

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险

王敏¹, 董佳琦¹, 白龙龙¹, 张勇², 蒋仲龙², 姜霓雯³, 吴家森^{1,3}, 张璐瑶³, 方嘉³, 傅伟军^{1,3*}

(1. 浙江农林大学浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 临安 311300; 2. 浙江省公益林和国有林场管理总站, 杭州 310020; 3. 亚热带森林培育国家重点实验室, 临安 311300)

摘要: 香榧 (*Torreya grandis* cv. *Merrillii*) 是我国特有的一类经济树种。目前关于香榧的研究大都关注于果实的品质以及高产措施等, 对香榧林地土壤重金属污染的研究鲜见报道。为探明其污染状况, 选择位于浙江省会稽山脉附近的香榧集中种植区 [诸暨、嵊州、柯桥和东阳四市(区)] 作为研究对象, 系统地采取了 121 个土壤样品 (0~20 cm), 对其中的 13 种重金属 (As、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb、Sb、Sn、V 和 Zn) 进行分析。同时结合主成分分析方法构建最小数据集, 筛选出能最大程度代表土壤重金属元素信息的 6 种元素 (As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn), 利用地统计学等空间分析方法研究筛选所得的 6 种重金属空间异质性并评价其潜在生态风险。结果表明, 研究区重金属平均 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 分别为 14.23、0.14、49.08、27.05、28.20 和 109.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。通过半方差理论模型拟合得出研究区土壤 Cr、Ni 和 Zn 具有强烈的空间自相关性, 而 Cd、Cu 和 As 空间自相关性处在中等水平。克里格插值揭示了研究区土壤重金属的空间分布格局, 东阳市 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 呈低值分布, 而诸暨市局部地区存在 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的高值分布, 其中诸暨市、柯桥区 and 嵊州市 Cd 积累较多, As 在研究区土壤中的局部积累最严重, 高值主要分布在诸暨市的西部和嵊州市东部地区。单因子污染指数和内梅罗污染指数结果显示, 研究区 6 种重金属均存在超标现象, 呈现出不同程度的累积特征。诸暨市重金属的分布受早期铜矿开采以及长期过度施肥影响, 其他地区重金属的积累情况主要是由香榧种植户不合理的施肥方式尤其是磷肥和有机肥的过度使用等集约经营措施造成。潜在生态风险评价结果表明, 研究区整体处于轻度危害程度, 其中以 Cd 的潜在风险最大。

关键词: 香榧; 土壤重金属; 主成分分析; 地统计学; 生态风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5949-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104238

Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main *Torreya grandis* Plantation Region in Zhejiang Province

WANG Min¹, DONG Jia-qi¹, BAI Long-long¹, ZHANG Yong², JIANG Zhong-long², JIANG Ni-wen³, WU Jia-sen^{1,3}, ZHANG Lu-yao³, FANG Jia³, FU Wei-jun^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, China; 2. Zhejiang Public Welfare Forest and State Forest Farm Management Station, Hangzhou 310020, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Lin'an 311300, China)

Abstract: *Torreya grandis* cv. *Merrillii* (*T. grandis*) is a unique economic tree species in China, which contains rich nutritional, medicinal, and economic values. Currently, studies on *T. grandis* mainly focus on fruit quality and high yield measures, and there are few reports on the heavy metal pollution of *T. grandis* woodland soil. In order to study the pollution of soil heavy metals, the *T. grandis* producing areas (Zhujia, Shengzhou, Keqiao, and Dongyang) in the Kuaiji Mountains in Zhejiang Province, where *T. grandis* planting is concentrated, were taken as research objects. A total of 121 soil samples (0-20 cm) were systematically taken, and 13 types of heavy metals (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, V, and Zn) were analyzed. At the same time, the minimum data set was constructed by combining the principal component analysis method, and six heavy metal elements (As, Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn) that could represent the soil heavy metal element information to the greatest extent were screened out. Spatial heterogeneity and potential ecological risk of these six heavy metals were studied using geostatistics and other spatial analysis methods. The results indicated that the average $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Ni})$, $\omega(\text{Cu})$, and $\omega(\text{Zn})$ in the study area were 14.23, 0.14, 49.08, 27.05, 28.20, and 109.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Additionally, the results by the semi-variance theory model fitting indicated that Cr, Ni, and Zn have strong spatial autocorrelation, whereas Cd, Cu, and As have moderate spatial autocorrelation. Kriging interpolation revealed the spatial distribution pattern of heavy metals in the soils of the study area. The $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cr})$, and $\omega(\text{Ni})$ in Dongyang City were low, whereas the $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cr})$, and $\omega(\text{Ni})$ were high in some areas of Zhujia City. The accumulation of Cd in Zhujia City, Keqiao District, and Shengzhou City was high, whereas the local accumulation of As in the soil of the study area was the most severe. The high values were mainly distributed in the areas west of Zhujia City and east of Shengzhou City, whereas the low values were mainly distributed in the areas east of Zhujia City and west of Keqiao District. The results of the single factor pollution index and Nemerow pollution index showed that the six heavy metals in the study area all exceeded the standard, showing different degrees of accumulation characteristics. The distribution of heavy metals in Zhujia City was affected by early copper mining and long-term blind and excessive fertilization. The accumulation of heavy metals in other areas was mainly caused by human activities such as unreasonable fertilization methods, especially the excessive use of phosphate and organic fertilizers by farmers. The evaluation results of potential ecological hazards showed that the study area was being subjected to a mild degree of harm, with Cd presenting the largest potential risk.

Key words: *Torreya grandis* cv. *Merrillii*; soil heavy metals; principal component analysis; geostatistics; ecological risk assessment

土壤作为重要的自然资源,是人类生存活动的基础。近年来,随着城市化和工业化的高速发展,以及农业管理措施的不当(化肥和农药的盲目施用),土壤重金属污染问题日益严重,容易对人类的安全

收稿日期: 2021-04-22; 修订日期: 2021-05-20

基金项目: 浙江省土壤污染生物修复重点实验室开放基金项目 (FSLAB2020002)

作者简介: 王敏(2000~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境资源信息技术及其应用, E-mail: 771848844@qq.com

* 通信作者, E-mail: fuweijun@zafu.edu.cn

健康造成威胁^[1]. 土壤重金属可通过食物链传递到人体,具有较高的毒害性^[2,3]. 另外,土壤重金属的分布受各种因素的影响,在不同的时空尺度上其分布存在差异性. 因此,探明土壤重金属的分布格局和污染程度,是采取有效措施对污染土壤进行治理的先决条件^[4,5]. 已有的研究发现采用恰当的空间分析手段可系统揭示土壤重金属的空间分布格局^[6-8]. 然而,目前的报道主要针对农用地土壤重金属的分布格局^[9,10],缺少经济林土壤重金属空间分布和集聚效应的研究.

香榧 (*Torreya grandis* cv. *Merrillii*) 是榧树 (*Torreya grandis* Fortune ex Lindley) 中的人工栽培品种,为我国特有的一类经济树种,成年香榧林每年每亩产值超过 1 万元,其栽培效益居经济林之首^[11]. 香榧营养价值极高,维生素、蛋白质和脂肪等的含量丰富,其果仁中磷和钙的含量远高于同类坚果. 另外药用功能众多,能够增强体质,提高人体免疫力,具有良好的保健效果,对心血管疾病的预防有很大的作用. 同时口味极佳,果实带有香味,是人们经常食用的一种坚果零食. 因此,现阶段香榧需求量大,种植产业发展迅速,为了获得更多的产量和更高的收益,肥料以及农药等的大量施用,加之不当的经营管理模式会使得香榧林下土壤质量退化严重,影响香榧产业的健康发展^[12,13]. 戴文圣等^[14]对 5 县(市)11 个乡(镇)的香榧主产村的研究中发现,5 县(市)都存在盲目施肥现象,导致土壤中氮磷钾比例失衡,土壤质量退化,香榧产量明显下降. 因此,本研究的主要目标包括: ①揭示浙江省典型香榧种植

区土壤重金属的空间分布格局; ②探明研究区域土壤中重金属的污染程度及来源; ③评价研究区域土壤中重金属的潜在生态风险.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省 ($118^{\circ}01' \sim 123^{\circ}10' E$; $27^{\circ}02' \sim 31^{\circ}11' N$) 中部(图 1),属于典型的亚热带季风气候,雨热同期,四季分明. 年平均气温为 $15 \sim 18^{\circ}C$,最低气温在 1 月,最高气温在 7 月,年平均日照时数为 $1\,710 \sim 2\,100\ h$. 年平均降水量在 $980 \sim 2\,000\ mm$ 之间,5 月和 6 月降水相对较为集中. 浙江省海拔变化范围为 $0 \sim 1\,900\ m$,呈由西南向东北递减的趋势^[15],而香榧一般的生长环境处于海拔 $200 \sim 800\ m$ 范围内^[16]. 本研究选取浙江省香榧种植较为集中的会稽山区,包括诸暨、嵊州、柯桥和东阳这 4 个典型香榧产区,全省香榧种植面积的 65% 集中在这些地区,其产量占全省的 80%^[17]. 香榧是当地主要的经济作物,也是农林户的最主要经济来源.

1.2 土壤样品采集和分析

在 2019 年 5 月,香榧林地施肥前,采用 GPS 导航和定位通过采样方案的优化,共采取了 121 个土壤样品(图 1). 在研究区内网格布点,每 $1\ km^2$ 内布设一个样点,每个土壤样品的重量约为 $1\ kg$,记录采样点的实地信息(农户经营管理模式、土质情况以及施肥用量等).

将土壤样品放置于实验室通风晾干,挑拣出石块、动物残体以及植物根系等非土物质,待完全风干

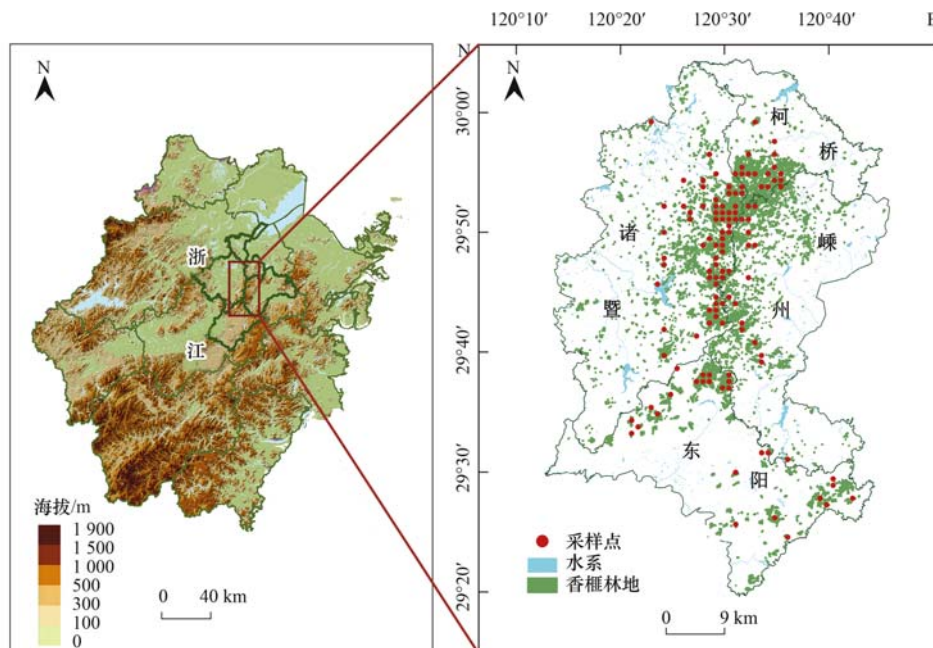


图 1 土壤样点空间分布示意

Fig. 1 Spatial location of soil samples

后,研磨过 2 mm 和 0.149 mm 的筛子.将已过筛样品分装于塑封袋中,标明序列号等信息保存备用.

在本研究中,土壤 pH 和土壤重金属全量的测定采用文献[18]中的方法.

1.3 最小数据集构建方法

利用主成分分析和 Norm 值筛选出最小数据集.筛选出的重金属元素需最大程度地代表全部土壤重金属元素的信息. Norm 值是指标在主成分的多维空间中矢量常模(Norm)长度,其值越大对主成分的综合载荷越大,对综合信息的解释力越强.计算公式如下^[19]:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_i^k (u_{ik}^2 \lambda_k)}$$
 (1)

式中, N_{ik} 为综合荷载值; u_{ik} 为第 i 个指标在第 k 个主成分上的荷载值; λ_k 为第 k 个主成分的特征值.

构建最小数据集主要依据主成分分析结果,将特征值 ≥ 1 ,荷载值 ≥ 0.5 的重金属元素归为一组.选取每组最大 Norm 值的元素及与之相差 10% 范围内的元素.最终保留下来的指标为能反映土壤重金属污染的最小数据集.

1.4 土壤重金属污染及潜在生态风险评价方法

采用单因子污染指数对单个土壤污染元素进行评价;基于单因子污染指数值,进行内梅罗综合污染指数评价,它能够对土壤重金属污染做综合性评价^[20].两者的计算公式及参数参见文献[20],土壤重金属污染评价标准如表 1 所示.

表 1 土壤重金属污染评价标准

单因子污染指数法		内梅罗综合污染指数法	
$P_i \leq 1.0$	无污染	$P_N \leq 0.7$	清洁
$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻微污染	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线
$2.0 < P_i \leq 3.0$	轻度污染	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
$3.0 < P_i \leq 5.0$	中度污染	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
$5.0 < P_i$	高度污染	$3.0 < P_N$	高度污染

潜在生态风险指数法能较好地反映土壤重金属的潜在风险,具体计算公式及参数见文献[21,22].同时,任华丽等^[23]于 2008 年划分了潜在生态危害程度的分级标准,马建华等^[24]对 Hakanson 的生态风险评价在实际应用中的一些问题进行了系统研究,提出了关于评价标准的合理设定方法,根据其方法本研究区土壤重金属潜在生态风险评价标准如表 2.

1.5 数据分析及处理

地统计学及克里格插值法被广泛用于研究区域变量的有效空间分析手段^[25~28].本研究中,对数据的正态性采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 进行检验,

数据转换采用对数转换.利用 Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件对数据进行描述性统计、正态性检验、主成分分析;基于 GS+9.0 软件构建半方差模型;采用 R 3.3.3 软件进行潜在生态风险评价箱图的制作;空间分布图采用 ArcGIS 10.2 进行绘制.

表 2 潜在生态风险评价标准

Table 2 Hakanson's classification criteria for potential ecological hazards

E_i	RI	生态危害程度
$E_i \leq 30$	$RI \leq 60$	轻微生态危害
$30 < E_i \leq 60$	$60 < RI \leq 120$	中等生态危害
$60 < E_i \leq 120$	$120 < RI \leq 240$	强生态危害
$120 < E_i \leq 240$	$240 < RI \leq 480$	很强生态危害
$240 < E_i$	$480 < RI$	极强生态危害

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属统计分析

各重金属浓度的变动范围较大, $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Fe})$ 和 $\omega(\text{Mn})$ 的取值范围分别为 1.34 ~ 114.30、15.30 ~ 227.30、5.20 ~ 174.70、23 836.10 ~ 140 897.20 和 94.90 ~ 1 751.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其余重金属最小值与最大值之间的差异明显(表 3).与标准差相比,变异系数是无量纲的值,其更能比较不同变量之间的变异度大小.按照 Fu 等^[6]的研究对变异系数的评判标准,研究区重金属 As、Cu 和 Ni 都属于高度变异,其余重金属属于中等变异,说明研究区重金属分布存在较大差异.变异系数越大,则表示变量受人为活动影响的可能性越大^[29,30],研究区 Ni、As 和 Cu 的分布极可能受人为活动因素的影响.对 13 种重金属元素进行 K-S 正态性检验,结果发现 9 种重金属不服从正态分布($P < 0.05$),只有 Mn、Pb、Sb 和 Zn 这 4 种元素服从正态分布,通过对数转换之后,数据都能够较好地服从正态($P > 0.05$).

2.2 主成分分析和最小数据集的构建

土壤重金属往来源于自然因素和人为因素,并主要受人为活动的影响^[31,32].对浙江省土壤重金属的研究表明,人为因素是重金属污染的主要来源,其中农业和工业资源对重金属污染的贡献率最大,为 43.45%.为深入研究土壤重金属的来源途径,对研究区样点数据进行主成分分析(表 4).KMO 和 Bartlett 球形检验结果显示,KMO 度量值为 0.736、近似卡方为 $P < 0.01$,研究数据适应于主成分分析,具有统计学意义[KMO 检验($P > 0.5$)和 Bartlett 球度检验($P < 0.01$)].根据主成分分析结果,特征值大于 1 的有 5 个主成分,分别是 PC1、PC2、PC3、PC4 和 PC5,累积贡献率为 76.024%,可见 5 个主成

分能够解释大部分的土壤重金属信息.

如表4所示,重金属 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、V 和 Zn 为第1组; 重金属 As 和 Sb 为第2组; Cd 和 Pb 为第3组; 载荷值均<0.5 且 Norm 值较低的 Sn 元素直接去除. 第1组中最大 Norm 值为 Zn 元素, Co、Fe、Mn 和 V 的 Norm 值与之相差不在 10%

内故去除,保留 Cr、Cu、Ni 和 Zn. 第2组中最大 Norm 值为 As 元素, Sb 的 Norm 值与之相差不在 10% 内故去除,仅保留 As. 第3组中最大 Norm 值为 Cd 元素, Pb 的 Norm 值与之相差不在 10% 内故去除,仅保留 Cd. 最终确定本研究中土壤重金属污染的最小数据集为: As、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn.

表3 土壤重金属统计特征值¹⁾

Table 3 Statistical characteristic values of heavy metals in soil

元素	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差 /mg·kg ⁻¹	范围 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%	偏度	峰度	P(K-S)
As	14.23	14.02	1.34~114.30	98.49	4.741(-0.020)	28.205(2.182)	0.000(0.468)
Cd	0.14	0.07	0.05~0.42	50.61	1.476(0.137)	3.022(-0.318)	0.014(0.708)
Co	19.83	5.51	9.02~41.70	27.78	1.373(0.484)	2.481(0.665)	0.024(0.395)
Cr	49.08	35.16	15.30~227.30	71.65	2.613(0.555)	8.380(0.505)	0.000(0.36)
Cu	28.20	27.47	5.20~174.70	97.40	2.551(0.507)	8.241(-0.334)	0.000(0.585)
Fe	45 023.20	19 203.65	23 836.10~140 897.20	42.65	2.453(1.094)	7.854(1.479)	0.001(0.152)
Mn	801.66	367.20	94.90~1751.50	45.80	0.458	-0.320	0.384
Ni	27.05	28.48	1.49~214.10	105.29	4.540(-0.396)	24.167(3.697)	0.000(0.072)
Pb	40.11	12.49	15.50~99.40	31.14	1.150	3.859	0.204
Sb	4.21	0.68	2.95~7.99	16.21	2.247	9.128	0.084
Sn	3.51	1.32	1.35~8.57	37.54	1.210(0.374)	1.433(-0.220)	0.012(0.330)
V	20.28	10.69	5.16~51.80	52.72	1.277(0.172)	1.084(-0.177)	0.002(0.446)
Zn	109.93	32.81	51.10~227.10	29.84	0.878	0.975	0.321

1) 括号内为进行对数转换后的偏度、峰度和 K-S 检验的显著性水平

表4 主成分分析特征值¹⁾

Table 4 Principal component analysis values

项目	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	分组	Norm 值
As	0.367	0.766	-0.163	0.168	0.148	2	1.418
Cd	0.385	0.029	0.549	0.212	0.279	3	1.635
Co	0.632	-0.165	-0.236	-0.149	0.103	1	1.782
Cr	0.808	0.209	-0.116	0.159	-0.417	1	1.991
Cu	0.819	-0.085	-0.108	0.087	0.213	1	1.959
Fe	0.729	-0.085	0.439	0.099	-0.125	1	1.824
Mn	0.532	-0.246	0.316	-0.438	0.340	1	1.486
Ni	0.803	-0.010	-0.045	0.212	-0.387	1	1.953
Pb	-0.295	0.216	0.689	0.071	-0.340	3	1.217
Sb	-0.063	0.736	-0.295	0.032	0.307	2	1.155
Sn	0.056	0.292	0.485	0.317	0.363	/	0.908
V	0.725	-0.162	-0.238	-0.068	0.117	1	1.761
Zn	0.909	-0.052	-0.119	0.124	-0.051	1	2.160
特征值	5.587	1.976	1.639	1.177	1.024		
累积贡献率/%	37.248	50.423	61.353	69.196	76.024		

1) 黑体字表示分组中各元素所对应的主成分载荷值,均>0.5

2.3 土壤重金属空间变异结构

对6种重金属进行半方差模型拟合,选取最优模型(表5). 结果表明,研究区土壤重金属 Cd、Cu 和 Ni 适用于指数模型, Cr、As 符合球状模型,而 Zn 则与高斯模型更为贴合.

结构性因素和随机性因素是影响土壤特性空间变异的决定性因素^[33]. 研究区土壤中 Cr、Ni、Zn 的块基比均小于 25%, 6 种重金属中以 Ni 的块基比最小,为 9.63%. 表明这 3 种重金属尤其 Ni 具有强烈

的空间自相关特征,其变化主要受结构性因素的影响(母岩). 其他 3 种重金属 As、Cd 和 Cu 的块基比分别为 44.36%、45.71% 和 31.41%,均落在 25%~75% 区间,表明存在中等程度空间自相关,可能受到结构性和随机性因素的共同影响. 研究区 6 种重金属的变程都相对较小,最大的为 Zn 的变程 28.8 km, As、Cr、Cd、Cu 和 Ni 的变程分别为 15.42、12.64、11.24、9.65 和 6.45 km,说明受到人为活动的影响,空间相关性已被大大削弱. 只有 Zn 受人为

活动影响相对较小,主要受母质、地貌等结构性因素影响,空间自相关较为强烈. 在中国东南部与香榧同为经济林的山核桃种植区的研究中^[34],其结果表明 Cd、Cu、Pb、Ni 和 Cr 主要受结构因素的影响,Cd、Cu、Ni 和 Cr 含量范围较小,且易受人类活动影响,这与本研究结果相类似.

表 5 土壤重金属含量的空间半方差模型及其主要参数

Table 5 Theoretical semi-variogram models and parameters for soil heavy metals						
项目	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	变程 /km	块基比 [$C_0 / (C_0 + C)$] / %	R^2
As	球状模型	147.00	331.40	15.42	44.36	0.721
Cd	指数模型	0.16	0.35	11.24	45.71	0.725
Cr	球状模型	38.00	243.00	12.64	15.64	0.644
Cu	指数模型	382.00	1216.00	9.65	31.41	0.842
Ni	指数模型	85.00	883.00	6.45	9.63	0.832
Zn	高斯模型	43.00	325.00	28.8	13.23	0.846

2.4 土壤重金属的空间分布格局

利用普通克里格法对上述拟合得到的半方差变异函数模型及其相关参数进行空间插值(图 2). 土壤重金属空间分布格局存在明显的差异,As 在研究区土壤中的局部积累最严重,高值分布在诸暨市

城西和嵊州市城东,低值主要分布在诸暨市东部和柯桥区西部,在研究区的分布主要呈现为由两侧向中间逐级递减的趋势. $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 在整个研究区含量普遍偏低,但诸暨市局部地区存在 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的高值分布. 其中 $\omega(\text{Cd})$

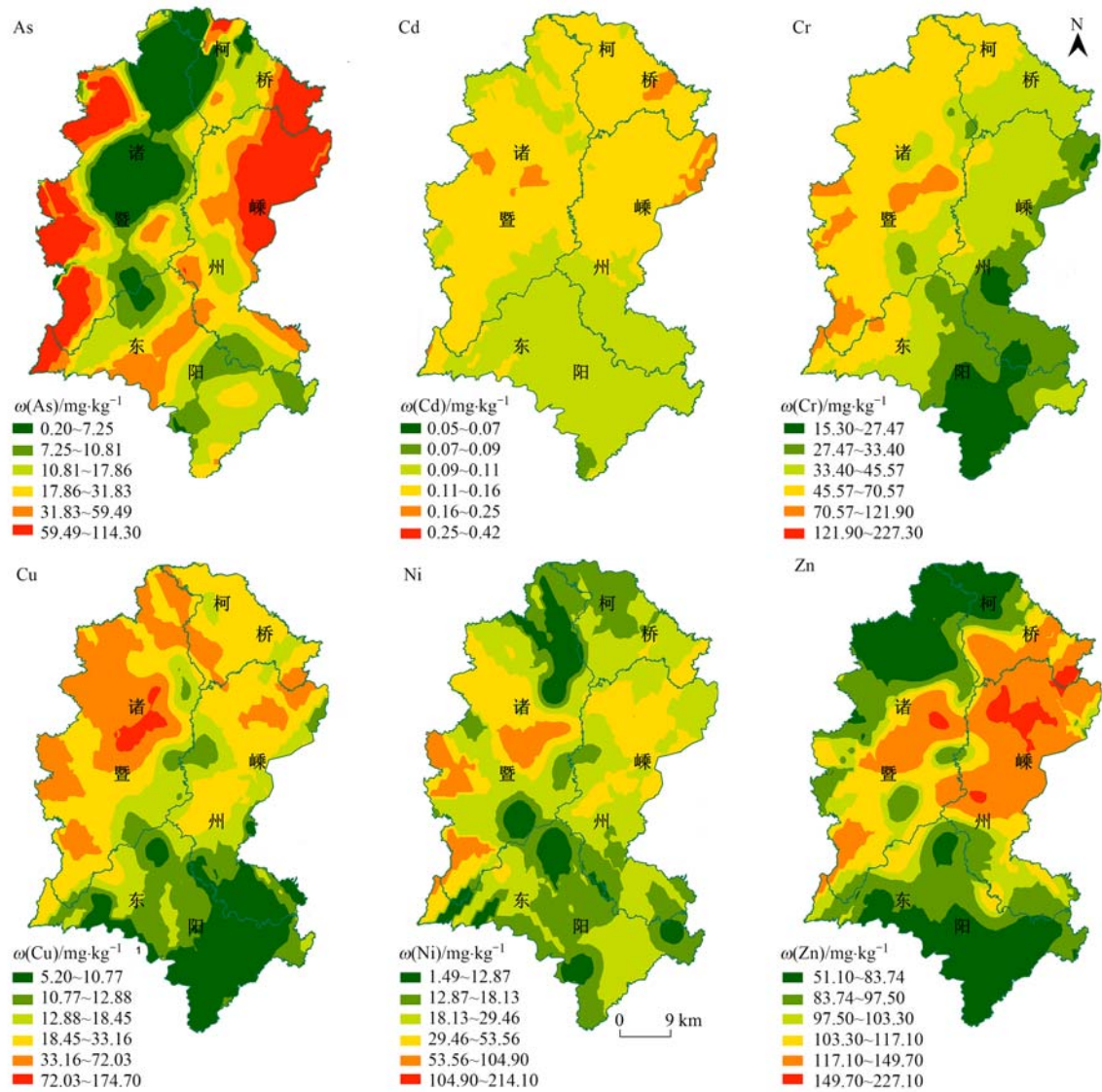


图 2 土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution maps of the heavy metal concentrations in soil

除了在诸暨市、柯桥区和嵊州市的局部地区呈现明显的高值分布外,其余地方均较小. 东阳市研究区土壤重金属呈现低值分布状态,表示受到的污染较小,只有局部地区存在 $\omega(\text{As})$ 的高值分布. $\omega(\text{Cu})$ 的高值区主要分布在诸暨市和柯桥区,低值区主要分布在东阳市,呈现由西北方向向东南递减的变化趋势. $\omega(\text{Zn})$ 高值区主要分布在嵊州市,同时与嵊州市接壤的诸暨市和柯桥区等地也有局部的高值分布,其低值分布主要在研究区南部的东阳和北部的柯桥、嵊州的部分地区,整体呈现由南北两侧逐渐向中间增加的趋势. 总体而言,东阳市 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 普遍较低. 研究区Cu、Zn和As污染相对较多,尤其是As积累最多,污染较为严重,应当引起一定的重视.

2.5 土壤重金属的污染评价

研究区土壤pH的取值范围为3.58~6.81,平

均值为4.91,是典型的酸性土壤. 因此,采用浙江省土壤背景值^[35]和土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)中的农用地土壤污染风险筛选值^[36]作为污染判断阈值(表6). 对由主成分筛选出的6种重金属进行污染评价. 以浙江省背景值为评价标准时,研究区土壤Cd和Zn的单因子污染指数平均值均大于1,Cu的平均值接近1. 6种重金属均存在超标现象,超标率为: Cd>Zn>Cu>As>Ni>Cr,其中Cd和Zn的超标率达到了49.50%和44.63%,表明研究区土壤重金属已具有不同程度的累积特征. 当以农用地土壤污染风险筛选值为评价标准时,6种金属平均值均小于1,属于无污染水平,但均有部分样品超过风险筛选值,以Cu的超标点位最多,超标率达到13.33%,表明研究区已有局部土壤受到重金属的污染,尤其Cu污染严重.

表6 研究区土壤重金属单因子污染指数评价
Table 6 Single factor pollution index for heavy metals in soils

元素	以浙江土壤背景值为标准				以农用地土壤污染风险筛选值为标准			
	平均值	最小值	最大值	超标率/%	平均值	最小值	最大值	超标率/%
As	0.83	0.08	6.68	22.31	0.36	0.03	2.86	2.50
Cd	1.08	0.38	3.23	49.50	0.47	0.17	1.4	1.67
Cr	0.51	0.16	2.37	8.26	0.33	0.10	1.52	4.17
Cu	0.92	0.17	5.72	31.40	0.56	0.10	3.49	13.33
Ni	0.74	0.04	5.87	14.05	0.45	0.02	3.57	5.00
Zn	1.02	0.47	2.11	44.63	0.55	0.26	1.14	1.65

当以浙江省背景值为评价标准时,内梅罗综合评价结果表明54%的土壤样品存在不同程度的重金属污染($P_N>1$),其中,轻度污染占比43%,中度污染占比6%,并且还存在5%的样品达到了重污染水平,只有不足一半(46%)的土壤样品处于清洁和警戒线水

平(表7). 当以农用地土壤污染风险筛选值为评价标准时,78%的样品都处于清洁水平,但仍有6%的轻度污染和7%的中度污染. 可见研究区局部区域重金属污染严重,存在一定的风险,与张红桔等^[22]对山核桃产区土壤重金属污染研究的结果相类似.

表7 研究区土壤重金属污染评价结果/%
Table 7 Calculated results of heavy metals pollution in soils/%

标准	清洁 ($P_N<0.7$)	警戒线 ($0.7<P_N<1$)	轻度污染 ($1<P_N<2$)	中度污染 ($2<P_N<3$)	重污染 ($P_N>3$)
浙江背景值 ¹⁾	11	35	43	6	5
农用地土壤污染风险筛选值 ²⁾	78	9	6	7	0

1) 中国土壤元素背景值中的浙江土壤背景值(1990)^[35]; 2) 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)中的农用地土壤污染风险筛选值^[36]

经过实地调查发现,研究区诸暨湮浦曾存在一铜矿区,自宋朝就开始采矿炼铜,开采历史悠久,直到1998年才因种种原因闭矿停厂^[37]. 铜矿给土壤带来多种重金属污染,陶美霞等^[38]在对上饶市某铜矿废弃地进行土壤重金属的研究发现,Cu和Cd均远超农用地土壤污染风险筛选值,Zn、Pb和Cr含量都超过当地土壤背景值,Cr和Cd对当地居民存在一定的健康风险. 程睿^[39]在对铜矿弃渣场下游农田的研究中同样发现了严重的重金属污染,Cu、

Pb、Cd、As和Sb都具有明显的累积特征. 研究区诸暨市局部地区的As、Cu和Zn元素都存在高值分布,Cd、Cr和Ni在当地也存在不同程度的累积特征,多年的采矿经历以及部分工业活动已经导致诸暨市土壤遭受一定的重金属污染.

除此之外,当地种植户不合理地施肥以及用地管理模式等的差异同样对研究区土壤造成了相当严重的危害. Shi等^[40]的研究指出,浙江省不同地区施肥产生的重金属差异较大,单位面积过度施肥带来

了 Zn 和 Cr 等元素的污染. 同样, Baltas 等^[41]的研究也指出, 农业土壤中重金属的主要来源是过度施肥和滥用农药和劣质化肥等. 嵊州大部分地区的 Zn 和 As 重金属污染严重, 主要是因为肥料尤其磷肥的过度使用所致. 研究发现磷肥中往往含有较多的 As 和 Zn, 磷肥的不合理施用会造成 As 和 Zn 在土壤中的积累^[42]. 研究区 As 污染最为严重, 高值分布区域广, 多与农业活动和施用农家肥有关. 磷素肥料和复合肥料的 As 含量较高, 不合理的使用造成土壤 As 元素含量的超标^[42]. 另外, 部分肥料中也会有 Cr 元素的存在^[43], 含 Cr 肥料的使用会加剧土壤污染的程度. Cd 一般为施用农药和化肥等农业活动的标志性元素^[44], 柯桥、诸暨和嵊州局部的 Cd 高值分布主要与农药和化肥的常年使用有关. 有研究表明饲料添加剂中广泛使用 Cu 和 Zn 元素^[45], 过度地使用有机肥也会导致 Cu 和 Zn 在土壤中的积累, 诸暨和嵊州土壤已明显受 Cu 和 Zn 的污染. Hani 等^[46]的研究同样发现土壤中 Cu 和 Zn 的积累主要受人类活动如施肥的影响. 在其他经济林如竹林^[47]和山核桃林^[48]土壤重金属的研究中, 化肥、有机肥及复合肥的过量施用同样是造成当地林下土壤重金属污染的重要来源.

2.6 土壤重金属潜在生态风险评价

6 种重金属以 Cd 的平均潜在生态风险系数 E_i 最大, 为 32.49 (表 8), 属于中等生态危害程度. 其余重金属的平均潜在生态风险系数 E_i 均 < 30 , 说明都属于轻微生态危害程度. 其中 Cd 有 60% 的土壤样品都属于轻微危害程度, 处于中等生态危害程度的占全部样品的 33%, 存在 7% 的样品 E_i 值在 60 ~ 120 之间, 属于强生态危害水平, 表明研究区 Cd 的潜在危害最强. Cr、Cu、Zn 和 Ni 这 4 种重金属在所有的样品中都处于轻微危害程度. As 有 2% 的样品处于中等危害程度, 有 1% 的样品处于强危害程度, 其余样品都属于轻微危害, 也具有一定的潜在危害性, 应当引起重视. 从图 3 可以更加直观地看出, Cd 的潜在生态危害程度最大, As 次之, 虽然大部分样品 E_i 值都处于 30 以下, 属于轻微危害, 但 Cd 仍有部分样品 E_i 值超过 60, 达到了强危害程度. 这与多项研究结果相似^[5, 22, 49], 可能与 Cd 的毒性系数较大有关^[22]. 6 种重金属的平均潜在生态风险强度大小为: $Cd > As > Cu > Ni > Cr = Zn$. 研究区的平均 RI 值为 6 种重金属各平均 E_i 值的和, 即为 51.02, 说明研究区土壤整体上处于轻微生态危害程度.

表 8 潜在生态风险系数评价
Table 8 Evaluation results of potential ecological risk index

元素	E_i			不同危害程度样点比例/%				
	平均值	最大值	最小值	轻微	中等	强	很强	极强
Cd	32.49	96.92	11.54	60	33	7	0	0
Cr	1.02	4.74	0.32	100	0	0	0	0
Cu	4.58	28.60	0.85	100	0	0	0	0
Zn	1.02	2.11	0.47	100	0	0	0	0
Ni	3.70	29.34	0.20	100	0	0	0	0
As	8.21	66.84	0.12	97	2	1	0	0

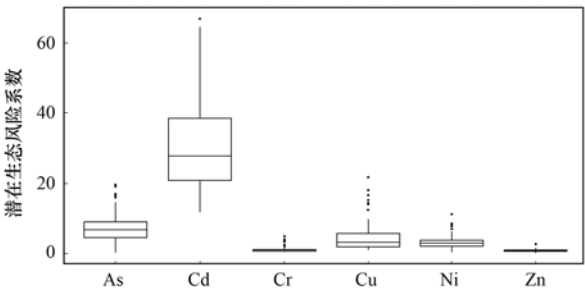


图 3 土壤重金属潜在生态风险箱图

Fig. 3 Potential ecological risks of heavy metals in soil

3 结论

香榧主产区土壤重金属变异程度较高, 局部地区受到较为严重的污染, 其中以 As、Cu 和 Zn 污染较为突出. 在研究区, 土壤重金属具有明显的空间分布特征, 其空间自相关性受人为活动的影响较大. 6

种重金属均在不同程度上超过了浙江省背景值及农用地土壤污染风险筛选值, 呈现出不同程度的累积特征, 而诸暨市废弃铜矿直接影响了局部土壤中重金属的积累, 同时研究区农户长期过量的使用化肥和有机肥等也是重金属在香榧林地污染较为严重的一个因素. 潜在生态风险评价中以 Cd 的潜在风险最大, 研究区整体处于轻微生态危害程度. 本研究可为后续的香榧产地科学管理及指导安全生产提供重要的科学依据.

参考文献:

[1] Adimalla N, Chen J, Qian H. Spatial characteristics of heavy metal contamination and potential human health risk assessment of urban soils: a case study from an urban region of South India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 194, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110406.
[2] 陈世宝, 王萌, 李彬彬, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.

- Chen S B, Wang M, Li S S, *et al.* Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 35-41.
- [3] Ali H, Khan E. Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs—Concepts and implications for wildlife and human health [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(6): 1353-1376.
- [4] Liu H W, Zhang Y, Yang J S, *et al.* Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **767**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144879.
- [5] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- He B, Zhao H, Wang T Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- [6] Fu W J, Zhao K L, Zhang C S, *et al.* Using Moran's I and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus-application plots [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, **174**(5): 785-798.
- [7] Benhaddya M L, Hadjel M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(3): 1473-1486.
- [8] 师小平, 陈银萍, 李玉强, 等. 北方农牧交错典型区土壤重金属空间分布及污染风险评价[J]. *生态科学*, 2020, **39**(6): 7-15.
- Shi X P, Chen Y P, Li Y Q, *et al.* Spatial distribution and pollution risk assessment of heavy metals in soil of Zalute Banner [J]. *Ecological Science*, 2020, **39**(6): 7-15.
- [9] 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 等. 典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2875-2883.
- Zheng J Z, Wang C D, Wang S H, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in Lin'an City and its potential risk evaluation [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2875-2883.
- [10] Zhou Y J, Jia Z Y, Wang J X, *et al.* Heavy metal distribution, relationship and prediction in a wheat-rice rotation system [J]. *Geoderma*, 2019, **354**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113886.
- [11] 郭雨昕. 浙江嵊州古香榧林的生态服务功能及其经济价值评估[J]. *当代经济*, 2019, (2): 101-105.
- [12] 杨曾平, 张杨珠, 曾希柏, 等. 不合理施肥引起高产稻田土壤退化研究[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2007, **33**(2): 225-231.
- Yang Z P, Zhang Y Z, Zeng X B, *et al.* Degradation process of paddy soils with high yield caused by irrational fertilization [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2007, **33**(2): 225-231.
- [13] 高小朋, 贺晓龙, 任桂梅, 等. 化肥不合理施用带来的危害探析[J]. *农技服务*, 2011, **28**(9): 1289-1290, 1366.
- Gao X P, He X L, Ren G M, *et al.* The harm of fertilizer for unreasonable application [J]. *Agricultural Technology Service*, 2011, **28**(9): 1289-1290, 1366.
- [14] 戴文圣, 黎章矩, 程晓建, 等. 香榧林地土壤养分状况的调查分析[J]. *浙江林学院学报*, 2006, **23**(2): 140-144.
- [15] Dai W, Fu W J, Jiang P K, *et al.* Spatial pattern of carbon stocks in forest ecosystems of a typical subtropical region of southeastern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, **409**: 288-297.
- [16] 李麟杰. 不同立地与经营措施对香榧林地土壤肥力的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
- Li L J. The influence of different site conditions and different management measures on soil fertility in woodland of *Torreya grandis* cv. *Merrillii* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.
- [17] 徐翠霞. 浙江省香榧产业发展及其对策研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- Xu C X. Study on *Torreya grandis* 'Merrillii' production development and its suggestions in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 135.
- [19] 张世文, 叶回春, 胡友彪, 等. 多时空尺度的土壤质量评价最小数据集的建立 [J]. *安徽农业科学*, 2013, **41**(17): 7487-7492.
- Zhang S W, Ye H C, Hu Y B, *et al.* Establishment of minimum data set for soil quality assessment with multiple spatial and temporal scales [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(17): 7487-7492.
- [20] Gao Z Q, Fu W J, Zhang M J, *et al.* Potentially hazardous metals contamination in soil-rice system and its spatial variation in Shengzhou City, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, **167**: 62-69.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [22] 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 等. 典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2893-2903.
- Zhang H J, Zhao K L, Ye Z Q, *et al.* Spatial variation of heavy metals in soils and its ecological risk evaluation in a typical *Carya cathayensis* production area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2893-2903.
- [23] 任华丽, 崔保山, 白红军, 等. 哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(4): 1625-1634.
- Ren H L, Cui B S, Bai H J, *et al.* Distribution of heavy metal in paddy soil of Hani Terrace core zone and assessment on its potential ecological risk [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(4): 1625-1634.
- [24] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题 [J]. *地理研究*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [25] 高智群, 张美剑, 赵科理, 等. 土壤-水稻系统重金属空间异质性研究-以浙江省嵊州市为例 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 215-224.
- Gao Z Q, Zhang M J, Zhao K L, *et al.* Heavy metal contamination in soil-rice system and its spatial variation in Shengzhou City [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 215-224.
- [26] 陶吉兴, 傅伟军, 姜培坤, 等. 基于 Moran's I 和地统计学的浙江森林土壤有机碳空间分布研究 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, **38**(5): 97-101.
- Tao J X, Fu W J, Jiang P K, *et al.* Using Moran's I and geostatistics to analyze the spatial distribution of organic carbon in forest soil of Zhejiang province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2014, **38**(5): 97-101.

- [27] Wu W Y, Yin S Y, Liu H L, *et al.* The geostatistic-based spatial distribution variations of soil salts under long-term wastewater irrigation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6747-6756.
- [28] Chen S, Lin B W, Li Y Q, *et al.* Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China [J]. *Geoderma*, 2020, **357**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113937.
- [29] 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 等. 工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- Li Y L, Lu Y F, Chen W P, *et al.* Spatial-temporal variation and source change of heavy metals in the cropland soil in the industrial city[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- [30] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- Zhang L K, Li H P, Huang X M, *et al.* Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- [31] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- Yu Y H, Lü J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2865-2874.
- [32] 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.
- [33] Fu W J, Jiang P K, Zhou G M, *et al.* Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China [J]. *Biogeosciences*, 2014, **11**(8): 2401-2409.
- [34] Zhao K L, Zhang L Y, Dong J Q, *et al.* Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of southeastern China [J]. *Geoderma*, 2020, **360**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114011.
- [35] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [36] 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].
- [37] 毛小军. 诸暨湮浦铜矿区重金属空间变异性研究——地统计学方法[D]. 杭州: 浙江师范大学, 2007.
- Mao X J. A study of the heavy metal's spatial variation of Zhuji Lipu copper mining area—methods of geostatistics [D]. Hangzhou: Zhejiang Normal University, 2007.
- [38] 陶美霞, 胡虎, 胡兰文, 等. 上饶市某铜矿废弃地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(6): 1153-1159.
- Tao M X, Hu H, Hu L W, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals in polluted abandon soil of Shangrao, Jiangxi[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(6): 1153-1159.
- [39] 程睿. 铜矿弃渣场下游农田土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 2020, **10**(2): 280-287.
- Cheng R. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in farmland soil downstream of a copper mine slag dumps[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, **10**(2): 280-287.
- [40] Shi T R, Ma J, Wu F Y, *et al.* Mass balance-based inventory of heavy metals inputs to and outputs from agricultural soils in Zhejiang Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1269-1280.
- [41] Baltas H, Sirin M, Gökbayrak E, *et al.* A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey [J]. *Chemosphere*, 2020, **241**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125015.
- [42] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3496-3502.
- Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, *et al.* Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3496-3502.
- [43] 张继舟, 吕品, 于志民, 等. 三江平原农田土壤重金属含量的空间变异与来源分析[J]. *华北农学报*, 2014, **29**(S1): 353-359.
- Zhang J Z, Lv P, Yu Z M, *et al.* Spatial variability and source analysis of heavy metal content of agricultural soil in Sanjiang plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, **29**(S1): 353-359.
- [44] 张爱国, 魏兴萍. 西南典型岩溶槽谷土壤重金属污染与来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(12): 166-176.
- Zhang A G, Wei X P. Pollution and source analysis of heavy metals in soils of typical karst troughs in southwestern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(12): 166-176.
- [45] 罗启清, 王少鹏, 王英辉, 等. 南宁市市郊农业土壤中重金属元素含量的多元统计分析[J]. *安全与环境工程*, 2018, **25**(2): 81-87, 106.
- Luo Q Q, Wang S P, Wang Y H, *et al.* Multivariate statistical analysis of heavy metal concentration in suburb agricultural soils of Nanning City [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, **25**(2): 81-87, 106.
- [46] Hani A, Pazira E. Heavy metals assessment and identification of their sources in agricultural soils of Southern Tehran, Iran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **176**(1-4): 677-691.
- [47] 张建云, 王志荣, 钟哲科, 等. 竹林重金属污染源及防治对策[J]. *科技通报*, 2018, **34**(12): 1-6.
- Zhang J Y, Wang Z R, Zhong Z K, *et al.* Pollution sources and control countermeasures of heavy metal in bamboo forest [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2018, **34**(12): 1-6.
- [48] 丁立忠, 尚素微, 柴振林. 浙江省山核桃中重金属含量及质量安全评价[J]. *江西农业学报*, 2011, **23**(8): 151-152.
- Ding L Z, Shang S W, Chai Z L. Heavy metal content and quality safety assessment of hickory nut in Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, **23**(8): 151-152.
- [49] 刘奕, 胡立嵩, 张彩香, 等. 广州市污染土壤重金属的空间分布及其风险评价[J]. *武汉工程大学学报*, 2018, **40**(2): 127-131.
- Liu Y, Hu L S, Zhang C X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in contaminated soil in Guangzhou [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2018, **40**(2): 127-131.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)