

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郑蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价

杨宇^{1,2}, 郭婷婷¹, 刘孝利^{1,2*}, 铁柏清^{1,2}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南省灌溉水源水质污染净化工程技术研究中心, 长沙 410128)

摘要: 为了解我国南方典型矿区所在流域的耕地土壤重金属含量空间分布特征及其污染状况, 对所选取的小流域内耕地土壤 6 种重金属 (Cd、As、Mn、Cu、Zn 和 Pb) 的总量进行测定, 运用空间插值方法分析典型矿区小流域尺度重金属含量的空间分布特征, 并采用地累积污染指数法与潜在生态危害指数法进行了生态风险评价。结果表明, 小流域内耕层 (0~20 cm) 土壤中 Pb、Zn、Cu、As 和 Cd 的含量均值分别高出背景值约 11.9、3.8、8.2、4.7 和 14.2 倍, 样品超过农用地土壤污染风险筛选值的比例分别为 24%、56%、75%、44% 和 48%, Zn 和 Mn 呈现中等变异, Pb、As、Cu 和 Cd 则发生了强变异, 表明小流域内存在明显的重金属富集现象; 空间分析结果显示, 耕地土壤 6 种重金属的空间分布有明显的一致性特征, 即在矿业活动区及其下游和小流域西部乡镇街道处存在富集, 在流域主河道干流两侧存在部分重金属的高值点, 表明研究区内最主要的污染来源是矿冶活动及污染河水灌溉; 地累积污染指数法与潜在生态危害评价结果表明, 小流域内存在重金属复合污染, 尤以 Cd 污染的程度最高, 河流干流两侧耕地生态风险等级最高。

关键词: 小流域; 土壤重金属; 空间分布; 地累积指数; 生态风险评价

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1602-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204294

Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China

YANG Yu^{1,2}, GUO Ting-ting¹, LIU Xiao-li^{1,2*}, TIE Bo-qing^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Technology and Research Center for Irrigation Water Resource and Quality Purification of Hunan Province, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to clarify the spatial distribution characteristics and the present situation of heavy metal pollution in cultivated soil of a typical mining basin in southern China, the contents of Cd, As, Mn, Cu, Zn, and Pb in cultivated soil in the selected small watershed were determined, and the spatial distribution characteristics of heavy metals were analyzed using the spatial interpolation method. Further, the ecological risk was evaluated using the geo-accumulation index and potential ecological risk coefficient (PERC). The results showed that the average contents of Pb, Zn, Cu, As, and Cd in the topsoil (0-20 cm) in the small watershed were approximately 11.9, 3.8, 8.2, 4.7, and 14.2 times that of the background value in Hunan soil, respectively. Compared with the soil risk screening value of agricultural land, the over-standard rates of Pb, Zn, Cu, As, and Cd were approximately 24%, 56%, 75%, 44%, and 48%, respectively. Zn and Mn showed medium variation, whereas Pb, As, Cu, and Cd showed strong variation, which indicated that there was an obvious enrichment of heavy metals in the small watershed. The spatial analysis results showed that there was an obvious consistent characteristic of six heavy metals in the topsoil, that is, there was enrichment in the mining activity area and its downstream and the township streets in the west of the small watershed. Additionally, there were high value points of some heavy metals on both sides of the main river, indicating that the main pollution sources in the study area were mining and metallurgy activities and sewage irrigation. The results of the geo-accumulation index and potential ecological risk index showed that there was compound pollution of heavy metals, in which the degree of Cd pollution was the highest, and the soil of both sides of the river could pose the strongest potential ecological risk.

Key words: small watershed; heavy metals in soil; spatial distribution; geoaccumulation index; ecological risk assessment

土壤是农业生产中最重要的自然资源, 耕地土壤健康对保障粮食安全有不可替代的作用^[1]。随着工业化、城市化和农业集约化生产的快速发展, 重金属通过有色金属采冶、污水灌溉、大气沉降及农业投入品等途径进入土壤, 在空间和时间上不断累积造成严重的大范围土壤重金属污染问题^[2~7], 致使农产品质量安全受到严重威胁。尚二萍等^[8]研究表明, 自 20 世纪 80 年代以来, 我国粮食主产区耕地土壤重金属点位超标比例增加趋势显著, 采矿业、工业及污灌水是五大粮食主产区耕地土壤重金属的最主要的污染来源。湖南素有“洞庭鱼米之乡”的美

称, 数据显示, 湖南省 2020 粮食总产量为 3.015×10^7 t, 居全国第二, 全省粮食播种面积为 4754.75×10^4 hm², 水稻种植面积居全国第一^[9]。湖南也是著名的“有色金属之乡”, 矿产资源丰富, 矿山的开采必然会造成严重的土壤、水、大气环境污染问题。早在十几年前就有调查显示, 湖南省因采矿冶炼活动造成的重金属污染土壤面积高达 2.8×10^4 km²,

收稿日期: 2022-04-25; 修订日期: 2022-06-21

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ4370)

作者简介: 杨宇 (1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤与水环境重金属污染修复与评价, E-mail: 321708575@qq.com

* 通信作者, E-mail: 839126754@qq.com

占全省总耕地面积的 13%^[10]。

针对湖南省典型地区土壤重金属污染问题,近年来不少学者从不同尺度出发,在土壤重金属空间分布、污染溯源与风险评价等方面开展了深入的研究。刘昭玥等^[11]基于 UNMIX 模型和莫兰指数探明了湖南省汝城县土壤中 7 种重金属的来源。段淑辉等^[12]对湘中南重金属潜在风险区内土壤、肥料和灌溉水样品中的重金属污染特征及污染来源进行了研究。余嘉衍等^[13]在湖南省某矿遗址周围分区采集农田土壤样品,得到两个区域农田土壤重金属的污染特征,并对该地区进行了风险评估。

然而,当前大部分研究多集中于较大的省、市等大尺度^[14~16],或田块、采矿场地等较小尺度^[17~19],针对农业小流域尺度,特别是典型涉矿污染区所在农业小流域土壤重金属的污染空间特征及其生态风险评价研究相对较少。小流域是一个完整的集水区,立足流域尺度对矿山-河流-土壤生态系统中重金属的污染特征进行研究,对指导农业生产安全具有重要的实践意义。因此,本文选取具有水系简单、山群环绕且重金属污染问题突出等特点的南方典型涉矿污染区所在农业小流域为研究对象,借助 GIS 手段开展农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评价研究,旨在为矿区农业小流域尺度耕地土壤重金属污染综合防治与修复和农业安全生产提供数据支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于湖南省浏阳市,为一向西开阔的狭长谷地,属剥蚀丘陵与溶蚀堆积谷地地貌^[20],境内主要河流为宝山河(铁山河),由碾石至澄潭汇入大溪河,最终汇进浏阳河,属浏阳河二级支流。当地已探明地下矿藏主要有金、银、铜、铅、锌、锑、铋和硫等,历史上盛产铅、铁、硼砂、青矾、胆矾、土黄和碱石。该流域的矿业开采历史悠久,最早可追溯至明代,1958 年进行矿床勘察后则进入现代开采阶段。流域中现存两处矿业公司,一处是创建于 1979 年的铜锌矿业,主要销售硫、铜、锌和铅锌混合精矿;一处是 1989 年建设投产的硫铁矿(2005 年改名为博隆矿业),主要产品有硫铁、铜、锌精原矿和铅锌混合精矿等。流域干流自东向西流经相近的两处矿业活动区,是其两侧农田生产主要的灌溉用水来源。自 2010 年以来,乡镇投入大量资金,多次开展矿区地质环境改善防治工作,一定程度上缓解了问题,但清洁水资源枯竭、土壤重金属超标等问题依然严峻^[21]。

1.2 样品采集与分析

根据研究小流域的地形地貌、水文特征,在流域内沿干流左右两侧布设采样点(图 1),原则上保证沿河流流向采样点间的水平距离不超过 1 km,依实际情况利用土钻(直径为 8 cm)随机选取铁山河干流及主要支流附近的农田采集耕层(0~20 cm)土壤样品。为了保证样本的代表性,每个采样点位的区域为 100 m × 100 m,在此范围内采集同一田块或相邻田块的 3~5 个子样品,将其所测值的平均值记为该采样点位的值,共计 83 个采样点位(由上游至下游按采样顺序依次编号为 1~83),采样同时记录样点的经纬度、土壤类型与历史耕作情况等相关信息。采样选在早稻种下前的 4 月和 5 月,在未发生降雨条件下分两次进行,采集的土壤样品装入聚乙烯样品袋中封好带回实验室。

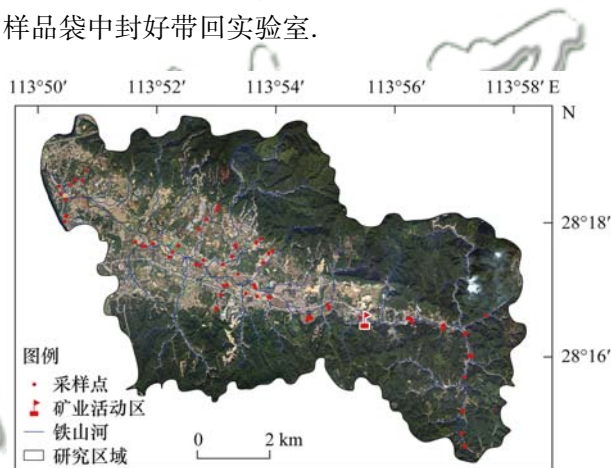


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

土壤样品在室内进行自然风干,挑去杂物,磨碎依次过 10 目和 100 目分样筛。采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$ 法消解土壤样品,消解全程用国家标准物质进行质量控制,用 ICP-OES 测定土壤典型重金属 Cd、As、Mn、Cu、Zn 和 Pb 的含量;土壤 pH 测定参照中华人民共和国农业行业标准 NYT 1377-2007。

1.3 污染评价方法

1.3.1 地累积污染指数法

地累积污染指数法(I_{geo})由德国学者 Muller 于 1969 年提出^[22],用于定量评价沉积物中重金属污染状况的方法,近年来也被广泛应用于土壤重金属污染的评价中。这种评价方法既考虑了人为活动的影响,又考虑了自然条件下成土母质的影响,能够反映自然分布特征,但侧重于对单一元素的评价,且对生物有效性、多种元素综合影响的考虑较少^[23]。其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (K \times C_0)]$$

式中, I_{geo} 为地累积污染指数; C_n 为土壤样品中重

金属 n 的实际检测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_0 为参照值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本文采用湖南省土壤背景值^[24]; K 为引起背景值变动的修正系数, 本文取值 1.5^[25]. 地累积污染指数法将重金属污染程度分为 7 级^[26], 具体见表 1.

表 1 地累积污染指数分级标准

Table 1 Classification standard of geoaccumulation index

等级	I_{geo}	污染程度
1	$I_{\text{geo}} < 0$	无污染
2	$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	无污染 ~ 中污染
3	$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	中污染
4	$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	中污染 ~ 强污染
5	$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	强污染
6	$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	强污染 ~ 极强污染
7	$I_{\text{geo}} \geq 5$	极强污染

1.3.2 潜在生态危害指数法

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出的潜在生态危害指数法, 是一种从沉积学角度评价水体沉积物重金属污染及其生态危害的方法^[27], 目前被广泛应用于沉积物与土壤重金属污染评价. 该方法不仅能

反映单一元素的环境影响, 也能反映多种元素协同作用的影响, 而且结合了生物毒理性和生态学等方面的内容^[28]. 其计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i = (T_r^i \times C_{\text{实测}}^i) / C_n^i$$

$$\text{RI} = \sum E_r^i$$

式中, E_r^i 为潜在生态危害单项系数; RI 为多种重金属污染物潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, 以 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数 (Cd:30; As:10; Cu:5; Zn:1; Pb:5) 为评价依据^[29]; C_r^i 为重金属 i 的污染参数; $C_{\text{实测}}^i$ 为重金属 i 的实际检测含量; C_n^i 为重金属对应的评价标准, 本文采用湖南省土壤环境背景值^[24]. 鉴于该研究区只调查了 5 种主要污染的重金属, 采用原有基于 8 种污染物的 RI 风险分级标准, 可能会造成对该小流域生态风险的低估, 因此本研究通过调研与分析基于重金属种类对 RI 污染等级的划分标准进行了相应调整^[30]. 潜在生态风险系数及调整后综合潜在生态风险指数污染等级的划分标准如表 2.

表 2 潜在生态风险分级标准

Table 2 Classification standard of potential ecological risk coefficient

风险等级	轻微	中等	强	很强	极强
E_r^i	< 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
RI	< 50	50 ~ 100	100 ~ 200	> 200	—

1.4 数据处理与分析

应用 Excel 和 SPSS23.0 对土壤重金属含量进行描述性统计分析; 在 ArcGIS10.6 软件中, 应用水文分析功能对从中国科学院资源环境科学与数据中心获取的 DEM 数据进行处理, 得到流域相关数据信息, 采用反距离权重插值法 (inverse distance weighted, IDW) 绘制土壤重金属污染空间分布; 应用 Origin2018 与 ArcGIS10.6 展示重金属污染评价结果.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量的统计分析

小流域耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤整体呈酸性, pH 范围在 4.1 ~ 6.87 之间. 对 6 种典型重金属进行描述性统计发现, 与湖南省土壤背景值^[24] 相比, Pb、Zn、Cu、As 和 Cd 的含量平均值明显偏高, 分别为背景值的 11.9、3.8、8.2、4.7 和 14.2 倍, 说明该 5 种重金属元素在流域内均有不同程度的富集, 其中 Cd、Pb 和 Cu 富集较为显著 (表 3). 偏度系数反映了数据的正态分布双尾特征, 标准正态分布偏度为 0^[31], 但在人为干扰下, 重金属出现区域上的富集, 含量偏高的样点数增多, 造成概率分布的正偏, 即偏

度系数大于 0. 分析结果得出, 本文中 6 种重金属元素的偏度系数都大于 0, 说明存在人类活动或工业化活动使重金属元素不断富集的现象, 峰度系数则反映了样本数据的集中程度, Pb、Cu、As、Zn 和 Mn 的峰度系数大于 3 (标准正态分布的峰度), 说明其数据分布较为集中, 更能反映整体性, Cd 的数据则较为分散, 可能存在异常的极端值 (表 3). 变异系数是描述样本点数据波动特征的参数, 反映了元素的空间离散程度和变异性, 一般来说, 离散程度越大, 变异系数越大, 受人为活动影响越大^[32, 33]. 根据有关研究对变异系数大小的分级^[34, 35], Zn 和 Mn 的变异系数分别为 0.89 和 0.99, 在中等空间变异 0.1 ~ 1 的范围内, 而 Pb、As、Cu 和 Cd 的变异系数都大于 1, 属于强变异 (表 3), 说明这 4 种重金属元素在土壤中的空间分布不均匀, 可能受到人为活动影响. 与农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618-2018) 相比, 所有样点中的 Cd、As、Cu、Zn 和 Pb 点位超标率分别为 48%、44%、75%、56% 和 24%, 此 5 种元素含量的最大值和最小值相差最高达 419 倍之多, 可见在研究区域土壤中 Cd、As、Cu、Zn 和 Pb 都有高含量点, 均存在不同程度的点源污染 (表 3).

表 3 土壤重金属含量统计分析¹⁾
Table 3 Statistical analysis of heavy metals in soil

项目	Cd	As	Mn	Cu	Zn	Pb
平均值	2.01	60.61	804.94	203.65	321.64	359.06
背景值 ^[24]	0.142	12.86	—	24.96	84.36	30.09
标准差	3.00	96.52	800.66	322.25	285.02	942.16
最小值	0.04	2.97	70.98	14.43	44.07	12.30
最大值	12.58	505.03	5 191.67	2 068.83	1 570.33	5 155.00
偏度	1.85	3.02	3.31	4.05	2.11	4.53
峰度	2.69	9.19	13.37	19.41	5.02	20.38
变异系数	1.49	1.59	0.99	1.58	0.89	2.62
超标率/%	48	44	—	75	56	24

1) “—”表示没有参考值；超标率为参照风险筛选值

2.2 土壤重金属空间分布特征

运用反距离权重法对土壤重金属含量进行插值,由于各重金属元素之间含量数值差异较大,对不同的元素采用不同的分级标准,按大小依次排列,以便揭示各重金属在空间上的分布特征.

如图 2 所示,小流域内耕层土壤 $\omega(\text{Cd})$ 在 0.04

~12.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,高含量值点位所占比重更大,污染程度从污染中心向外层层递减,以流域下游城镇处最为严重; Cu 和 Zn 含量值在各个梯度分布得较为均匀,高值区所占面积较小; As 只在矿业活动区下游有极小面积的高值区,大部分都是低值区,与整体分布特征略有差别; Pb 在矿业活动区下游

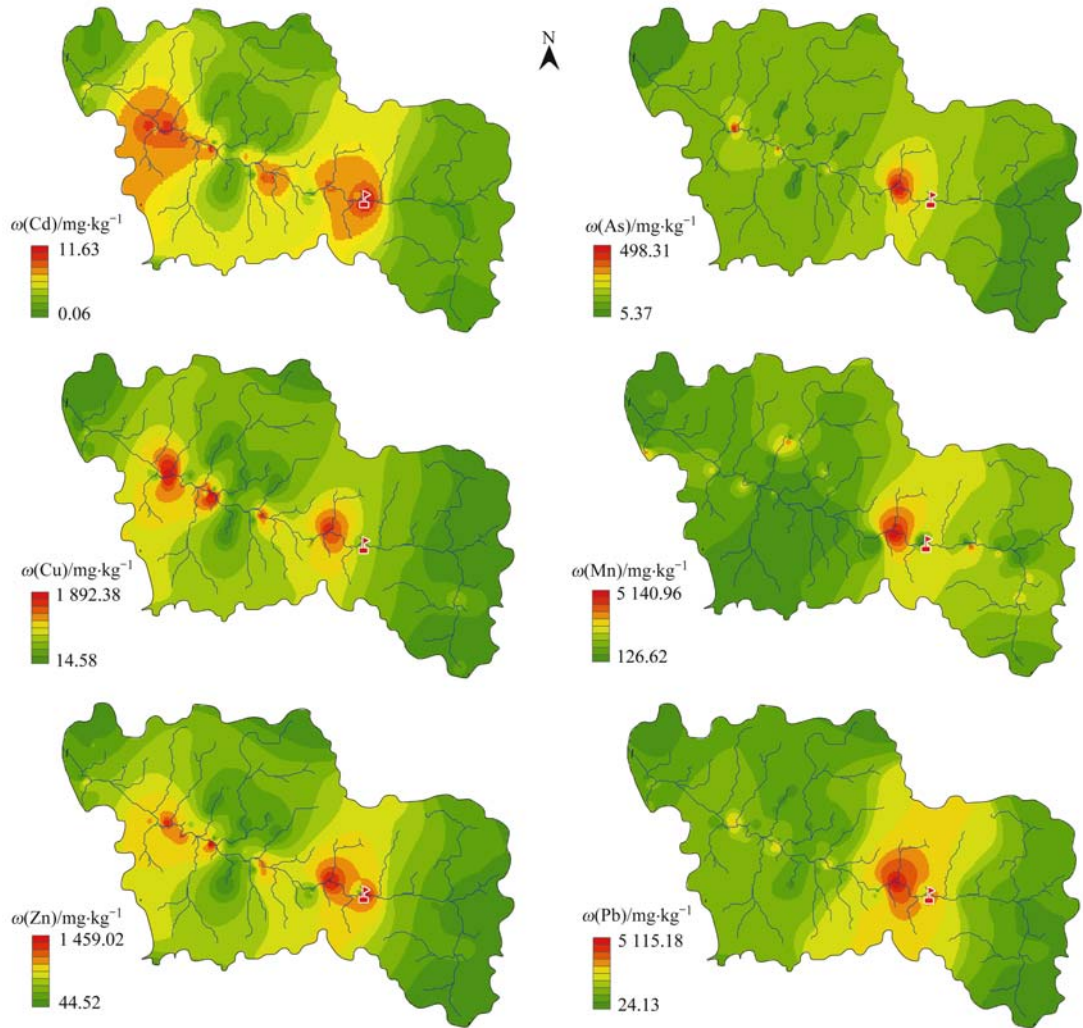


图 2 土壤重金属含量空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal contents in soil

的含量分布特征表现出明显的缓冲区扩散规律,还有个别污染热点呈现出分布在干流两侧的规律.整体而言,Cd、Cu 和 Zn 这 3 种重金属主要的高值区集中在矿业活动区及其下游处和流域西部城镇处;As、Mn 和 Pb 除在矿业活动区及其下游处有一片高值区,还有少量高值点分布在铁山河干流左右.

2.3 土壤重金属污染评价

2.3.1 地累积污染指数评价

图 3 为 5 种重金属元素位于地累积污染指数评价标准各个级别样点的占比,地累积指数结果发现,约有 54% 样点未受到重金属 Cd 污染或受到轻污染,Cd 污染程度达到强污染等级及以上($I_{geo} \geq 3$)的样点数在 5 种元素中最多;未受污染样点占比最高的是重金属 As(约 52%);受不同程度 Cu 污染的样点数占比在 5 种重金属单一污染中最高,其次为 Pb,此 2 种元素评价结果也极为相似;流域内 Zn 污染程度最高只达到强污染,且占比极小(约 2%).该评价结果表明,研究流域内单一污染程度较高面积较大的有 Cd、Cu 和 Pb,As 和 Zn 污染只存在于少数位置,且程度不高.结合各重金属的地累积污染指

数在空间上的分布来看(图 4),整体上,Cu 和 Pb 在流域内存在大面积富集,可能存在面源污染,Cd 则出现较多的高值点,可能存在较强的点源污染,As 和 Zn 在部分样点有一定程度的富集,但超过半数的样点均处于轻度污染或清洁状态,整体污染面积更小,污染程度更轻.5 种重金属元素中污染程度强的样点均分布在矿业活动区开始的流域中下游地区,集中在铁山河干流左右.

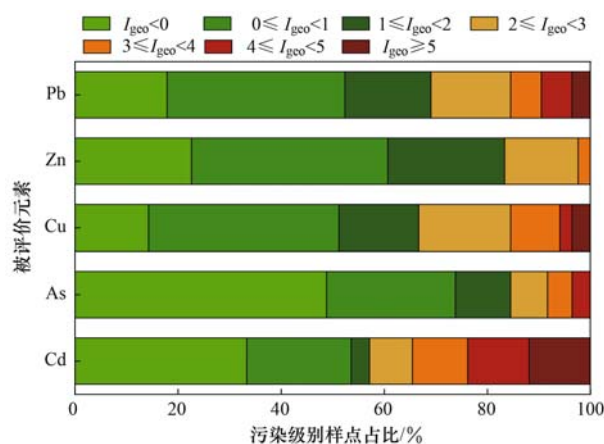
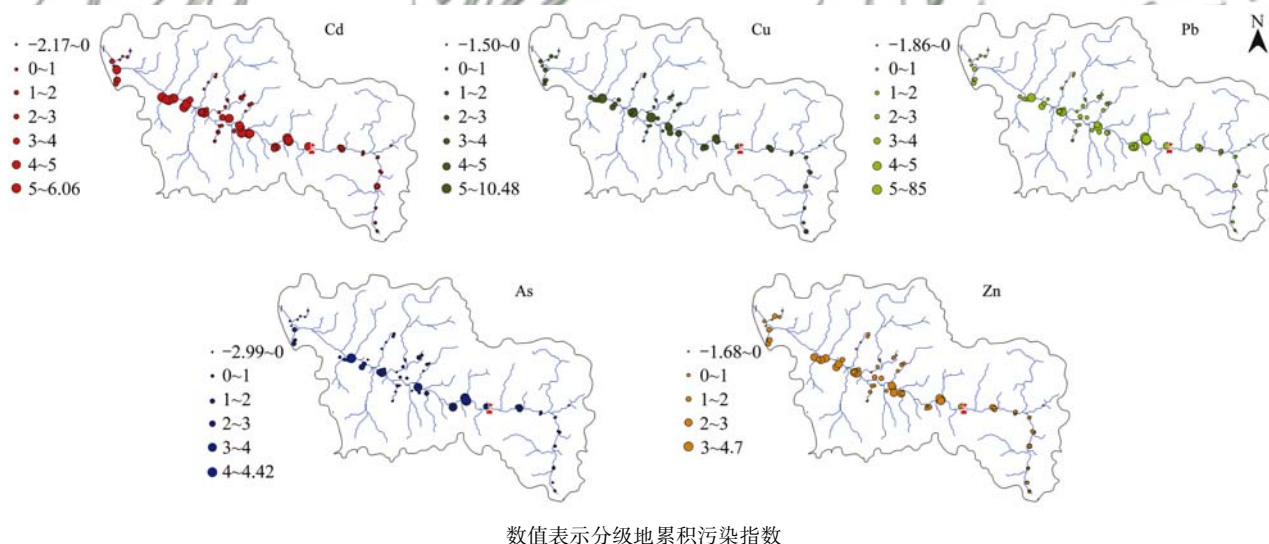


图 3 地累积污染指数评价结果

Fig. 3 Evaluation result of geoaccumulation index



数值表示分级地累积污染指数

图 4 地累积污染指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of geoaccumulation index

2.3.2 潜在生态危害指数评价

图 5(a) 为小流域耕层土壤中 5 种典型重金属的潜在生态危害单项系数位于评价标准各个级别样点的占比.结果显示,Cd 的生态风险级别在强风险及以上的样点占比为 5 种重金属元素中最高(约 48%);As 有约 81% 的样点处于轻微风险,仅有不到 6% 的样点处于高风险及以上;Cu 和 Pb 各风险级别的样点占比相似,潜在生态危害系数取值范围分别为 2.64 ~ 378.91 和 2.07 ~ 867.85;Zn 在所有样点均处于轻微风险级别.此评价结果表明,研究流

域内有轻微潜在 Zn 生态危害,大部分样点都存在较低的潜在 As、Cu 和 Pb 生态危害,可能存在较高的 Cd 生态危害.图 6 为各重金属潜在生态危害单项系数的空间分布,高风险样点在空间分布上的特征基本与地累积污染指数得到的结果保持一致:从矿业活动区起沿干流左右分布,离干流较远的样点则风险程度较低.

图 5(b) 为所有样点的综合潜在生态危害指数,RI ≥ 50 的点占位约为 93%,即研究流域内绝大多数点位均处于较高的综合生态风险等级,可能存在

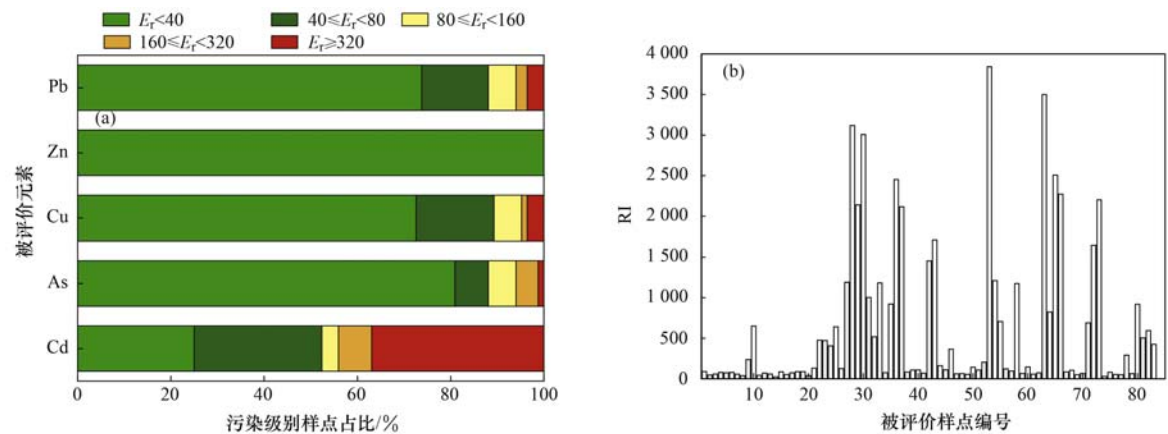


图5 潜在生态危害评价结果

Fig. 5 Assessment result of potential ecological hazard

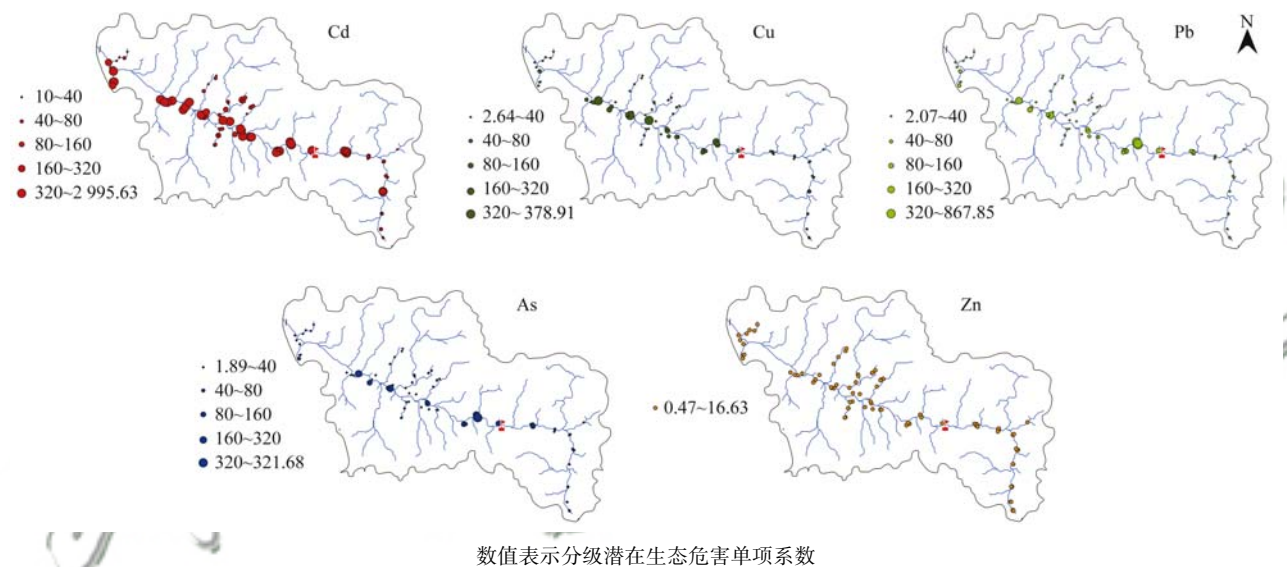


图6 潜在生态危害单项系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of single coefficient of potential ecological hazard

严重的重金属复合污染,其中 Cd 较其余 4 种重金属元素相比存在更高的生态风险。

3 讨论

本研究 6 种典型重金属元素在小流域空间上的整体分布特征与早期戴塔根等^[36]对此区域的调查结果基本一致,均在矿区近下游及城镇两片区域呈现高富集。结合前期实地调研及收集到的资料可以初步判断,研究小流域内重金属最大的污染来源为采矿冶炼活动,由此产生的“三废”历史上的粗放管理和无序排放,通过大气沉降、随降雨冲刷和污水灌溉等过程导致的重金属在水和土这 2 种主要环境介质中的转移扩散。有研究发现,道路交通中燃油、尾气排放、轮胎或路面磨损及运输品泄漏等过程产生的重金属可以通过大气沉降、道路径流和路面溅洒水等途径对周边土壤、水源或植物造成一定程度的污染^[37~39],而本研究流域内交通干道是沿着干流

由东向西而下,而干流灌溉区的农田土壤重金属污染最严重,生态风险等级最高(图 4 和图 6),因此推测流域内有色金属矿产采冶过程运输活动,也可能是造成河道水及周边土壤污染严重的原因之一,加剧了土壤中重金属的积累。Cd、Cu 和 Zn 在小流域下游城镇周围表现出不同于 As、Mn 和 Pb 的高度集中,与 Lv 等^[40]对山东莒县土壤重金属污染空间分布特征的研究结论大体一致。成瑾等^[41]的研究还发现磷矿分布区周围农田土壤重金属超标最严重的是 Cd,因此合理推测导致小流域下游城镇周围出现 Cd 等重金属高富集现象的原因之一可能是其西侧泉塘村的永和磷矿。实际上,原生土壤重金属元素含量在空间上的差异受多种因素制约,如元素的化学性质、存在状态和载体矿物的风化作用、气候、水文条件和生物活动等,都可能影响土壤重金属元素的地球化学行为,从而造成其在空间上的相对富集^[42],人类活动则不同程度地加剧了其空间分布的

不均匀性. 一直以来,对存在人类活动干扰的土壤重金属空间分布异质性比原生土壤元素异常的解释更具难度. 本研究结果(图2)与研究区域的地形地貌、水文特征、成土母质等自然因素和采矿活动、污水灌溉、农产品过量投入等人为活动更是有着密不可分的关系,因此对该结果的深入解释尚需更多数据支撑及相关资料辅助验证.

潜在生态危害指数主要应用于评估重金属毒性水平、污染浓度、环境对污染的敏感性,以及污染物对生命系统健康的潜在危害等. 沈洪艳等^[43]和任加国等^[44]对典型涉矿污染区土壤重金属的潜在生态风险评价结果发现,Cd的生态风险等级最高,与本研究针对6种典型重金属潜在生态危害指数评价结果一致(图5),地累积指数评价结果与潜在生态风险指数评价结果一致(图4和图6). 作为铅锌矿最常见的伴生元素,Cd对人体的毒性强度及在环境中的敏感程度在主要土壤重金属污染物中均是最高,根据Hakanson制定的评价标准,其毒性系数也最高. 作为典型的酸雨污染区,受工业及降雨的影响,湖南地区的土壤大都是酸性环境,而Cd在酸性条件下更容易发生迁移扩散. 除Cd外,结合潜在生态风险评价结果与各重金属超标率还发现,Cu作为研究流域内超标率最高的重金属,同时表现出较高的生态风险,Zn的超标比率仅低于Cu但具有较低的生态风险,这可能与两种元素的化学性质有关. 相关研究表明,农田土壤中的重金属易向作物转移并积累^[45],其富集系数受土壤污染程度、环境条件及作物本身特性的影响^[46]. 在实际的农业生产中,应当尽量避开重金属高富集区或采取种植结构调整的措施,减少重金属向作物的富集,降低食品安全风险.

根据本研究结果,该小流域存在多种重金属复合污染,且部分重金属如Cu和Pb,可能存在面源污染,为加强流域内土壤污染治理及生态风险防控,保障农业安全生产,根据本研究结果提出如下3点展望:①开展大比例尺的调查研究工作,精确划分风险等级区域,针对不同风险区合理制定相应的修复措施;②对各重金属不同的污染来源做详细解析,以便更精准地从源头防控;③结合各重金属的形态及淋溶流失情况分析,明确其在水和土这2种主要环境介质中的迁移转化机制,从而采取有效措施降低重金属的毒性,保证农业安全生产.

4 结论

(1)研究小流域内耕层土壤Pb、Zn、Cu、As和Cd的含量平均值显著高于当地土壤背景值,分别为

背景值的11.9、3.8、8.2、4.7和14.2倍,相比于农用地土壤污染风险筛选值超标率分别为24%、56%、75%、44%和48%;其中Zn和Mn呈现中等变异,Pb、As、Cu和Cd呈强变异,空间离散程度和变异程度较强,受人为活动影响较大.

(2)小流域内耕地重金属的空间分布有明显的整体特征: Cd、As、Mn、Cu、Zn和Pb在矿业活动区及其下游均存在高值区,此外Cu和Zn在流域下游西部有第二片高值区,Pb和Mn在铁山河干流两侧有零星高含量点.

(3)两种污染评价方法的评价结果基本一致: 小流域内存在大面积的多种重金属复合污染,单一重金属污染中Cd污染程度与风险等级最高,Cu和Pb可能存在面源污染;铁山河干流两侧耕地土壤重金属生态风险等级较其他区域更高,又是农田集中分布区,应引起足够的重视.

参考文献:

- [1] 江振蓝, 杨玉盛, 沙晋明. GWR模型在土壤重金属高光谱预测中的应用[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 533-544.
Jiang Z L, Yang Y S, Sha J M. Application of GWR model in hyperspectral prediction of soil heavy metals [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(3): 533-544.
- [2] 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.
- [3] 陈丹丹, 谭璐, 聂紫萌, 等. 湖南典型金属冶炼与采选行业企业周边土壤重金属污染评价及源解析[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2667-2679.
Chen D D, Tan L, Nie Z M, et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in the soil around typical metal smelting and mining enterprises in Hunan Province [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(9): 2667-2679.
- [4] 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.
- [5] Jia J, Bai J H, Xiao R, et al. Fractionation, source, and ecological risk assessment of heavy metals in cropland soils across a 100-year reclamation chronosequence in an estuary, South China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 807, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151725.
- [6] Nag R, O'Rourke S M, Cummins E. A GIS study to rank Irish agricultural lands with background and anthropogenic concentrations of metal (loid)s in soil [J]. Chemosphere, 2022, 286, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131928.
- [7] Hossain Bhuiyan M A, Chandra Karmaker S, 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.
- [8] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, *et al.* Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [10] Li Z G, Feng X B, Li G H, *et al.* Mercury and other metal and metalloid soil contamination near a Pb/Zn smelter in east Hunan Province, China [J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**(2): 160-166.
- [11] 刘昭玥, 费杨, 师华定, 等. 基于 UNMIX 模型和莫兰指数的湖南省汝城县土壤重金属源解析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(10): 2446-2458.
- Liu Z Y, Fei Y, Shi H D, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Rucheng County of Hunan Province based on UNMIX model combined with Moran index [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(10): 2446-2458.
- [12] 段淑辉, 周志成, 刘勇军, 等. 湘中南农田土壤重金属污染特征及源解析[J]. 中国农业科技导报, 2018, **20**(6): 80-87.
- Duan S H, Zhou Z C, Liu Y J, *et al.* Distribution and source apportionment of soil heavy metals in central-south of Hunan Province [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, **20**(6): 80-87.
- [13] 余嘉衍, 李冰玉, 周一敏, 等. 湖南省某矿遗址周围农业土壤重金属污染及风险评价[J]. 环境化学, 2020, **39**(4): 1024-1030.
- Yu J Y, Li B Y, Zhou Y M, *et al.* Pollution and risk assessment of heavy metal in agricultural soil around an abandon mine site in Hunan Province [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(4): 1024-1030.
- [14] 肖冰, 薛培英, 韦亮, 等. 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al.* Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- [15] 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 等. 基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5192-5204.
- Zhang K K, He J, Zhong Y X, *et al.* Identification of soil heavy metal sources around a copper-silver mining area in Ningxia based on GIS [J]. Environmental Science, 2022, **43**(11): 5192-5204.
- [16] Liu H B, Qu M K, Chen J, *et al.* Heavy metal accumulation in the surrounding areas affected by mining in China: spatial distribution patterns, risk assessment, and influencing factors [J]. Science of the Total Environment, 2022, **825**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154004.
- [17] 张义, 周心劝, 曾晓敏, 等. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2062-2070.
- Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River economic belt [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2062-2070.
- [18] Ren S Y, Song C Q, Ye S J, *et al.* The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150322.
- [19] Fei X F, Lou Z H, Xiao R, *et al.* Source analysis and source-oriented risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soils of different cultivated land qualities [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **341**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130942.
- [20] 易菲霖, 吴湘炬, 卿艳彬, 等. 浏阳七宝山矿区地质环境问题与防治[J]. 中国资源综合利用, 2020, **38**(6): 172-175.
- Yi F T, Wu X J, Qing Y B, *et al.* The geological environment problems and prevention of Qibaoshan Mining area in Liuyang [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, **38**(6): 172-175.
- [21] 湖南省煤炭地质勘察院. 湖南省七宝山硫铁矿矿山地质环境综合防治方案[R]. 长沙: 湖南省煤炭地质勘察院, 2017.
- [22] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [23] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, **34**(2): 225-233.
- Wang F, Huang Y Z, Wang X L, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: comparison of different evaluation methods [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(2): 225-233.
- [24] 潘佑民. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- [25] Liu R, Wang M E, Chen W P, *et al.* Spatial pattern of heavy metals accumulation risk in urban soils of Beijing and its influencing factors [J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 174-181.
- [26] Xiao Q, Zong Y T, Lu S G. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **120**: 377-385.
- [27] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [28] 王辉, 焦振恒, 吴昊, 等. 铅锌矿周边土壤重金属污染评价方法概述[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2021, **33**(4): 300-306.
- Wang H, Jiao Z H, Wu H, *et al.* Review on evaluation methods of heavy metal pollution in soil around lead Zinc mine [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2021, **33**(4): 300-306.
- [29] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2322-2328.
- Liu Y N, Zhu S F, Wei X F, *et al.* Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2322-2328.
- [30] 刘文慧. 安徽某地农田土壤重金属生态风险评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020. 25-26.
- [31] 宁茂岐, 刘洪斌, 武伟. 两种取样尺度下土壤重金属空间变异特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(3): 86-91.
- Ning M Q, Liu H B, Wu W. Determination of the characteristics of soil heavy metal spatial variability with two soil sampling scales [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, **15**(3): 86-91.
- [32] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 909-916.
- Chen J L, Li R Y, Xie X J, *et al.* Distribution characteristics

- and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of Nanjing City[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 909-916.
- [33] 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. *环境化学*, 2015, **34**(12): 2248-2256.
- Chen X M, Zhu B H, Yang W, *et al.* Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun reservoir upstream, Beijing, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(12): 2248-2256.
- [34] Bai Y R, Wang Y K. Spatial variability of soil chemical properties in a jujube slope on the loess plateau of China[J]. *Soil Science*, 2011, **176**(10): 550-558.
- [35] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys[A]. In: Bouma J, Nielsen D R, US Department of Agriculture, *et al* (Eds.). *Soil Spatial Variability* [C]. Netherlands: Pudoc, Wageningen, 1985. 166-194.
- [36] 戴塔根, 刘星辉, 童潜明. 湖南浏阳七宝山矿区宝山河不同时期环境污染对比研究[J]. *矿冶工程*, 2005, **25**(6): 9-13.
- Dai T G, Liu X H, Tong Q M. Comparison of environmental pollution at different period of time in Qibaoshan mine area, Liuyang, Hunan [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2005, **25**(6): 9-13.
- [37] 任志建, 余爱华, 徐贝贝. 路域环境中土壤重金属污染的研究进展[J]. *应用化工*, 2022, **51**(3): 787-792.
- Ren Z J, Yu A H, Xu B B. Research progress in heavy metal pollution of roadside soil[J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, **51**(3): 787-792.
- [38] Li H M, Wang J H, Wang Q G, *et al.* Chemical fractionation of arsenic and heavy metals in fine particle matter and its implications for risk assessment; a case study in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 339-346.
- [39] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and arsenic in China: situation, sources and control policies[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 93-101.
- [40] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju Country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**: 163-178.
- [41] 成瑾, 袁旭音, 章海燕, 等. 云贵地区磷矿分布区农田土壤重金属污染特征及对农产品质量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(5): 636-643.
- Cheng J, Yuan X Y, Zhang H Y, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in soils of Yunnan-Guizhou phosphate ore areas and their effects on quality of agricultural products[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(5): 636-643.
- [42] 郝立波, 陆继龙, 马力. 浅覆盖区土壤化学成分与基岩化学成分的关系及其意义——以大兴安岭北部地区为例[J]. *中国地质*, 2005, **32**(3): 477-482.
- Hao L B, Lu J L, Ma L. Relation between the chemical compositions of residual soils and bedrocks in shallow overburden areas and its significance – a case study of the northern Da Hinggan Mountains[J]. *Geology in China*, 2005, **32**(3): 477-482.
- [43] 沈洪艳, 安冉, 师华定, 等. 湖南省某典型流域农用地土壤重金属污染及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(3): 715-724.
- Shen H Y, An R, Shi H D, *et al.* Heavy metal pollution and influencing factors of agricultural land in a typical watershed in Hunan Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(3): 715-724.
- [44] 任加国, 王越, 师华定, 等. 乐安河流域农用地表层土壤重金属污染评价及来源分析[J]. *环境化学*, 2021, **40**(9): 2658-2666.
- Ren J G, Wang Y, Shi H D, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution of surface soil in agricultural land of Le'an River basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(9): 2658-2666.
- [45] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4779-4790.
- Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils and crops in Luancheng, Shijiazhuang City[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4779-4790.
- [46] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 488-495.
- Zhang H Z, Luo Y M, Zhang H B, *et al.* Characterizing the plant uptake factor of As, Cd and Pb for rice and wheat cereal [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(2): 488-495.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)