

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, 郇建建, 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, 王书婷, 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)	

铜仁土壤-水稻重金属积累效应与安全种植区划

朱亮亮¹, 吴勇¹, 周浪¹, 唐乐斌¹, 宋波^{1,2*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004)

摘要: 铜仁市有色金属矿业活动频繁, 为了解贵州省铜仁地区土壤-水稻重金属积累与迁移转化状况, 开展水稻安全种植区划, 共采集水田土壤和相应稻米样品 230 组, 并测试重金属和土壤理化性质等。通过单因子指数法对稻米样品进行评价, 并结合土壤环境质量和食品污染物限量提出安全种植区划方法。结果表明: ①水田土壤 pH 在 4.4 ~ 7.9 之间, $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 平均值分别为 12.94、0.343、30.53、3.869、30.32 和 110.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 As、Cd、Hg 和 Zn 与环境质量农用地土壤污染风险管控标准中的筛选值相比, 超标 11.7%、10.9%、53.0% 和 3.04%。②稻米中 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的表征值为 0.056、0.017、1.445、0.010、0.215 和 17.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 与国家食品安全标准(GB 2762-2017)相比, 稻米样品中 As、Cd 和 Hg 含量超标达 15.7%、3.04% 和 19.1%。其 As 超标点位主要集中分布于松桃县, Hg 主要分布于碧江和万山区。③稻米富集系数大小顺序为: $\text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{As} = \text{Ni}$, 稻米对于 Zn 的吸收富集能力最强。④研究区大部分区域均属于优先保护类, 安全利用类集中分布在铜仁东部, 严格管控类零星分布于碧江区、万山区和江口县等地。结果表明, 铜仁市部分地区土壤存在重金属污染, 同时水稻的安全种植也存在一定风险。

关键词: 铜仁; 重金属; 积累效应; 安全种植; 区划

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5988-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104291

Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren

ZHU Liang-liang¹, WU Yong¹, ZHOU Lang¹, TANG Le-bin¹, SONG Bo^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety Guarantee in Karst Area, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to understand the accumulation, migration, and transformation of heavy metals in soil and rice in Tongren, Guizhou Province, a total of 230 groups of paddy soil and corresponding rice samples were collected, and the physical and chemical properties of heavy metals and soil were tested. The rice samples were evaluated using the single-factor index method, and the safe planting zoning method was proposed in combination with soil environmental quality and food contaminant limits. The results showed that: ① the average values of $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Hg})$, $\omega(\text{Ni})$, and $\omega(\text{Zn})$ in paddy soil were 12.94, 0.343, 30.53, 3.869, 30.32, and 110.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, when the pH was between 4.4 and 7.9. Among them, As, Cd, Hg, and Zn exceeded the standards of 11.7%, 10.9%, 53.0%, and 3.04% compared with the screening values in "Soil Pollution Risk Control Standards for Agricultural Land of Environmental Quality". ② The characterization values of $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Hg})$, $\omega(\text{Ni})$, and $\omega(\text{Zn})$ in rice were 0.056, 0.017, 1.445, 0.010, 0.215, and 17.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; compared with the national food safety standard (GB 2762-2017), the contents of As, Cd, and Hg in rice samples exceeded the standard by 15.7%, 3.04%, and 19.1%. As exceeded the standard point mainly distributed in Songtao County, and Hg was mainly distributed in Bijiang and Wanshan District. ③ The order of enrichment coefficient of rice was $\text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{As} = \text{Ni}$, and the absorption and enrichment ability of rice for Zn was the strongest. ④ Most areas in the study area belong to the priority protection category. The safe utilization category is concentrated in the east of Tongren, whereas the strictly controlled category is scattered within Bijiang District, Wanshan District, and Jiangkou County. The study showed that there was heavy metal pollution in the soil in some areas of Tongren City, and the safe planting of rice also had certain risks.

Key words: Tongren; heavy metal; accumulation effect; safe planting; regionalization

改革开放以来我国的经济发展水平飞速提高, 污染治理能力相对滞后, 从而导致全国的环境污染状况愈发严重^[1]。其中, 矿业的开采导致废水排放污染农业水源, 空气含重金属悬浮物质的沉降造成的重金属对农用地耕地的污染尤为突出^[2-4]。有研究表明, 重金属的污染是不可逆转的, 土壤中的重金属会被农产品富集从而进入到食物链, 通过土壤-作物-人体系统不断在人体内积累, 长期摄入将会对人体的皮肤、骨骼、神经系统和内脏器官造成不同程度的危害^[5-7]。王敬华等^[8]的研究发现当人体内 Cd、Hg、As 和 Zn 等重金属含量积累到一定程度时, 会

引起骨痛病、肾炎和贫血等各类疾病, 严重时甚至会引发食道癌和鼻咽癌等一系列癌症及慢性中毒。

水稻作为南方地区的主要粮食作物, 其质量安全对人体健康十分重要。水稻不仅是贵州省第一大粮食作物, 同时也是铜仁地区的主食之一。铜仁地区属于矿业影响与农业种植重叠区。铜仁市东部万山汞矿区开采已久, 对周边环境的影响较大, 同时铜仁市

收稿日期: 2021-04-26; 修订日期: 2021-05-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600)

作者简介: 朱亮亮(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: 275624361@qq.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

河谷分布密集,存在矿业区域上下游重金属迁移现象.夏吉成等^[9]的研究发现,铜仁市东部万山汞矿周边水、气和土壤中重金属汞含量均高于国家标准,而当地居民通过食物摄入重金属对健康造成最大威胁的是稻米^[10,11].重金属通过矿产冶炼过程释放并通过河流水力和大气沉降迁移对当地居民产生影响,导致铜仁市东部的松桃县和万山区出现饮用水重金属超标^[12,13].位于铜仁中部的自然保护区梵净山也由于周边汞矿区冶炼过程中大气沉降作用导致水、气和苔藓中 Hg 含量增加^[14].因为铜仁地区对于非矿业影响区域的土壤重金属含量调查,以及居民通过食用稻米造成的潜在健康风险评估鲜见报道,故选取铜仁地区作为研究对象,分析全市土壤和稻米中重金属含量,了解多金属矿带影响下水稻种植区稻田土壤与水稻间的关系,并通过安全种植区划保证人体健康安全,以期为今后相关研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

铜仁地区位于黔北高原向湘西丘陵和四川盆地过渡的斜坡地带,位于东经 107°45′~109°30′、北纬 27°07′~29°05′之间,属于中亚热带季风湿润气候区,主要岩成土为碳酸盐类岩石发育的石灰土;铜仁地区成土母质多为页岩、石灰岩和板岩发育的丘陵山地,其中水稻田是主要耕作土壤,共有约 2 005 km².自明清时,铜仁地区因丰富的汞资源而著名,被称为“中国汞都”,而由于长期随意地开采给该地区遗留下了潜在的环境污染源.铜仁市汞矿主要分布于万山区、碧桃县和碧江县.锰矿主要分布在松桃县和碧江县,探明储量位居全国第三.

1.2 样品采集与分析测试

2018 年 8~9 月,采集了铜仁市农田土壤 258 个,自然土壤 64 个,与农田土壤对应的稻米样品 230 个(图 1).前期通过矿业分布和稻田分布情况确定矿业影响区和粮食主产区,在具体采样阶段首先确定采样主体位置,并根据耕地面积、集中连片程度,适当修整采集样品的采集密度.

稻田土壤和水稻样品采集主要以水田和旱地等大面积作物分布区域为导向,同时兼顾选取有色金属矿和涉及重工业活动影响的地区.为确保样品的代表性,采用五点采样法,每点取耕作层(0~20 cm)土壤 1 kg,混合均匀后用四分法从中选取 1 kg 土壤作为该点样品.土壤样品采集后放在避阴处风干,去除植物根系及石块后用玛瑙研钵研磨后过

0.149 mm 尼龙筛,装于信封袋后待测.稻米脱壳用去离子水洗净后于烘箱内 55℃ 烘干,磨粉后放于聚乙烯瓶内备用.

分析测试的重金属包括 Cd、Cu、Ni 和 Zn,样品采用美国环保署推荐的 HNO₃-H₂O₂ 方法消解.测试 Cd、Cu 和 Ni 所用仪器为 PerkinElmer 公司生产的 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS).测定 Zn 所用仪器为 PerkinElmer 公司生产的 Optima 8000 型电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES).As 与 Hg 采用(1+1)王水浴消解法并使用原子荧光分光光度计(AFS,北京吉天仪器有限公司)分析.土壤 pH 用土水比 1:2.5 提取,用玻璃电极法测定.分析过程所用试剂均为优级纯标准,实验用水为超纯水.

土壤标准物质:GBW 07404(GSS-4);大米粉成分分析标准物质:GBW 10045(GSB-23);灌木枝叶成分标准物质:GBW(GSV-1).样品重复样中目标化合物含量相对标准偏差(RSD)均小于 10%,分析样品重复率为 10%~15%,标准物质中 As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Zn 的回收率为 88%~106%.

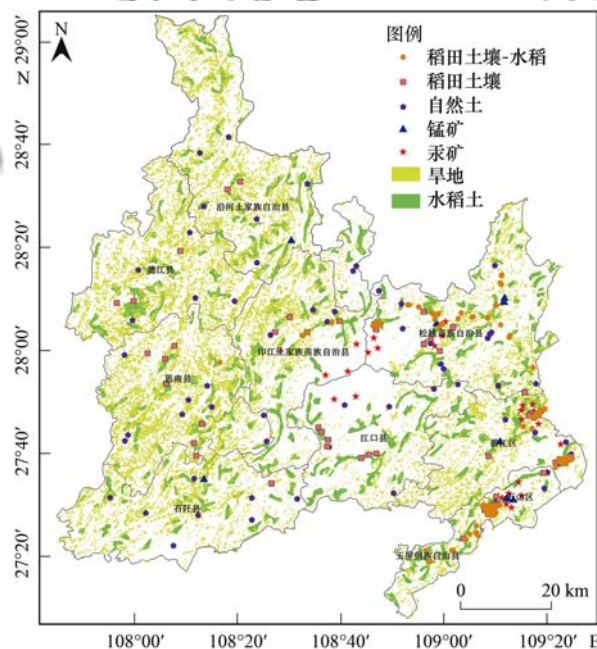


图 1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Study area and distribution of sampling points

1.3 稻米富集系数

稻米富集系数(BCF)是稻米中重金属含量与土壤中重金属含量的比值,用于评估水稻富集重金属的能力.

$$BCF = C_{\text{hm}}/C_s \quad (1)$$

式中,BCF 为富集系数, C_{hm} 为大米中重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_s 为土壤中重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.4 稻米样品重金属污染评价方法

单因子污染指数法对样品中的单一污染物的污染程度进行评价,计算公式如下:

$$P_i = C_i/C_n^i \tag{2}$$

式中, P_i 为样品重金属 i 的污染指数; C_i 为该样品重金属 i 的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_n^i 为该样品重金属限量标准值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 稻米中重金属 As、Cd 和 Hg 选用国家食品安全标准(GB 2762-2017); 重金属 Cu 和 Zn 选用《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜和锌等八种元素限量》(NY 861-2004).

若 $P_i < 1$ 为清洁, $1 \leq P_i < 2$ 为轻度污染, $2 \leq P_i < 3$ 为中度污染, $P_i \geq 3$ 为重度污染.

1.5 数据处理

图形制作采用 ArcGIS 10.2 绘制,利用 SPSS 23.0 对原始数据进行相关统计分析.

2 结果与分析

2.1 自然土壤重金属含量特征

对研究区自然土壤原始数据进行 Grubbs 检验,异常值剔除并筛选出有效样点. 研究区自然土壤

$\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{Hg})$ 呈对数正态分布并用几何平均值来表征,分别为 16.43、0.148 和 0.144 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 呈正态分布用平均值表征,分别为 29.60、37.73 和 103.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 1). 自然土壤各重金属含量的变异系数均小于 86.4%,属于中等变异程度. 经统计,本研究区的自然土壤重金属含量与贵州省土壤背景值^[15]相比,As、Cu、Hg、Ni 和 Zn 含量大于贵州省土壤背景值,是由研究区所在黔东成土母岩主体为黑色炭质页岩所致,该处分布的蚀变型金矿、锰矿、汞矿以及钼镍钒多金属矿所伴生的 As、Hg 和 Ni 含量较高,可能伴随自然土壤重金属含量偏大^[16],Zn 多与成土母岩有关,泥岩和页岩中 $\omega(\text{Zn})$ 可达到 80 ~ 120 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[17],可能是矿业开采过程中改变了地表并影响了地下水文循环^[18],通过大气沉降以及降雨等作用降落于远离人群影响的区域,并从表层土壤迁移到中层土壤;Cd 含量小于贵州省土壤背景值,主要与成土母质相关. 经单样本 T 检验,研究区自然土壤 As、Hg、Zn 和 Ni 与贵州省土壤背景值呈显著性差异($P < 0.05$);Cd 和 Cu 与贵州省土壤背景值的差异性不显著($P > 0.05$).

表 1 研究区自然土壤重金属含量统计分析

Table 1 Statistical characteristics of heavy metals in natural soils of the study area							
重金属	样本量	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 $\pm$ 标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	背景值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%
As	63	2.719 ~ 73.42	22.69 $\pm$ 17.06	21.12	16.43	16.0	75.2
Cd	60	0.046 ~ 0.532	0.184 $\pm$ 0.125	0.136	0.148	0.209	67.9
Cu	63	3.970 ~ 65.05	29.60 $\pm$ 15.57	27.75	25.31	26.90	52.6
Hg	63	0.030 ~ 0.683	0.191 $\pm$ 0.165	0.145	0.144	0.085	86.4
Ni	64	6.478 ~ 80.38	37.73 $\pm$ 16.25	37.26	34.04	32.9	43.1
Zn	64	38.73 ~ 191.4	103.6 $\pm$ 34.20	97.79	97.92	86.9	33.0

2.2 稻田土壤重金属含量

研究区稻田土壤重金属分析结果如表 2,铜仁市稻田土壤 pH 值的平均值为 6.67 ± 0.77 ,其变化范围介于 4.40 ~ 7.90 间,是典型的弱酸性土壤.

从变异系数(CV)来看,稻田土壤中 Hg 变异系数达到强变异水平(> 100),说明研究区稻田土壤 Hg 受人为干扰最大. 研究区内铅锌矿是在加里东晚

期低温热液过程中进行成矿,经冶炼开发后极易随着水系迁移、大气沉降和矿区回填等方式将重金属带入稻田土壤中. 稻田土壤中重金属 As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Zn 含量与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相比,其中 As、Cd、Hg 和 Zn 均高于筛选值,超标率分别为 11.7%、10.9%、

表 2 研究区稻田土壤重金属含量¹⁾

Table 2 Contents of heavy metals in the paddy soil of the study area							
重金属	样本量	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 $\pm$ 标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	超标率 /%	变异系数 /%
As	230	0.043 ~ 74.15	12.94 $\pm$ 10.48	10.84	8.296	11.7	81.0
Cd	230	0.132 ~ 0.981	0.343 $\pm$ 0.122	0.321	0.323	10.9	35.6
Cu	230	13.60 ~ 70.20	30.53 $\pm$ 8.93	28.68	29.39	—	29.2
Hg	230	0.055 ~ 55.40	3.869 $\pm$ 8.102	0.870	0.986	53.0	209
Ni	230	12.50 ~ 53.19	30.32 $\pm$ 6.143	30.26	29.69	—	20.3
Zn	230	57.91 ~ 723.5	110.0 $\pm$ 62.60	100.4	102.8	3.04	56.9

1) “—”表示无数据

53.0%和3.04%。与农用地土壤污染风险管控值相比,只有 Hg 存在部分高于管控值,超标率为 19.1%,说明稻田土壤中的 Hg 元素仍是需要重点关注的对象。

2.3 稻米中重金属含量及污染评价

对研究区域采集稻米进行重金属含量测定,统计分析结果见表 3,对研究区水稻中重金属进行单样本 *T* 检验,数据不是正态分布,存在显著性差异。Ni 和 Hg 经对数转换后呈正态分布,用几何均值表征。对 As、Cd、Cu 和 Zn 对数转换后仍不符合正态分布,用中位数表示稻米重金属含量。稻米中 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 为 0.056、0.017、1.445、0.010、0.215 和 17.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,本次所测稻米中 As 含量为全量,GB 2762-2017 中对于稻米中无机砷的限量为 0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,查阅文献得知稻米中无机砷约占总砷的 82.65%^[19,20],故将稻米中限量标准转化为 0.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为稻米 As 的限量标准。稻米样品中存在 As、Cd 和 Hg 含量超过国家食品安全标准(GB 2762-2017)规定限量的占总样品分别为 15.7%、3.04%和 19.1%,说明对当地居民食用稻米存在潜在威胁的为 As、Cd 和 Hg 元素超标的稻米,稻米质量应当引起重视。

稻米 As、Cd 和 Hg 超标点位分布如图 2 所示。从中可知,稻米 As 超标主要分布在松桃苗族自治县。其中稻米超标样品所对应的土壤 pH 均值为 6.67 ± 0.73 ,其变化范围介于 5.20~7.90; $\omega(\text{有机质})$ 为 3.859%,处于丰富等级;土壤 $\omega(\text{As})$ 均值为 $(12.78\pm10.01)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。基本理化性质与稻米未超标的土壤相比,并未具有明显的差别。因此,造成该地区稻米超标的主要原因可能是由于水稻品种间的不同,导致其对于土壤 As 的吸收、富集能力有极大差别。李仁英等^[21]的研究发现,同一生长条件下

泰瑞丰 5 号籽粒中的 As 含量比镇稻 16 号籽粒中的 As 含量高 2 倍。且不同的灌溉方式也会对稻米 As 的含量产生一定影响,采用适当的灌溉方式,可以降低水稻对于 As 的吸收和积累^[22]。稻米 Cd 超标主要在松桃县的乌罗镇。该地区土壤 pH 均值为 6.70 ± 0.83 , $\omega(\text{有机质})$ 为 5.09%, $\omega(\text{Cd})$ 为 $(0.219\pm0.037)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与稻米 Cd 未超标的土壤样品相比, Cd 含量相差不大,而 pH 和有机质含量却明显高于稻米未超标的土壤。导致该地区稻米超标的原因可能与乌罗镇土壤的 pH 和有机质含量偏高相关。有相关研究表明^[23,24],土壤 pH 及有机质含量越高,稻米中重金属的含量越低。这也与陈同斌等^[25]的研究在广西高镉异常区隆安县情况相同。稻米 Hg 超标主要集中分布于万山区、碧江区和玉屏县这 3 个区域,其中稻米 Hg 超标 19.1%,土壤超过筛选值和管制值分别为 53.0%和 19.1%。稻米 Hg 超标样品对应的土壤 pH 介于 6.00~7.71, $\omega(\text{有机质})$ 为 3.24%, $\omega(\text{Hg})$ 为 $(5.322\pm8.380)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 Hg 含量总体明显高于其他水稻 Hg 未超标的土壤样品。这是由于当地坐落着许多大小不一的汞矿,而前期汞矿区无节制地开采和随意堆放对周边土壤造成汞污染,同时经过大气沉降及雨水的冲刷也会对相关区域土壤、植物和河流产生极大的汞污染。

稻米重金属各元素变异系数范围为 36%~173%,大小顺序为: $\text{Cd} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Zn}$ 。

稻米中重金属富集系数关系到稻米的生产和食用安全。稻米对各元素的富集系数如表 3 所示,研究区稻米对 Zn 的富集能力最强,达到 0.171;其次是 Cd 和 Cu,分别为 0.052 和 0.049;对 As 和 Ni 的富集最弱,为 0.007。土壤中的 Cd 元素易于在稻米中富集,且水稻生长过程中 Zn 和 Cu 作为必需的营养元素也具有一定的富集,这与前人研究的结果相一致^[26]。

表 3 研究区水稻重金属含量¹⁾
Table 3 Heavy metal content of rice in the study area

重金属	样本量	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值±标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	污染物限量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	超标率 /%	富集系数
As	230	0.0002~1.089	0.152±0.212	0.056	0.006	0.24	15.7	0.007
Cd	230	0.002~0.433	0.034±0.059	0.017	0.019	0.20	3.04	0.052
Cu	230	0.199~3.983	1.533±0.805	1.445	1.308	—	—	0.049
Hg	230	0.0003~0.325	0.016±0.026	0.108	0.010	0.02	19.1	0.010
Ni	230	0.032~1.804	0.297±0.272	0.221	0.215	1.0	2.61	0.007
Zn	230	2.561~27.73	15.86±5.70	17.59	14.42	—	—	0.171

1) “—”表示无数据

由于水稻是贵州省栽植的第一大农作物,稻田土壤及稻米中的重金属含量一直都是被密切关注的对象^[27]。因此,对稻米污染进行评价是十分必要的。

本文基于食品安全国家标准 食品污染物限量标准(GB 2762-2017)和粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜和锌等 8 种元素限量标

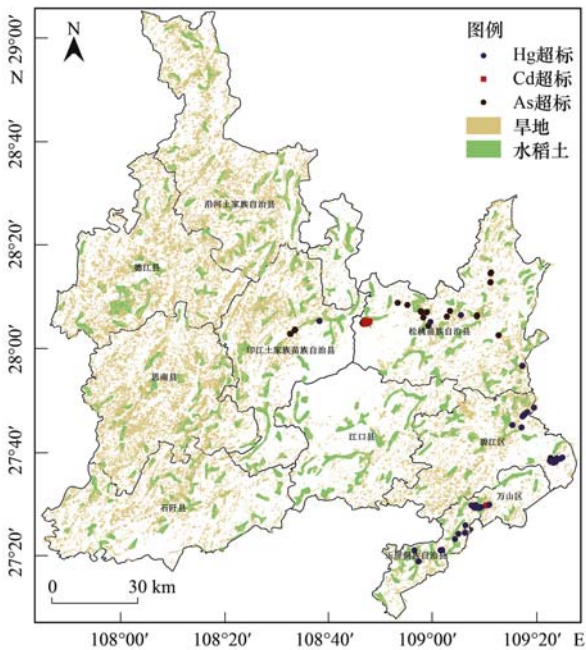


图 2 稻米重金属超标点位分布
Fig. 2 Distribution map of rice heavy metals exceeding the standard point

准(NY 861-2004),采用单因子污染指数法对稻米污染程度进行较为准确地评价(表4),结果显示:稻米中的As、Cd、Cu、Hg、Ni和Zn的 P_i 均值分别为0.233、0.084、0.153、0.515、0.297和0.317.其中,稻米中Hg的 P_i 值最大达到16.26,样品受到Hg污染的个数达45个;稻米中As和Cd的最大 P_i 值为4.535和2.165,稻米样品受到As和Cd污染的个数分别为36个和7个;所有稻米样品均未受到重金属Cu和Zn污染,处于清洁水平.由于目前食品中镍污染水平报道相对较少,国家标准中对限量值的规定也不完善,故暂且不进行研究和分析.总体上,铜仁地区的稻米风险主要是以重金属As、Cd和Hg污染引起的.

表 4 稻米重金属污染情况

重金属	P_i			污染数量/个
	最大值	最小值	均值	
As	4.535	0.000 8	0.233	36
Cd	2.165	0.008	0.084	7
Cu	0.398	0.020	0.153	—
Hg	16.26	0.015	0.515	45
Ni	1.804	0.032	0.297	6
Zn	0.555	0.051	0.317	—

1) “—”表示无数据

2.4 土壤-水稻安全种植区划

基于土壤-水稻重金属的安全种植区划主要衡量指标为土壤超过水田重金属风险筛选值和管控值以及食品中污染物限量,将研究区划分为优先保护、

安全利用和严格管控这3类.进行土壤-水稻重金属安全区划时,通过判别各采样点土壤和水稻重金属超土壤风险筛选及管控值和食品中污染物限量风险为基础,先部分后整体,通过分析各重金属控制下的水稻安全种植赋值和综合污染风险,通过GIS中克里格插值,然后选择去趋势,获得插值后作出安全种植区划.由于稻田土壤中重金属As、Cd和Hg含量超过风险筛选值较多且稻米超标率较高,综合各因素考虑选取As、Cd和Hg这3个元素进行安全种植区划初筛.

安全种植区划分过程中单独元素As、Cd和Hg元素安全区划分析赋值规则为:土壤中作物重金属含量与食品中污染物限量标准进行比较,当单因子污染指数 $P_i \leq 1$ 、 $1 < P_i \leq 2$ 和 $P_i > 2$ 时分别赋值为0、1和2;土壤中重金属超稻田土壤风险筛选值(RSD)和风险管控值(RIV)时分别赋值为1和2,其中土壤重金属未超过稻田土壤风险筛选值赋值为0.通过叠加各点赋值,即将土壤赋值与作物赋值相加,其中定义赋值0~1、2和3~5依次为安全种植区划的优先保护类、安全利用类和严格管控类,3种元素综合评判则为按照以上对元素安全种植样点区划的重分类,重分类依据为样点中三元素出现一个或以上严格管控类则划分为严格管控类,若点位对应元素均为优先保护类则划分该点位综合安全种植区划点位为优先保护类,以上两条条件之外的情况均划分为安全利用类.优先保护类主要包含土壤重金属含量不超稻田土壤风险筛选值和土壤重金属含量超过风险筛选值但不超管控值且作物不超标;安全利用类主要包括土壤重金属含量超过风险筛选值但不超管制值且作物轻微超标和土壤重金属含量超过风险管制值且作物不超标;严格管控类主要是土壤超过风险筛选值且作物超标和土壤超过风险筛选值但不超管制值且作物严重超标.

基于土壤超过水田重金属风险筛选值和管控值、食品中污染物限量进行数据分析.由图3(a)可知,针对研究区域土壤-水稻As的安全种植区划初筛,发现全市并未出现严格管控类,个别地区存在安全利用类,其主要分布在松桃苗族自治县的中部和北部地区,其余大部分县区均属于优先保护类.整体看来,铜仁市水稻安全种植区遍布全市,出现极个别安全利用类可能与当地的锰矿有一定关联,锰矿矿渣在堆积过程中有可能将重金属释放到周边生态环境中.由此可知,As元素对于铜仁市土壤-水稻系统存在的影响较小,整体处于人为可控范围内.

对于铜仁市土壤-水稻中种金属Cd安全种植区划,如图3(b),整个市整体上均处于优先保护区.几

种植提供了一定的理论依据.由上述数据显示,稻米对于不同重金属的吸收富集能力有极大的差别.从对重金属的富集来看,稻米对于 Zn、Cd 和 Cu 元素的富集能力较强,As 和 Ni 的吸收、富集程度最低,说明 Zn、Cd 和 Cu 元素迁移能力较强,容易被水稻吸收,反之,As 和 Ni 的迁移能力较差,不易被水稻吸收.这与已有研究的结果相一致^[28~30].

分析土壤和农作物的各重金属含量,比较土壤重金属超土壤风险筛选值、风险管控值和稻米重金属含量超食品中污染物限量标准,进行安全区划初筛,得到综合安全种植区划初筛.图 3 中分为 3 个安全种植区,分别是优先保护区、安全利用区和严格管控区.严格管控类在全市所占面积最小,零星分布于铜仁市的江口县、玉屏县、松桃县和碧江区等 4 个地区.其出现的原因主要与这 4 个区域存在着大量的汞矿、铅锌矿区及锰矿有关.有关研究表明^[31],研究区域位于全国最大的汞矿带上,成为汞、石油的最佳集聚部位.大量复合种矿区的叠加出现导致土壤背景值偏高,加上频繁的工业活动对环境造成了不可逆转地破坏和污染.宋春然等^[32]的研究也表明了贵州地区受到了 As、Cd 和 Hg 多类重金属的污染.由于多种污染物的共同作用,水稻种植的安全也受到严重威胁.安全利用区大面积分布于铜仁市的东部地区,包括松桃县、江口县、碧江区、万山区和玉屏县等区域.东部地区处于安全利用区主要是由于地质高背景和人类过分地矿业活动造成的稻田土壤重金属超标,虽超标率高,但大多数是以轻微超标和轻度超标为主^[33].且由于研究区地处于喀斯特碳酸溶岩,土壤 pH 呈现出弱酸性,生物有效性较低,植物对于土壤中重金属的吸收富集能力较差,往往出现土壤超标而作物不超标的现象^[34].综合各项原因,研究区域土壤重金属及稻米中部分元素含量偏高,一是,由于该区域处于矿带,地质背景高于其他区域;二是,金属矿的开采、冶炼和尾渣堆放对周边土壤造成极大重金属的污染.

优先保护区作为种植区内土壤环境质量最佳地区,应该防止外源重金属的输入,同时加大划定区域内土壤环境质量定期监控,也可以进行生态健康友好型种植体系建设和升级,产出无公害农产品.针对安全利用区域主要采用农艺调控措施来减少土壤受重金属污染的风险,使土壤中重金属活性变弱,从而让重金属从土壤转移至作物可食用部分速率变慢.调控措施主要本着因地制宜的原则,选取适合本区域的种植作物进行栽种.对于受 As 污染的地区,可以通过添加 S 肥(石膏和单质硫)的方式减轻重金属对水稻的毒害作用,阻碍 As 从根系进入水稻机体

从而减少稻米中 As 的含量^[35];也可以通过种植低积累 As 的水稻品种,例如丰优 9 号等^[36],减少人体食用稻米途径摄入重金属健康风险.同理,对于受 Cd 污染地区,可以通过提高土壤 pH 至 6.5 以上、增加有机肥等方式减轻污染风险^[37],也可以通过种植低 Cd 积累梗稻、五丰优 2168 品种和水旱轮作等方法降低稻米中 Cd 的积累^[38,39].稻田土壤受到 Hg 污染安全利用区可以通过种植两系杂交籼稻等低积累 Hg 水稻品种,降低稻种 Hg 的积累^[40].严格管控区若面积较大可以通过植物修复的方法进行土壤修复. As 污染土壤可以种植富集能力强、地上部生物量大的蜈蚣草^[41]; Cd 污染地块可以种植藿香蓟、籽粒苋和青苜蓿来增加土壤重金属移除的速率^[42~44]; Hg 污染严重区域可以利用栽种悬钩子和野蒿等耐受富集 Hg 植物修复污染土壤^[45].对于两种及以上重金属污染地区和种植前景好的地区可以采用联合修复措施,具体包括物理、化学和生物修复,如通过添加生物炭和种植红麻等耐性植物进行多金属地区污染土壤治理^[46].

4 结论

(1) 稻田土壤中重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 含量分别为 (12.94 ± 10.48) 、 (0.343 ± 0.122) 、 (30.53 ± 8.93) 、 (3.869 ± 8.102) 、 (30.32 ± 6.143) 和 $(110.0 \pm 62.60) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(2) 水稻对重金属的积累效应实验表明,稻米对于重金属的吸收富集特性从大到小为: Zn、Cd、Cu、As、Hg 和 As = Ni; 总体来看,稻米样品中 As、Cd 和 Hg 含量超标率达 15.7%、3.04% 和 19.1%,存在一定的安全食用风险.

(3) 结合研究区域土壤-水稻重金属含量,提出安全种植区划方法,得到土壤-水稻综合重金属(As、Cd 和 Hg)安全种植区划.区划结合土壤和稻米中重金属含量将铜仁市农田划为优先保护区、安全利用区和严格管控区.安全利用区主要分布于松桃县、江口县、碧江区、万山区和玉屏县.然而,严格管控区零星分布于江口县、玉屏县、松桃县和碧江区,万山区部分地区也存在严格管控区域.

参考文献:

- [1] 韩静,肖伟,陈芳,等.不同蔬菜对重金属汞、铬、砷、镉、铅积累效应的研究[J].中国农学通报,2012,28(21):264-268.
Han J, Xiao W, Chen F, et al. Accumulation of heavy metals Hg, Cr, As, Cd, and Pb in vegetable[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(21): 264-268.
- [2] Zhuang P, Zou B, Li N Y, et al. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong,

- China: implication for human health [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31**(6): 707-715.
- [3] Yusuf A A, Arowolo T A, Bamgbose O. Cadmium, copper and nickel levels in vegetables from industrial and residential areas of Lagos City, Nigeria[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2003, **41**(3): 375-378.
- [4] 蒋宗宏, 陆凤, 马先杰, 等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, **37**(2): 293-300.
- Jiang Z H, Lu F, Ma X J, *et al.* Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren county, Guizhou province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(2): 293-300.
- [5] 程炯, 吴志峰, 刘平, 等. 珠江三角洲地区农业环境问题与生态农业建设[J]. *农业现代化研究*, 2004, **25**(2): 116-120.
- Cheng J, Wu Z F, Liu p, *et al.* Issues on Farming environment and Eco-agriculture building in the Pearl River Delta region[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2004, **25**(2): 116-120.
- [6] Huang S H, Peng B, Yang Z H, *et al.* Spatial distribution of chromium in soils contaminated by chromium-containing slag[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, **19**(3): 756-764.
- [7] Li J, Xie Z M, Xu J M, *et al.* Risk assessment for safety of soils and vegetables around a lead/zinc mine [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, **28**(1-2): 37-44.
- [8] 王敬华, 赵伦山, 吴悦斌. 山西山阴、应县一带砷中毒区砷的环境地球化学研究[J]. *现代地质*, 1998, (2): 94-99.
- Wang J H, Zhao L S, Wu Y B. Environmental geochemical study on arsenic in arseniasis areas in Shanyin and Yingxian, Shanxi province[J]. *Geoscience*, 1998, (2): 94-99.
- [9] 夏吉成, 胡平, 王建旭, 等. 贵州省铜仁汞矿区汞污染特征研究[J]. *生态毒理学报*, 2016, **11**(1): 231-238.
- Xia J C, Hu P, Wang J X, *et al.* Mercury pollution characteristics in Tongren mercury mining area, Guizhou province, China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(1): 231-238.
- [10] 湛天丽, 黄阳, 何腾兵, 等. 贵州铜仁汞矿区主要农产品重金属污染及其健康风险评估[J]. *安全与环境学报*, 2017, **17**(4): 1524-1529.
- Zhan T L, Huang Y, He T B, *et al.* Heavy metal pollution and health risk in major agricultural products in Tongren mercury mine area, Guizhou [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, **17**(4): 1524-1529.
- [11] 李平, 冯新斌, 仇广乐. 贵州汞矿区居民食用大米的甲基汞暴露及健康风险评估[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 914-921.
- Li P, Feng X B, Qiu G L. Methylmercury exposure through rice consumption and its health risk assessment for the residents in Guizhou mercury mining areas[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 914-921.
- [12] 张思强, 徐承香, 杨惠瑛, 等. 铜仁矿区农村地下饮用水重金属含量与健康风险评估[J]. *中国农村水利水电*, 2019, (3): 41-49.
- Zhang S Q, Xu C X, Yang H Y, *et al.* Heavy metal content and health risk assessment of underground drinking water in rural areas of Tongren mining area [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (3): 41-49.
- [13] Li P, Feng X B, Shang L H, *et al.* Mercury pollution from artisanal mercury mining in Tongren, Guizhou, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(8): 2055-2064.
- [14] Xiao Z F, Sommar J, Lindqvist O, *et al.* Atmospheric mercury deposition on Fanjing Mountain Nature Reserve, Guizhou, China [J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(10): 2191-2200.
- [15] 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.
- [16] 吴小红, 肖成刚, 程鹏林, 等. 贵州省岩金矿床的分布特征与控制因素[J]. *矿物学报*, 2018, **38**(6): 637-646.
- Wu X H, Xiao C G, Cheng P L, *et al.* Distribution features and ore-controlling factors of rock gold deposits in Guizhou province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2018, **38**(6): 637-646.
- [17] Ding Z W, Li Y, Sun Q Y, *et al.* Trace elements in soils and selected agricultural plants in the tongling mining area of China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(2), doi: 10.3390/ijerph15020202.
- [18] Fernández-Caliani J C, Barba-Brioso C, de la Rosa J D. Mobility and speciation of rare earth elements in acid mines soils and geochemical implications for river waters in the southwestern Iberian margin[J]. *Geoderma*, 2009, **149**(3-4): 393-401.
- [19] Sun G X, Williams P N, Zhu Y G, *et al.* Survey of arsenic and its speciation in rice products such as breakfast cereals, rice crackers and Japanese rice condiments [J]. *Environment International*, 2009, **35**(3): 473-475.
- [20] Ruttens A, Cheyns K, Blanpain A C, *et al.* Arsenic speciation in food in Belgium. Part 2: Cereals and cereal products[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, **118**: 32-41.
- [21] 李仁英, 张婧, 谢晓金, 等. 不同品种水稻对砷的吸收转运及其健康风险研究[J]. *土壤通报*, 2019, **50**(2): 489-496.
- Li R Y, Zhang Q, Xie X J, *et al.* Arsenic uptake and translocation of different rice cultivars and its health risk [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(2): 489-496.
- [22] 陈丽娜, 柳晓娟, 刘文菊, 等. 水分管理模式对水稻根区砷铁磷动态变化规律的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(1): 93-98.
- Chen L N, Liu X J, Liu W J, *et al.* Dynamics of As, Fe and P concentrations in the rhizosphere of rice plants growing under three water regimes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(1): 93-98.
- [23] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- Zhong X L, Zhou S L, Huang M L, *et al.* Chemical form distribution characteristic of soil heavy metals and its influencing factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- [24] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤pH值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. *中国矿业*, 2017, **26**(6): 79-83.
- Yang X M, Ren G M, Li L X, *et al.* Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship [J]. *China Mining Magazine*, 2017, **26**(6): 79-83.
- [25] 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 等. 桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1855-1863.
- Chen T B, Pang R, Wang F P, *et al.* Safety assessment of rice planting in soil cadmium geological anomaly areas in Southwest Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1855-1863.
- [26] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- Tian M L, Zhong X M, Zhang Y X, *et al.* Concentrations and

- health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- [27] Rai P K, Lee S S, Zhang M, *et al.* Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms, and management [J]. *Environment International*, 2019, **125**: 365-385.
- [28] 韩峰, 高雪, 陈海燕. 不同种类蔬菜对土壤重金属的富集差异[J]. *贵州农业科学*, 2014, **42**(6): 129-132.
- Han F, Gao X, Chen H Y. Enrichment difference of different types of vegetables to heavy metals [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, **42**(6): 129-132.
- [29] 柳勇, 何江华, 王少毅, 等. 广州市蔬菜地重金属剂量对蔬菜富集重金属的影响——以菜心为例[J]. *生态环境*, 2003, **12**(3): 273-276.
- Liu Y, He J H, Wang S Y, *et al.* Effect of heavy metal dosage on the accumulation of heavy metals in flowering Chinese cabbage in Guangzhou vegetable soils [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, **12**(3): 273-276.
- [30] 翁城武, 黄伙水, 韩家才. 蔬菜中 16 种元素的含量测定及其相关性分析[J]. *食品研究与开发*, 2017, **38**(18): 138-142.
- Weng C W, Huang H S, Han J C. Determination and correlation analysis of the contents of 16 elements in vegetables [J]. *Food Research and Development*, 2017, **38**(18): 138-142.
- [31] 李振泽, 周康康. 铜-风-三-丹汞矿带成岩作用[J]. *石油与天然气地质*, 1988, **9**(4): 428-432.
- Li Z Z, Zhou D K. Diagenesis of mercury ore zone in Tongren-Fenghuang—Sandu—Danzhai region [J]. *Oil & Gas Geology*, 1988, **9**(4): 428-432.
- [32] 宋春然, 何锦林, 谭红, 等. 贵州省农业土壤重金属污染的初步评价[J]. *贵州农业科学*, 2005, **33**(2): 13-16.
- Song C R, He J L, Tan H, *et al.* Primary appraisal for heavy metals pollution in farm soils of Guizhou province [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, **33**(2): 13-16.
- [33] 孔祥宇, 黄国培, 程天金, 等. 贵州省稻田土壤重金属分布特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, **37**(6): 1084-1091.
- Kong X Y, Huang G P, Cheng T J, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in paddy soils of Guizhou province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, **37**(6): 1084-1091.
- [34] 喻子恒, 黄国培, 张华, 等. 贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(8): 2296-2301.
- Yu Z H, Huang G P, Zhang H, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in paddy soil in Danzhai Au-Hg mining area, Guizhou, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(8): 2296-2301.
- [35] 杨世杰. 硫和砷在水稻体内的累积分布及其在土壤中赋存形态的变化[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- Yang S J. S and As accumulation and distribution in rice (*Oryza. sativa* L.) and the change of their speciation in soil [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [36] 周歆. 重金属低累积水稻品种筛选及稻田化学改良技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- Zhou X. Selection of paddy rice varieties of low heavy metal accumulation and chemical modification of paddy field [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [37] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱鑫, 等. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究[J]. *地学前缘*, 2005, **12**(1): 252-260.
- Yang Z F, Chen Y L, Qian X, *et al.* A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, **12**(1): 252-260.
- [38] 李冰. 水稻基因型和土壤条件对其吸收总汞和甲基汞的影响[D]. 广州: 中山大学, 2012.
- Li B. Effects of genotypes and edaphic factors on mercury and methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2012.
- [39] 黄涂海. 镉污染农田土壤的分类管控实践[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Huang T H. Classified management and control practice of cadmium contaminated farmland soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [40] 田甜. 福建省土壤汞、砷及其向水稻籽粒富集特征的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- Tian T. Soil mercury, arsenic and their accumulation characteristics to indica rice (*Oryza sativa* L.) grain in Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
- [41] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. *科学通报*, 2002, **47**(3): 207-210.
- Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, *et al.* Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation characteristics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(11): 902-905.
- [42] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藿香蓟 (*Ageratum conyzoides* L.) 对镉污染农田的修复潜力[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- Zhang Y X, Song B, Bin J, *et al.* Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on cadmium contaminated farmland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- [43] 宋波, 张云霞, 田美玲, 等. 应用籽粒苋修复镉污染农田土壤的潜力[J]. *环境工程学报*, 2019, **13**(7): 1711-1719.
- Song B, Zhang Y X, Tian M L, *et al.* Potential for cadmium contaminated farmland remediation with *Amaranthus hypochondriacus* L. [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(7): 1711-1719.
- [44] 傅校锋, 刘杰, 朱文杰, 等. 青葙修复镉污染土壤的田间试验研究[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(4): 329-334.
- Fu X F, Liu J, Zhu W J, *et al.* Field experiment on remediation of cadmium contaminated soil by *Celosia argentea* L. [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(4): 329-334.
- [45] 赵甲亭, 李云云, 高愈希, 等. 贵州万山汞矿地区耐汞野生植物研究[J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(5): 881-887.
- Zhao J T, Li Y Y, Gao Y X, *et al.* Study of mercury resistant wild plants growing in the mercury mine area of Wanshan district, Guizhou province [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, **9**(5): 881-887.
- [46] 张鹏, 杨富淋, 蓝莫茗, 等. 广东大宝山多金属污染排土场耐性植物与改良剂稳定修复研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(2): 545-552.
- Zhang P, Yang F L, Lan M M, *et al.* Phytostabilization with tolerant plants and soil amendments of the tailings of the Dabaoshan polymetallic mine in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(2): 545-552.

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)