A partition computing-based positive matrix factorization (PC-PMF) approach for the source apportionment of agricultural soil heavy metal contents and associated health risks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121766.
- [ 30 ] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide[R]. US, Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/

- 600/R-14/108 (NTIS PB2015-105147), 2014.
- [31] Bocardi J M B, Pletsch A L, Melo V F, *et al.* Quality reference values for heavy metals in soils developed from basic rocks under tropical conditions [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, **217**, doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106591.
- [32] Bonfatti B R, Demattê J A M, Marques K P P, *et al.* Digital mapping of soil parent material in a heterogeneous tropical area [J]. *Geomorphology*, 2020, **367**, doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107305.
- [33] Gruber F E, Baruck J, Mair V, *et al.* From geological to soil parent material maps - A random forest-supported analysis of geological map units and topography to support soil survey in South Tyrol [J]. *Geoderma*, 2019, **354**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113884.
- [34] Ayoubi S, Adman V, Yousefifard M. Use of magnetic susceptibility to assess metals concentration in soils developed on a range of parent materials[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **168**: 138-145.
- [35] 程军, 程礼军. 重庆城口地区下寒武统黑色岩系重金属富集特征及其生态环境效应[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(1): 93-99.
- Cheng J, Cheng L J. The Concentrations of heavy metals in the lower Cambrian black rock series in Chengkou district, Chongqing and their environmental effects [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(1): 93-99.
- [36] Pagès A, Barnes S, Schmid S, *et al.* Micron-scale distribution of metals in Cambrian metalliferous shales, South China: Insights into local biologically driven redox disequilibrium[J]. *Chemical Geology*, 2019, **528**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2019.119283.
- [37] Pi D H, Jiang S Y, Luo L, *et al.* Depositional environments for stratiform witherite deposits in the Lower Cambrian black shale sequence of the Yangtze Platform, southern Qinling region, SW China: Evidence from redox-sensitive trace element geochemistry [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, **398**: 125-131.
- [38] Dong Y P, Sun S S, Yang Z, *et al.* Neoproterozoic subduction-accretionary tectonics of the South Qinling Belt, China [J]. *Precambrian Research*, 2017, **293**: 73-90.
- [39] Liu H, Zhao J H, Cawood P A, *et al.* South China in Rodinia: Constrains from the neoproterozoic suixian volcano-sedimentary group of the south Qinling selt [J]. *Precambrian Research*, 2018, **314**: 170-193.
- [40] Nie H, Ye R S, Cheng H, *et al.* Neoproterozoic intrusions along the northern margin of south Qinling, central China: Geochemistry, zircon ages, and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 2019, **334**, doi: 10.1016/j.precamres.2019.105406.
- [41] Frei R, Xu L G, Frederiksen J A, *et al.* Signals of combined chromium-cadmium isotopes in basin waters of the Early Cambrian-Results from the Maoshi and Zhijin sections, Yangtze Platform, South China[J]. *Chemical Geology*, 2021, **563**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120061.
- [42] Han T, Zhu X Q, Li K, *et al.* Metal sources for the polymetallic Ni-Mo-PGE mineralization in the black shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, **67**: 158-169.
- [43] Liu X K, Song H J, Bond D P G, *et al.* Migration controls extinction and survival patterns of foraminifers during the Permian-Triassic crisis in South China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, **209**, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103329.
- [44] Liu H J, Xue Y Z. Sedimentology of Triassic Dounan-type manganese deposits, western margin, Yangtze Platform, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 1999, **15**(1-3): 165-176.
- [45] 周维贵. 重庆城口“高燕式”锰矿沉积地质特征及成因研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- Zhou W G. Research on depositional feature and genesis of the Gaoyan type manganese deposit in Chengkou, Chongqing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [46] 项波. 城口下古生界页岩层系构造特征与页岩气成藏条件研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- Xiang B. Research on shale formation characteristics and reservoir forming conditions of shale gas in lower Paleozoic in Chengkou County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [47] Fei X F, Lou Z H, Xiao R, *et al.* Contamination assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soil through the synthesis of PMF and GeogDetector models [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **747**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141293.
- [48] 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.
- [49] Gong H F, Chi J, Ding Z, *et al.* Removal of lead from two polluted soils by magnetic wheat straw biochars [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **205**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111132.
- [50] Biswas T, Parveen O, Pandey V P, *et al.* Heavy metal accumulation efficiency, growth and centelloside production in the medicinal herb *Centella asiatica* (L.) urban under different soil concentrations of cadmium and lead [J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, **157**, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112948.
- [51] Shao Y Y, Yan T, Wang K, *et al.* Soil heavy metal lead pollution and its stabilization remediation technology [J]. *Energy Reports*, 2020, **6**: 122-127.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM <sub>2.5</sub> Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO <sub>2</sub> Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)