

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用 .....刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析 .....任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式 .....田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO<sub>2</sub>协同效益评估 .....肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同 .....李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径 .....张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益 .....邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的多尺度驱动机制 .....张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM<sub>2.5</sub>浓度时空分布特征及影响因素分析 .....王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM<sub>2.5</sub>碳组分空间差异性来源解析 .....武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM<sub>2.5</sub>中碳质气溶胶的变化特征及来源解析 .....桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析 .....刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素特征及健康风险评估 .....杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析 .....潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析 .....罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化 .....吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源 .....卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析 .....崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价 .....张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估 .....李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算 .....丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估 .....赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估 .....高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估 .....钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析 .....马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测 .....王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例 .....代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素 .....刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应 .....张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平 .....林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制 .....廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性 .....何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析 .....傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析 .....赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP<sub>GS</sub>变化的影响 .....徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响 .....李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响 .....鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响 .....丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系 .....邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征 .....王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响 .....宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响 .....胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响 .....陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测 .....王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析 .....李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征 .....杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估 .....杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价 .....肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估 .....沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例 .....董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应 .....易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响 .....刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应 .....肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征 .....李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制 .....李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险 .....白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征 .....高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应 .....闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

# 省级尺度土壤 As 迁移转化与水稻安全种植区划：以贵州省为例

董心月<sup>1</sup>, 吴勇<sup>2</sup>, 周子寒<sup>1</sup>, 王佛鹏<sup>1</sup>, 张云霞<sup>1</sup>, 宋波<sup>1,3\*</sup>

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004; 3. 桂林理工大学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:** 为探究贵州省水田土壤和稻米 As 含量分布特征, 及稻米食用健康风险并评估水稻安全种植性, 采集水田土壤样品 209 个, 水田土壤-水稻样品 1 567 组, 测定其 As 含量和土壤基本理化性质, 运用单因子污染指数法对样品污染程度进行评价. 结果表明: ①贵州省水田土壤主要呈中性, 其保肥能力和有机质含量均为中等以上水平, 土壤较为肥沃. 水田土壤  $\omega(\text{As})$  范围为 0.042~91.75  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 几何均值为 10.03  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 经独立样本 *T* 检验, 水田土壤 As 累积效应低于自然土壤 As ( $P<0.05$ ). 与《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 筛选值 (0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 相比, 土壤样品超标率 15.37%. ②稻米  $\omega(\text{As})$  范围为 0.001~0.937  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 几何平均值为 0.108  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 10.21% 的稻米样品超过《食品中污染物限量 (试行)》(GB 2762-2022) 的限值, 超标点位主要分布于黔南州的中北部和遵义南部县区等工矿业活动区周围. ③经大米摄入的 As 对成人和儿童存在非致癌风险和致癌风险, 且对儿童的影响大于成人. 贵州省水田稻米安全种植区划未见严格管控区域, 水稻可实现安全种植.

**关键词:** 贵州省; 水田; 稻米; 砷(As); 健康风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1781-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202305007

## Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province

DONG Xin-yue<sup>1</sup>, WU Yong<sup>2</sup>, ZHOU Zi-han<sup>1</sup>, WANG Fo-peng<sup>1</sup>, ZHANG Yun-xia<sup>1</sup>, SONG Bo<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Environment Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety Guarantee in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** To explore the distribution characteristics of paddy soil and rice AS content, as well as the health risks of rice consumption, and to evaluate the safe planting ability of rice, 209 paddy soil samples and 1 567 groups of paddy soil-rice samples were collected, their As content and basic soil physical and chemical properties were determined, and the single-factor pollution index method was used to evaluate the pollution degree of the samples. The results showed that: ① the soil of paddy fields in Guizhou Province was mainly neutral, and its fertilizer retention capacity and organic matter content were above the medium level, and the soil was relatively fertile. The range of  $\omega(\text{As})$  in paddy soil was 0.042-91.75  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , the geometric mean was 10.03  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and the cumulative effect of paddy soil As was lower than that of natural soil As ( $P<0.05$ ) by independent sample *T*. Compared with the screening value (0.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) of the Soil Pollution Risk Management and Control Standard for Agricultural Land (GB 15618-2018), the excess rate of soil samples was 15.37%. ② The  $\omega(\text{As})$  range of rice grain samples was 0.001-0.937  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , the geometric average value was 0.108  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 10.21% of the rice grain samples exceeded the limit value of "Limit of Contaminants in Food (trial)" (GB 2762-2022), and the locations where the exceedances are mainly found are in the central and northern parts of Qiannan Prefecture, as well as around industrial and mining activity zones in the southern counties and districts of Zunyi. ③ As ingested through rice posed non-carcinogenic risk and carcinogenic risk for adults and children, and the impact on children was greater than that of adults. There is no strict control area for safe rice planting in Guizhou Province, and rice can be safely planted.

**Key words:** Guizhou Province; paddy field; rice; As; health risk

砷(As)是剧毒元素,自然界不存在单独的As元素,大多以雄黄和雌黄等硫化物形态混杂于铜矿、铁矿和锑矿等矿石中<sup>[1]</sup>. As经污水灌溉、农药和化肥等途径进入土壤,易于累积,并且难以去除<sup>[2,3]</sup>. 土壤的砷污染不仅影响农作物的生长、粮食产量和质量,还通过食物链蓄积在人体内,人体摄入As过多会导致神经系统和器官的损害和骨质疏松,对植物则会影响叶绿素的形成,导致光合作用受阻从而导致植物机体生长不良<sup>[4-6]</sup>. 贵州作为我国矿产资源最丰富省份之一<sup>[7]</sup>,金属煤炭储量丰富,有研究证实<sup>[8,9]</sup>,贵州金属矿区存在As污染情况,西南部存在含As过量的高砷煤. 开采高As煤矿导致As中毒<sup>[10]</sup>,乱排乱放曾

导致独山As污染<sup>[11]</sup>事件. 因此,对贵州省进行系统的As污染调查研究具有重要的现实意义.

我国有65%的人以大米为主食<sup>[12]</sup>,稻米质量安全问题直接维系消费者的健康. 水稻(*Oryza sativa*, L.)是贵州省第一大粮食作物,水稻种植面积与产量分别占全省粮食作物种植面积与产量的24.0%和40.0%左右,全省近90%的人口以大米为主食,大米

收稿日期: 2023-05-02; 修订日期: 2023-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52230006); 广西科技重大专项(桂科AA17204047)

作者简介: 董心月(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属土壤污染修复及其评价, E-mail:1327316702@qq.com

\* 通信作者, E-mail:songbo@glut.edu.cn

对居民膳食重金属暴露贡献率最高. 有研究发现<sup>[11]</sup>, 水稻对重金属有很强的富集能力, 几种农作物籽粒(玉米、水稻和小麦)中水稻比其他旱作作物更容易累积 As. 以往对土壤-稻米研究主要集中在矿区周围, 有关全省土壤-稻米 As 污染的系统研究较少, 涉及土壤和稻米中 As 分布特征和食用健康风险评估等方面还需要进一步深入研究, 研究典型区域稻田土壤与稻米 As 的分布, 对于保障稻米安全具有重要的现实意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区背景

贵州省位于云贵高原东部(东经 103°36'~109°35', 北纬 24°37'~29°13'), 全省管辖 6 个地级市, 3 个民族自治州. 境内地势西高东低, 自中部向北、东和南三面倾斜. 地貌属于中国西南部高原山地, 平均海拔 1 100 m 左右, 山地和丘陵占总面积的 92.50%, 岩溶地貌发育典型, 喀斯特地貌面积达 61.9%. 气候变化小, 属亚热带湿润季风气候, 冬暖夏凉. 降水丰富, 年降水为 850~1 600 mm, 适宜发

展农业生产<sup>[13]</sup>.

### 1.2 样品采集与前处理

样品采集时间为 2018 年 7~9 月, 采样点如图 1 所示. 本着代表性的原则, 先根据土地利用情况图和卫星地图分析, 在水田集中分布区采取网格均匀布点, 样点间距 2~3 km; 涉重工矿业周边及影响区水田则加密布点抽样, 样点间距 0.5~1.0 km. 土壤采样深度 0~20 cm, 每个土样采用梅花形布点法由 5 个子样等量混合而成, 留下 1~2 kg 装入袋中. 记录周边基本地貌特征、GPS 定点位置和土壤基本颜色、结构及质地. 样品于阴凉处风干, 除去石子和植物根系等杂物, 研磨后过筛, 装样待测.

水稻样品与土样同步采集, 采集根系土壤的同时, 采集成熟水稻样, 由 5 件子样混合而成, 避免采集到空穗和受病虫害影响的样本. 将水稻经过 3 次去离子水冲洗, 在烘干机内 60℃ 烘干后脱粒, 将脱壳的稻米混匀, 用四分法取样, 将样品经过不锈钢打磨机粉碎, 装袋存储于干燥器内待测.

共采集自然土壤 468 个, 水田土壤-稻米样品 1 567 组, 水田土壤单一样品 209 个.

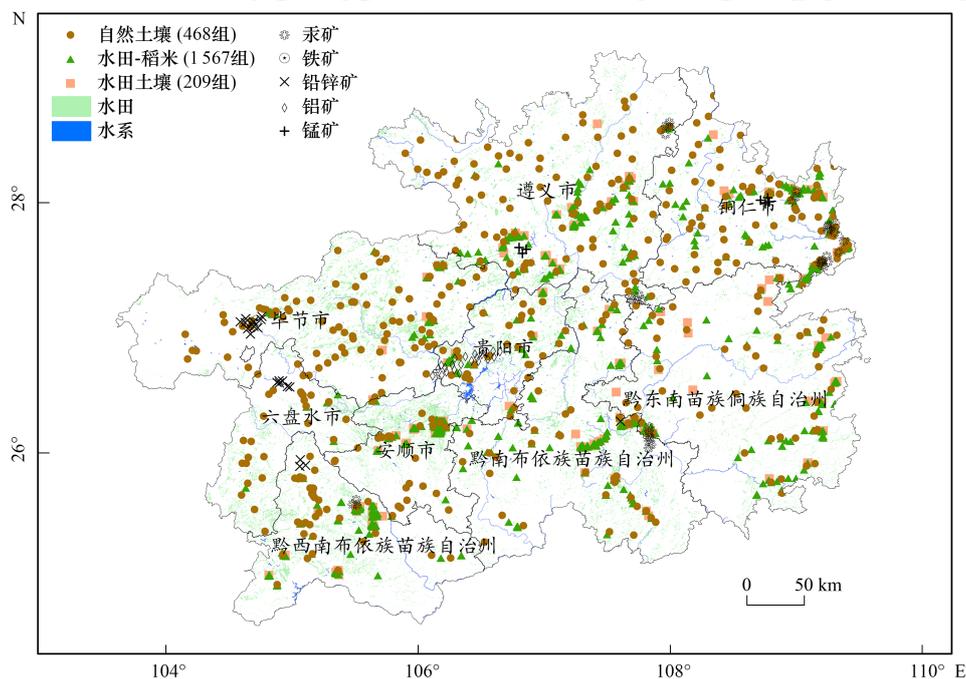


图 1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Schematic distribution of sample sites in the study area

### 1.3 样品分析与质量控制

测试项目包括土壤 pH、土壤有机质(SOM)、土壤阳离子交换量(CEC)、土壤全量 As(TAs)、土壤有效态 As(AAs)和稻米总 As(GAs). 土壤 pH 测定采用 pH 电位测定法(NY/T 1121.2-2006); 采用水合热重铬酸钾氧化-比色法(GB 9834-88)测定 SOM; 应用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法(HJ 889-2017)测定

CEC; 将土壤和稻米采用 1:1 王水进行水浴消解<sup>[14]</sup>, 利用原子荧光光度分析仪(AFS-9700)测定其 As 含量; 土壤有效态 As 采用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的盐酸浸提, 利用原子荧光光度分析仪(AFS-9700)测定. 分析过程中加入土壤成分分析标准物质(GSS-4)和大米标准物质(GBW 100357)进行质量控制, 其 As 回收率分别为 86.6%~95.3% 和 90.4%~95.1%; 随机选取 10% 的样

品进行重复实验, 相对误差在±5%以内。

#### 1.4 图形处理和数据处理

图形处理则采用 ArcGIS 10.7 和 Origin 2023 绘制, 利用 SPSS 26.0 对原始数据进行相关统计分析。

#### 1.5 评价方法

(1) 单因子污染指数法:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为污染指数,  $P_i < 1$  表示未污染,  $1 \leq P_i$  表示超过筛选值;  $C_i$  为样品实测值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $S_i$  为元素限量标准, 参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 中的风险筛选值, 简称“筛选值”。

本研究所测稻米中 As 含量为全量, GB 2762-2022 中对于稻米中无机 As 的限量为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 查阅文献得稻米中无机 As 约占总 As 的 80%<sup>[15]</sup>。

(2) 稻米富集系数 (BCF) BCF 是稻米中 As 含量与土壤中 As 含量的比值, 用于评估稻米富集 As 的能力, 公式如下:

$$\text{BCF} = \frac{C_g}{C_s} \quad (2)$$

式中, BCF 为富集系数,  $C_g$  为稻米中 As 含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_s$  为对应土壤中 As 含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 稻米健康风险评价模型 重金属日均摄入量 (ADI) 即当地居民经过稻米途径摄入的重金属含量。计算如下:

$$\text{ADI} = \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times W_r \times C_{\text{hm}}}{B_w \times \text{AT}_n} \quad (3)$$

式中, EF 为暴露时间, 成年男性、女性和儿童的 EF 均为  $345 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[16]</sup>; ED 为暴露年限或期望寿命 (a), 成年男女的 ED 为 70 a, 儿童为 18 a<sup>[17]</sup>;  $C_{\text{hm}}$  为大米中的重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $W_r$  为居民的稻米日均消费量,  $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ , 成年男性、女性和儿童的  $W_r$  分别为 0.420、0.365 和  $0.198 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[17]</sup>;  $B_w$  为人群的平均体重, kg, 儿童的体重为 29.3 kg, 成年男性和女性的体重分别为 65 kg 和  $56.8 \text{ kg}$ <sup>[18]</sup>;  $\text{AT}_n$  为平均作用时间天数, d; 对于非致癌效应,  $\text{AT}_n = \text{ED} \times 365 \text{ d}$ , 对于致癌效应,  $\text{AT}_n = 25\,550 \text{ d}$  ( $70 \text{ a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ )。

健康风险评价采用美国环保署 (US EPA) 推荐的目标危险系数 (THQ)<sup>[19]</sup> 进行评价。THQ 是以污染物暴露剂量与参考计量的比值来表征健康风险水平, 计算模型为:

$$\text{THQ} = \frac{\text{ADI}}{\text{Rfd}_0} \quad (4)$$

式中,  $\text{Rfd}_0$  为口服参考剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。As 的口服参考剂量 ( $\text{Rfd}_0$ ) 为  $0.0003 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

THQ < 1.0 时表明对人体健康没有负面影响;

THQ > 1.0 时表明对人体健康产生负面影响的可能性极大; 当 THQ > 10.0 时表明将对人体健康产生慢性毒性效应。

(4) 致癌风险评估 重金属的致癌风险定义为终身致癌风险 (CR), 选取重金属 As 采用公式 (5) 估算其致癌风险水平:

$$\text{CR} = \text{ADI} \times \text{SF} \quad (5)$$

式中, CR 为重金属暴露产生的终身致癌风险; ADI 为食用大米产生的重金属日均暴露剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ; SF 为重金属的致癌斜率因子,  $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ , 参考 US EPA 的 IRIS 毒性数据库, As 的 SF 数值取 1.5。

当 CR <  $10^{-6}$  时, 认为致癌风险是可忽略的; 当 CR 介于  $10^{-6}$ ~ $10^{-4}$  之间时, 认为致癌风险是可以接受的; 当 CR >  $10^{-4}$  时, 一般认为会造成严重的健康影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 水田土壤基本理化性质统计分析

黄壤、石灰性土和红壤是贵州省主要的土壤类型, 分别占贵州总面积的 38.7%、24.4% 和 10.8%。pH 是影响土壤对 As 吸附、解吸的重要因素, pH 在 4.0~6.5 有利于 As 的吸附, pH 在 7.0~8.5 有利于 As 的解吸<sup>[20]</sup>。贵州水田土壤 pH 为 3.37~8.46, 其中 0.1% 水田土壤点位 pH 低于 4.0, 39.3% 点位 pH 在 4.0~6.5 之间, 18.5% 点位 pH 在 6.5~7.0 之间, 42.1% 点 pH 在 7.0~8.5 之间。由图 2 看出贵州省水田土壤 pH 西南区偏高, 东南区偏低, 土壤总体呈中性和弱酸性。

贵州省水田 SOM 原始数据符合对数正态分布, 采用几何均值表示。通过图 3 可知, 贵州省水田  $\omega(\text{SOM})$  集中在 30~50  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 依据文献[21]的“全国土壤养分含量分级标准”分类, 属于二类以上, 土壤养分充足, 适合耕种作物。贵州省水田  $\omega(\text{SOM})$  几何均值为  $42.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中安顺市  $\omega(\text{SOM})$  最高, 可达  $53.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 铜仁市水田最低, 含量仅为  $34.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

CEC 是评价土壤保肥能力的重要指标<sup>[22]</sup>。CEC <  $10 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  说明土壤保肥能力低,  $10 \sim 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  为土壤保肥能力中等, CEC >  $20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  为土壤保肥能力强。由图 3 可知, 贵州省水田样本 CEC 大部分在  $20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上, 属于保肥能力强的土壤; 六盘水市地区 CEC 最低, 为  $19.1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 黔东南州、黔南州两地 CEC 分别达到  $25.9 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $25.4 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 总体情况为适宜水稻生长的土壤环境。

### 2.2 水田土壤重金属 As 含量分析

表 1 为贵州省水田土壤 As 含量, 图 4 为水田土壤有效态 As 含量基本特征统计, 原始数据符合对数正态分布, 采用几何均值来表示土壤中 As 含量。

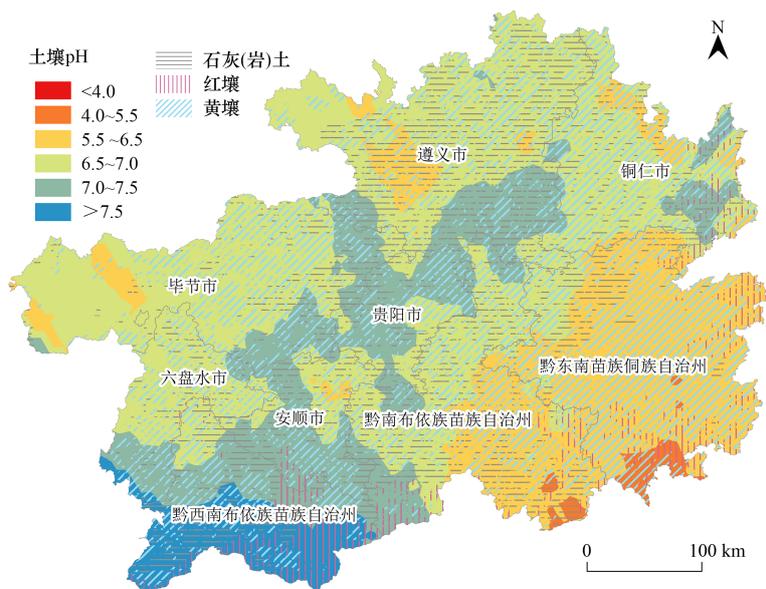


图2 土壤类型与pH分布

Fig. 2 Soil type and pH distribution map

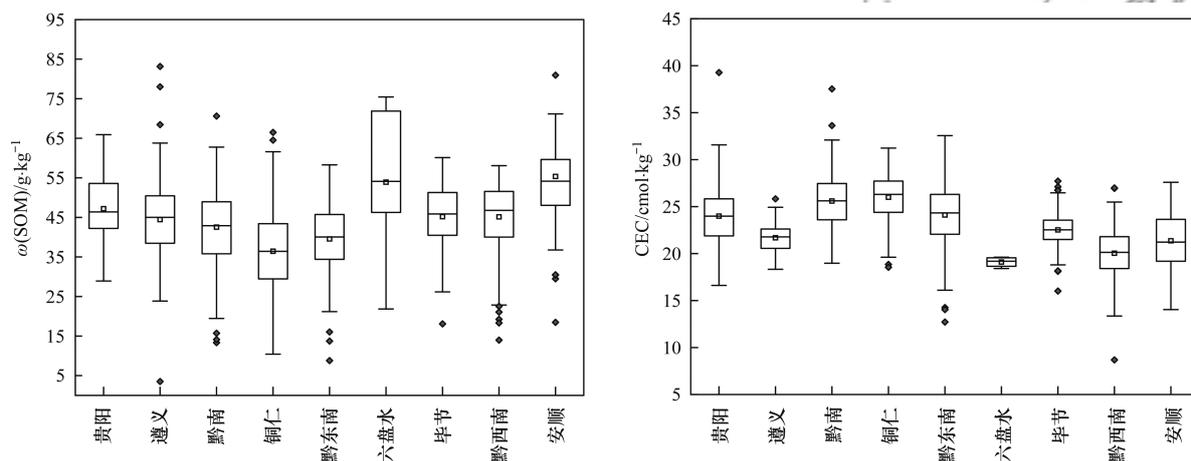


图3 土壤有机质和CEC含量状况

Fig. 3 Soil organic matter and CEC content

由表1可知,贵州省水田样品 $\omega(\text{As})$ 范围为 $0.04\sim 91.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,几何平均值为 $10.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,约为我国土壤As背景值( $9.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的1.09倍,为贵州省自然土壤的( $21.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[23]</sup>的41%,水田土壤的As含量远远低于旱地土壤As含量.贵州水田As变异系数在42.10%~94.71%,属中、强变异水平,变异系数高可能与人为污染有关,同时由于研究样点地质背景复杂、地理分布广和成土母质复杂也可能导致贵州土壤重金属整体上变异系数高<sup>[24, 25]</sup>.贵州省毕节、贵阳和遵义的土壤As含量存在显著差异,而其他各市土壤As含量不存在显著差异.受到近年来研究区工业发展和矿产资源的开发等因素的干扰<sup>[26]</sup>,使得研究区土壤中的As累积,导致水田土壤As含量在空间上呈现不同的差异性.铜仁市和黔东南州西北部接壤部分地区是矿业采集聚集区,存在着

矿区As元素迁移至农用地土壤的可能.贵州省不同地区的土壤As含量差异大的原因可能与西南地区土壤As含量较高,存在高As煤矿区,贵州省开采矿产冶炼时间较长等有一定关联.

由图4可知,土壤 $\omega(\text{AAs})$ 范围为 $0.001\sim 0.216\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,几何平均值为 $0.0354\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,变异系数为297.3%,整体呈现极强变异水平.贵州省水田 $\omega(\text{AAs})$ 为 $0.012\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,活化率为0.120%.黔东南州地区 $\omega(\text{AAs})$ 最高,可达 $0.020\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,为贵州省水田AAs含量的1.67倍,变异系数为4.88%,活化率高达0.236%;其次为黔南州, $\omega(\text{AAs})$ 为 $0.018\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,活化率为0.220%.方差分析结果表明,贵州省各市土壤有效态As含量不存在显著差异( $P>0.05$ ).贵州省各地区土壤有效态As含量极低,活化率均未达1%.

表 1 贵州省水田土壤 As 含量统计分析

Table 1 Statistical analysis of soil As content in paddy fields in Guizhou Province

位置	样品数/个	范围 /mg·kg <sup>-1</sup>	算术平均值±标准差 /mg·kg <sup>-1</sup>	几何平均值 <sup>1)</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数/%	偏度 (对数转换)	超标率 <sup>2)</sup> /%
安顺市	195	7.42~62.36	20.03±10.76	18.03bc	48.76	0.21	27.19
毕节市	143	5.00~51.04	17.36±10.65	15.90a	42.10	-0.27	16.08
贵阳市	79	0.05~56.66	22.07±10.66	16.39d	64.13	-3.64	34.18
六盘水市	5	4.36~14.43	9.42±11.59	8.64ab	42.95	-0.66	0
黔东南州	183	0.05~72.80	11.61±10.62	8.46cd	94.71	-1.53	10.38
黔南州	305	0.05~70.26	12.17±10.61	8.17cd	87.14	-1.82	9.84
黔西南州	187	0.05~91.75	14.67±10.70	11.61cd	71.55	-1.85	15.51
铜仁市	265	0.04~74.15	11.78±10.60	5.62cd	88.03	-1.60	12.07
遵义市	259	0.84~48.13	13.93±10.60	11.23d	64.62	-0.81	13.12
贵州省	1 776	0.04~91.75	14.31±2.44	10.03	74.50	-2.41	15.37

1)不同小写字母表示差异性分析结果( $P < 0.05$ ); 2)超标率为水田土壤超出土壤筛选值各市样品的百分数

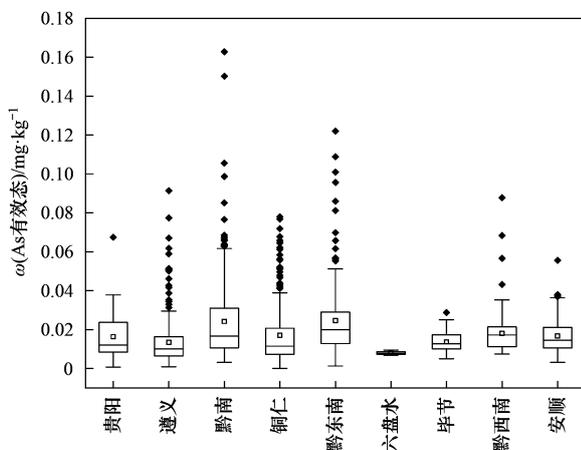


图 4 水田土壤 As 有效态含量分析

Fig. 4 Analysis diagram of As effective state content in paddy soil

### 2.3 土壤 As 污染空间分布

如图 5 所示,在 1 776 个土壤采样点中,有 257 个点位土壤 As 含量超过了(GB 15618-2018)中的筛选值,点位超标率为 14.47%。贵阳市为超标最严重区域,超标率为 38.57%;其次为安顺市,超标率为 27.19%。两个地区均有 As 矿开采,所以除地质背景高外,人类生产生活带来的影响也会导致 As 含量超标<sup>[27, 28]</sup>。

变异系数不能定量地刻画其在空间尺度上的随机性和结构性、独立性和相关性,只能概括反映土壤重金属的总体特点<sup>[29]</sup>。对贵州省水田土壤选用克里格(Kriging)插值法进行土壤 As 污染空间预测<sup>[30]</sup>,拟合模型选用球状模型,插值块金值  $C_0: 0.061 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 偏基台值  $(C_0+C_1): 0.109 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 块基比  $C_0/(C_0+C_1): 0.56$ , 块基比在 0.25~0.75 之间,变量有中等程度的空间相关性,受到人为活动的干扰<sup>[31]</sup>和受到来自于母岩(碳酸盐岩)风化<sup>[24]</sup>的影响。据图 6 可知,预测出重度污染点位分布在黔西南的东部(图 6 中 1 号框),毕节市的东部(图 6 中 2 号框),遵义市与贵阳市交界

地区(图 6 中 3 号框),黔南州的东部地区(图 6 中 4 号框),以黔西南州土壤 As 污染最为严重。从土壤 As 含量总体空间分布可以得出,元素含量值的空间分布特征与煤矿开采及铅锌矿冶炼有一定关系<sup>[32, 33]</sup>。

### 2.4 稻米 As 含量特征及污染分析

对 1 567 件稻米样品中 As 含量进行统计,结果见表 2,经对数转换后均符合正态分布,以几何均值表征稻米中 As 含量大小。整体上贵州省稻米  $\omega(\text{As})$  范围为 0.001~0.937  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值为 0.133  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量(试行)》(GB 2762-2022)中限量标准值(0.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )(换算按总 As 的 80%为无机 As,限量标准值为 0.25  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。其中贵阳市和遵义市中部分稻米样品 As 含量大于限量标准值,样点超标率分别为 14.29%和 13.90%。

据稻米中 As 的单因子污染指数空间分布(图 7),超标点位多在贵州省东部和北部,稻米受重金属污染与矿业活动影响较明显,贵州省各地稻米 As 含量高值点位与矿业分布的地区重合,集中在遵义市锰矿、黔西南州煤矿、铜仁市与黔东南州的汞矿等周围地区。但也存在部分地区矿业影响较小,仍有样点 As 超标情况,如黔东南州东部和西北部分地区以及安顺市中部,可能受当地较高地质背景影响。稻米 As 含量超标点位分布见图 8,其中“米土均不超标”(稻米和土壤 As 均不超标)占比超半数,为 70.00%,说明研究区土壤和稻米 As 整体上处于未污染状;“米不超土超”(稻米 As 不超标但水田土壤 As 超标)占比为 11.12%,说明水稻吸收 As 到稻米过程中,可能水稻品种和所处地土壤理化性质对 As 累积进入稻米籽粒中影响较大;“米超土不超”(稻米 As 超标但水田土壤 As 不超标)占比 15.89%,有可能当地种植的稻米品种基因型对土壤 As 富集能力较强,导致稻米中 As 超标,这需要进一步深入了解;此次两者均超标占比

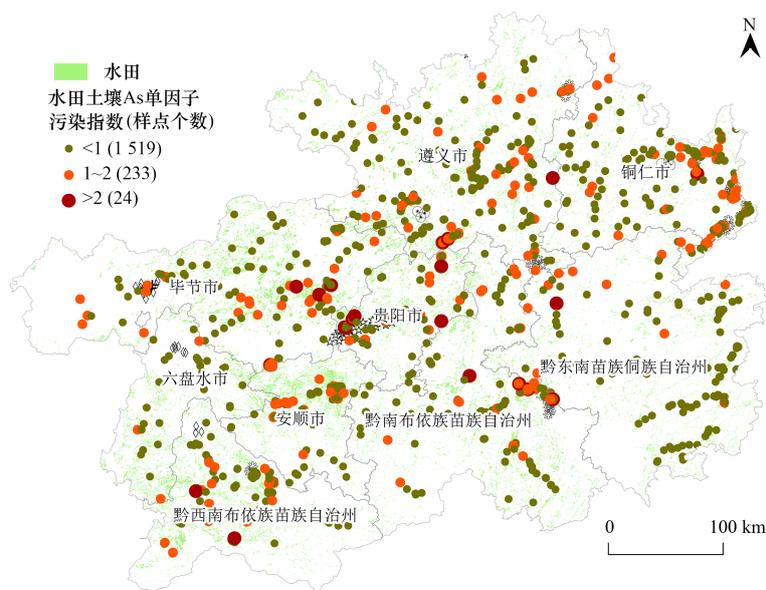


图5 贵州省水田土壤As单因子污染指数分布

Fig. 5 Distribution of As single-factor pollution index in paddy fields in Guizhou Province

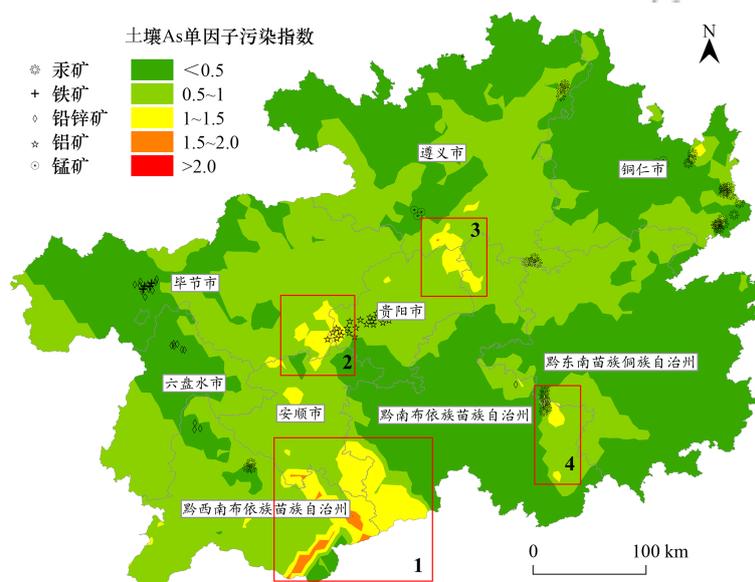


图6 水田土壤As单因子污染指数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of As single-factor pollution index in paddy soil

2.99%, 在本研究中占少数. 土壤和稻米均超标的点位分布在安顺市的东南部和贵阳市南部, 稻米超标而土壤不超标的点位分布在黔南州中部、遵义的南部地区.

## 2.5 稻米As与土壤理化性质的关系分析

图9可知, 通过Spearman分析表明, 稻米As含量与土壤pH和土壤总As呈现显著正相关( $P < 0.05$ ), 说明土壤的酸碱性对稻米As含量存在一定影响, 土壤中的As含量越高, 则稻米中的As含量越多. 未见稻米As与土壤As有效态、SOM和CEC的相关性.

土壤理化性质是影响土壤对As吸附的重要因素. 土壤pH与土壤总As呈显著正相关, 说明土壤pH

增大, 土壤总As含量增加. 土壤总As含量与土壤有效态As呈现较明显的负相关性, 说明重金属全量越高时, 生物有效态性较强的赋存形态占比越低. 出现这一情况也许是由于成土母质的差异性导致<sup>[34]</sup>. 有研究表明<sup>[35]</sup>, 研究区域土壤中重金属主要以氧化铁锰结合态形式和残渣态形式存在, 土壤中大部分重金属都以残渣态及氧化铁锰结合态的形态固定在土壤中, 降低了生物有效性.

土壤有效态As和土壤pH呈显著负相关关系, 有研究表明<sup>[36-38]</sup>, 土壤pH值越低, As就越活跃, 其有效性就越高, 越容易迁移到植物体内; 土壤pH值越高, As流动性会越低, 就越不易活化从而转化为沉淀.

表 2 采样区域稻米 As 含量统计  
Table 2 Statistics of rice AS content in the sampling area

位置	样品数/个	范围/mg·kg <sup>-1</sup>	算术平均值±标准差 /mg·kg <sup>-1</sup>	几何平均值 /mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数/%	超标率/%
安顺市	164	0.001~0.818	0.128±0.141	0.100	85.45	7.93
毕节市	129	0.001~0.439	0.116±0.102	0.096	70.34	3.88
贵阳市	70	0.003~0.214	0.115±0.114	0.089	65.90	14.29
六盘水市	5	0.044~0.212	0.125±0.103	0.116	58.52	20.00
黔东南州	183	0.001~0.668	0.132±0.127	0.112	76.05	10.38
黔南州	305	0.001~0.565	0.147±0.286	0.117	155.43	10.16
黔西南州	187	0.001~0.405	0.133±0.116	0.112	66.29	12.30
铜仁市	265	0.001~0.937	0.131±0.135	0.107	81.82	8.30
遵义市	259	0.001~0.495	0.136±0.134	0.113	76.14	13.90
贵州省	1 567	0.001~0.937	0.133±0.170	0.108	99.42	10.21

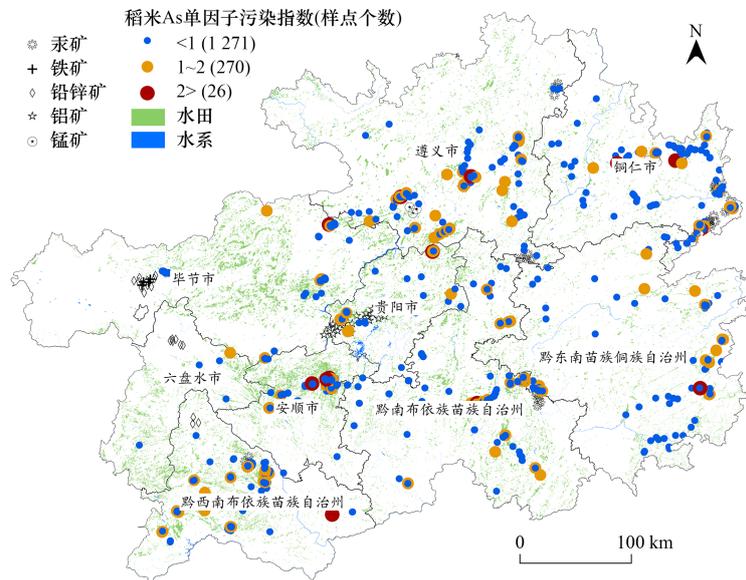


图 7 稻米 As 单因子污染指数  
Fig. 7 Rice grain single-factor pollution index

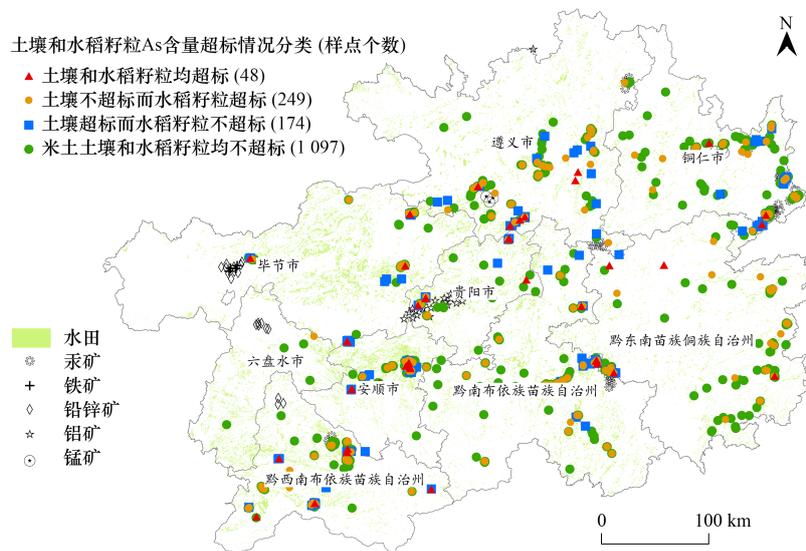


图 8 稻米 As 含量超标点位分布  
Fig. 8 Distribution of rice grain As content exceeding the standard

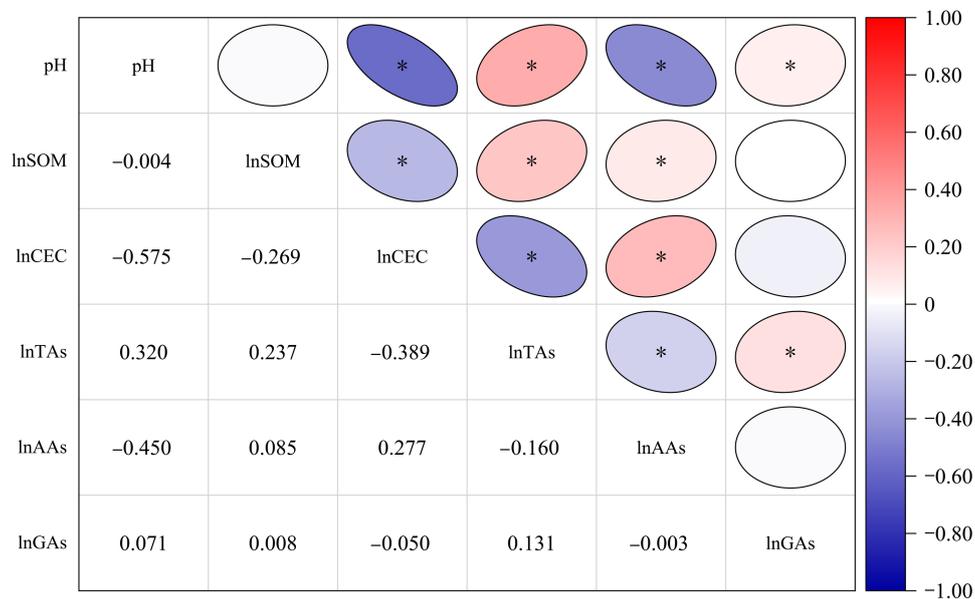
土壤有效态 As 与 SOM、CEC 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。土壤有机质含量是影响土壤有效态砷含量的主要土壤因子之一, He 等<sup>[39]</sup>研究表明有机质含有较多的氨基、羧基、羟基和醛基等活性基团, 这些基团可以通过阳离子交换、螯合作用来吸附 As 离子, 从而影响 As 的有效性, 进一步影响作物对 As 的吸收。土壤有机质可以与 As 离子形成配合物, 增大 As 在土壤中的移动性和生物有效性, 从而使作物吸附更多的 As<sup>[40]</sup>。

### 2.6 土壤和稻米中重金属的健康风险评价

通过贵州省不同地区居民的大米摄入途径的 As 含量, 计算贵州省稻米的重金属 THQ 值, 评估其对人体健康影响。

如表 3 所示, 贵州省成年人与儿童食用大米引起

的 THQ 值均超过安全基准值 1.0, 表明对人体健康产生威胁; 儿童因受到的非致癌健康风险高于成人, 属于重金属敏感人群。这可能是由于儿童体重比成年人轻, 单位体重摄入的大米比成年人多, 所以非致癌健康风险高, 通过合理饮食对于预防不同性别与年龄的重金属摄入至关重要。致癌风险评估结果显示, 贵州省不同人群因食用大米导致的无机 As 暴露有  $10^{-4}$  水平的潜在致癌风险。稻米 As 含量的极高值均落在受污染的铅锌矿区, 计算中未考虑生物可给性, 因此风险水平存在被高估的情况。总体而言, 儿童食用大米的风险高于成年人。同时因为儿童的组织器官功能尚未健全, 身体代谢器官的解毒功能较弱, 对有毒有害物质更敏感<sup>[41]</sup>, 应列为重金属敏感人群。



\*表示在 0.05 级别, 相关性显著; 色柱表示相关性大小, >0 为正相关, <0 为负相关

图 9 稻米 As 含量与土壤理化性质的相关性

Fig. 9 Correlation between rice grain As content and soil physicochemical properties

表 3 不同采样点稻米健康风险评价结果

Table 3 Health risk evaluation results of rice at different sampling points

位置	$\omega(\text{As})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	THQ			$\text{CR} \times 10^{-4}$		
		成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
安顺市	0.100	2.04	2.02	2.13	9.18	9.11	9.58
毕节市	0.096	1.96	1.94	2.04	8.81	8.75	9.20
贵阳市	0.089	1.82	1.80	1.89	8.17	8.11	8.53
六盘水市	0.116	2.37	2.35	2.47	10.65	10.57	11.11
黔东南州	0.112	2.28	2.27	2.38	10.28	10.20	10.73
黔南州	0.117	2.39	2.37	2.49	10.74	10.66	11.21
黔西南州	0.112	2.28	2.27	2.38	10.28	10.20	10.73
铜仁市	0.107	2.18	2.17	2.28	9.82	9.75	10.25
遵义市	0.113	2.30	2.29	2.41	10.37	10.30	10.83
贵州省	0.108	2.20	2.19	2.30	9.91	9.84	10.35

### 2.7 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

量指标为土壤超出水田重金属风险筛选值和管控制、食品中污染物限量, 种植区划给出了优先保护、

安全利用和严格管控这三类参考<sup>[42]</sup>。进行土壤-水稻重金属安全的种植区划时,通过判别各采样点土壤和重金属含量超出土壤风险筛选及管制值和食品中污染物限量风险为基础,先部分后整体,首先通过分析 As 控制下的水稻安全种植评估赋值和综合污染风险,通过 ArcGIS 中克里格插值,拟合模型选用球状模型,  $C_0:0$ ,  $(C_0+C_1):0.1988$ ,  $C_0/(C_0+C_1):0$ , 然后选择去趋势,获得插值后作出安全种植区划。As 安全区划分析赋值规则为:水稻 As 含量超食品中污染物

限量标准  $P_i \leq 1$ 、 $1 < P_i \leq 2$  和  $P_i > 2$  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、风险管制值分别赋值为 1 和 2,其中土壤重金属未超稻田土壤风险筛选值赋值为 0。通过叠加赋值,定义赋值 0、1~2 和 3~4 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。结果如图 10,优先保护类主要集中在黔东南中南部、遵义、铜仁北部和毕节市西部,安全利用类主要集中在贵州中部、东部和西南部,不存在严格管控类区域。

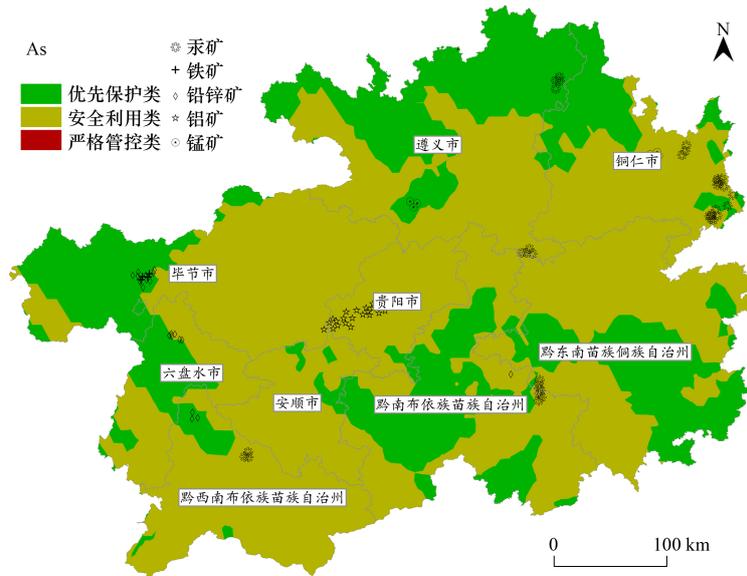


图 10 土壤-水稻 As 安全种植区划  
Fig. 10 Soil-rice As safe planting zoning

### 3 讨论

#### 3.1 土壤-稻米 As 异常成因分析

As 在水稻体内的含量高低是取决于水稻对 As 离子的吸收和生物富集能力,As 离子在水稻体内向籽粒的迁移和分配则影响其健康风险<sup>[43]</sup>。研究区稻米超标的原因大致在以下方面。

首先,采样区域土壤中 As 含量偏高,这与研究区本身母岩母质、土壤理化性质和人类活动等因素有关<sup>[44]</sup>。中国西南地区是典型的高地质背景(HGB)地区,表土中重金属的分布主要归因于地质背景,土壤对 As 的吸附能力由大到小为:红壤>砖红壤>黄棕壤>黑土<sup>[34]</sup>。研究区大部分土壤为黄棕壤和红壤,对 As 有较强的吸附能力。第二,水稻是需水量较大的植物,植物对 As 的吸收主要是通过磷吸收系统和水通道来实现的,当水田淹水时易引起 As 元素向可溶态转化,从而易被水稻根系吸收进入体内积累<sup>[45]</sup>,导致稻米中 As 超标。第三,研究区采集的稻米品种不唯一。查阅已有研究表明<sup>[46, 47]</sup>,无论地点和季节如何,水稻组织中的总 As 含量按以下顺序降低:根>芽>秸秆>壳>

稻米。也有报道这可能是除土壤中重金属含量、土壤形态和环境条件的影响外,不同品种水稻吸收 As 元素的生理生化机制也不同,因此吸收和富集特性也不同<sup>[48]</sup>。另外灌溉强度、基础地质、天气条件、肥料施用和疾病等也具有一定相关性<sup>[49]</sup>。本研究稻米 As 含量与土壤 pH 值有显著相关性。事实上,pH 值通常通过控制 As 与水稻其他部分之间的相互作用而不是直接作用来影响 As 行为<sup>[50, 51]</sup>。稻粒 As 含量与土壤总 As 呈正相关,表明土壤中 As 的污染程度能进一步反映稻米 As 的安全程度<sup>[44, 45]</sup>。通过相关性分析,未见稻米 As 与土壤 As 有效态的关系,证明目前土壤有效态 As 测试方法,得出土壤中有效态 As 占土壤总 As 不足 1%,但稻米仍然 10% 的超标率,可见化学有效态与植物吸收量之间未必完全一致,或者说化学有效态难以很好的表征植物对砷的吸收状况,应该寻求更合适的表征量。

#### 3.2 As 污染安全风险

分析土壤和水稻的 As 含量,比较土壤 As 超土壤风险筛选值和稻米 As 含量超食品污染限量标准,发现安全利用区分布于贵州大部分地区,主要是由于

地质高背景和人类矿业活动造成的水田土壤重金属超标,但多数是轻度超标. 土壤中元素的潜在迁移率和毒性取决于其化学物质,而不是总含量,在水田土壤中大多数重金属是亲硫元素,土壤在淹水还原条件下易生成难溶性硫化物,重金属有效量降低,对水稻造成的影响减小<sup>[52]</sup>. 贵州省大部分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 As 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<sup>[53]</sup>. pH 升高时,As 可溶性会显著增大,常以  $\text{AsO}_3^-$ 、 $\text{HAsO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  和  $\text{AsO}_4^{3-}$  等形式存在,易随水移动. 因此,相比旱地土壤,As 在水田中易移动流失污染程度降低<sup>[54]</sup>. 综合各项原因,研究区域水田土壤及稻米中部分 As 元素含量偏高,是由于采样点位多处于矿带,地质背景高且工矿开采、冶炼和尾渣堆放对土壤造成极大污染.

优先保护区作为土壤环境质量最佳地区,应该防止外源重金属输入,加大区域内土壤环境质量监控. 对安全利用区域采用农艺调控措施减少重金属污染土壤的风险. 对于受 As 污染的地区,可以通过添加赤泥的方式降低土壤中水溶态 As 的含量,增加残渣态 As 的含量,在一定程度上降低土壤中 As 的有效性,以减轻对水稻的毒害作用<sup>[55]</sup>. 调控措施可栽种适合本区域的种植作物,通过合理的水分管理如水改旱、减少灌水数量和调整灌水时期等,可以有效影响 As 的存在形态,从而改变其活性,在一定程度上有助于降低作物对 As 的吸收量<sup>[56]</sup>. 也可以通过施加硅、磷肥,减少人体食用稻米磷肥,减少人体食用稻米途径摄入重金属健康风险.

### 3.3 贵州省稻米超标率不确定性分析

随着工业和交通等相关行业的快速发展,人类的活动加剧了土壤 As 元素的累积效应. 结果显示,贵州省水稻的 As 超标率 10.35%,造成这种状况的原因可能和种植水稻品种有关<sup>[45]</sup>,但这也可能是样点布局差异所致. 结合本研究中,在采集过程中布点并不是均匀的网格布点,而是在网格布点的基础上,在有色金属矿业影响区进行了加密布点,总体而言,研究所得结果可能比贵州省原本稻米 As 含量结果偏高. 因此,可以认为贵州省水稻 As 总体是安全的,但需要对超标区域加以特别关注.

## 4 结论

(1) 本文结果表明,研究区水田土壤主要呈中性及弱酸性,其 SOM 含量和保肥能力均为中等以上水平;经独立样本 *T* 检验 ( $P < 0.05$ ),水田土壤 As 累积效应低于自然土壤.

(2) 研究区域中,遵义市土壤 As 污染最突出;就

县级而言,安顺市的东南部县级区域土壤 As 点位超标率较高;基于 (GB 2762-2022),稻米超标点位主要分布黔西南州的西北部工矿业活动区周围,整体上研究区土壤环境质量和稻米呈现正常状态.

(3) 经农作物摄入暴露途径下,研究区 As 对居民存在一定的致癌和非致癌健康风险,且对儿童的影响大于成人. 贵州省整体上水稻可实现安全种植.

### 参考文献:

- [1] 肖细元,陈同斌,廖晓勇,等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 201-212.  
Xiao X Y, Chen T B, Liao X Y, et al. Regional distribution of arsenic contained minerals and arsenic pollution in China [J]. Geographical Research, 2008, 27(1): 201-212.
- [2] Abrahams P W. Soils: their implications to human health [J]. Science of the Total Environment, 2002, 291(1-3): 1-32.
- [3] Fei X F, Christakos G, Xiao R, et al. Improved heavy metal mapping and pollution source apportionment in Shanghai City soils using auxiliary information [J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 168-177.
- [4] 孙帅,耿柠波,郭崔崔,等. 我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5519-5525.  
Sun S, Geng N B, Guo C C, et al. Accumulation characteristics and dietary exposure estimation of heavy metals in vegetables from the eastern coastal region of China [J]. Environmental science, 2021, 42(11): 5519-5525.
- [5] Wu Q, Hu W Y, Wang H F, et al. Spatial distribution, ecological risk and sources of heavy metals in soils from a typical economic development area, Southeastern China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 780, doi: 10.1016/j.scitotenv. 2021.146557.
- [6] Qin G W, Niu Z D, Yu J D, et al. Soil heavy metal pollution and food safety in China: effects, sources and removing technology [J]. Chemosphere, 2021, 267: 129205.
- [7] 朱亮亮,吴勇,周浪,等. 铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5988-5996.  
Zhu L L, Wu Y, Zhou L, et al. Heavy metal accumulation effect and safe planting zoning of soil and rice in Tongren [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5988-5996.
- [8] 刘文政,李存雄,秦樊鑫,等. 高砷煤矿区土壤重金属污染及潜在的生态风险[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(7): 181-185.  
Liu W Z, Li C X, Qin F X, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk in the soils around a high-arsenic coal mine area [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(7): 181-185.
- [9] 杨金秀,杨爱江,罗贵琴,等. 贵州西部燃煤电厂周边土壤和玉米中砷含量的空间变化特征[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(9): 245-248, 252.  
Yang J X, Yang A J, Luo G Q, et al. Spatial variation characteristics of arsenic content in soils and corns around coal-fired power plant in western Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2014, 42(9): 245-248, 252.
- [10] Rodríguez R, Díaz M B, Vigil H, et al. Development of a user-friendly method to assess the present condition of old abandoned mining waste dumps in Asturias (Spain) [J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2011, 25(1): 6-31.
- [11] 施姜丹,史可欣,黄雨佳,等. 中国大米和蔬菜重金属/类金属污染及其健康风险[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(7): 479-487.

- Shi J D, Shi K X, Huang Y J, *et al.* Heavy metal and metalloid contamination of rice and vegetables and their health risk in China [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2022, **12**(7): 479-487.
- [12] 应兴华, 金连登, 徐霞, 等. 我国稻米质量安全现状及发展对策研究[J]. *农产品质量与安全*, 2010, (6): 40-43.
- Ying X H, Jin L D, Xu X, *et al.* Study on status quo of and development strategies for quality and safety of paddy rice in China [J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2010, (6): 40-43.
- [13] 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.
- [14] 唐鹏, 李义连, 徐佳丽, 等. 王水水浴消解-原子荧光法测定土壤中的砷和汞[J]. *安全与环境工程*, 2019, **26**(4): 50-55.
- Tang P, Li Y L, Xu J L, *et al.* Determination of arsenic and mercury in soil dissolved by aqua regia in water bath digestion-atomic fluorescence spectrometry [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, **26**(4): 50-55.
- [15] 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.
- [16] Wang S Y, Wu W Y, Liu F. Assessment of the human health risks of heavy metals in nine typical areas [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(12): 12311-12323.
- [17] United States Environmental Protection Agency. *Wildlife Exposure Factors Handbook: Volume I of II* [R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 1993.
- [18] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [19] Ahmed M K, Shaheen N, Islam M S, *et al.* Trace elements in two staple cereals (rice and wheat) and associated health risk implications in Bangladesh [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(6): 326.
- [20] 陈静, 王学军, 朱立军. pH对砷在贵州红壤中的吸附的影响[J]. *土壤*, 2004, **36**(2): 211-214.
- Chen J, Wang X J, Zhu L J. Effect of pH on adsorption and transformation of arsenic in red soil in Guizhou [J]. *Soils*, 2004, **36**(2): 211-214.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [22] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, *et al.* Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils [J]. *Chemical Geology*, 2018, **501**: 86-94.
- [23] 黄凤艳, 周浪, 宋波, 等. 贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 415-425.
- Huang F Y, Zhou L, Song B, *et al.* Characteristics and planting safety assessment of As content in dryland soil and maize in Guizhou province [J]. *Environmental science*, 2023, **44**(1): 415-425.
- [24] 孟伟, 何邵麟, 吴攀, 等. 贵州中部土壤砷累积特征及异常富集成因研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, **21**(2): 841-848.
- Meng W, He S L, Wu P, *et al.* Study on the characteristics of arsenic accumulation in cultivated soil and the causes of its abnormal enrichment in central Guizhou Province [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, **21**(2): 841-848.
- [25] 王梅霞, 冯文兰. 土壤砷空间分布特征及其与地理要素的关联分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(9): 106-111.
- Wang M X, Feng W L. Spatial variation of soil arsenic and correlation analysis with geographical factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(9): 106-111.
- [26] 姚冬菊, 刘恩光, 宁增平, 等. 贵州某铋冶炼厂周边农田土壤铋、砷污染与人体健康风险评估[J]. *地球与环境*, 2021, **49**(6): 673-683.
- Yao D J, Liu E G, Ning Z P, *et al.* Contamination and human health risks of Sb and As in farmland soils around a typical antimony smelter in Guizhou, China [J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(6): 673-683.
- [27] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [28] 张富贵, 彭敏, 贺灵, 等. 贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2081-2093.
- Zhang F G, Peng M, He L, *et al.* Sources identification, ecological risk assessment, and controlling factors of potentially toxic elements in typical lead-zinc mine area, Guizhou Province, southwest China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2081-2093.
- [29] 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.
- [30] Oliver M A, Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1990, **4**(3): 313-332.
- [31] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *土壤通报*, 2017, **48**(2): 474-480.
- Zhan T L, Huang Y, Teng Y, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan mining areas, Guizhou Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 474-480.
- [32] 马宏宏, 张利, 郭飞, 等. 贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2856-2867.
- Ma H H, Zhang L, Gou F, *et al.* Ecological risk and migration patterns of heavy metals in soil and crops in the lead-zinc mining area in Guizhou, China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2856-2867.
- [33] 龙健, 张菊梅, 李娟, 等. 铋矿区土壤铋和砷的污染状况及其修复植物的筛选——以贵州独山东峰铋矿区为例[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, **38**(2): 1-9.
- Long J, Zhang J M, Li J, *et al.* The pollution characteristics of antimony, arsenic and its restoration plants of screening in antimony mining area——Take Dushan Dongfeng antimony mine in Guizhou as example [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2020, **38**(2): 1-9.
- [34] 陈静, 王学军, 朱立军. 砷在贵州地区红土表面吸附和解吸的动力学研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(6): 697-699.
- Chen J, Wang X J, Zhu L J. Kinetics of adsorption and desorption of arsenic in red soil in Guizhou area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, **22**(6): 697-699.

- [35] 蔚蓝. 西南地质高背景区土壤-水稻系统重金属富集特征及影响因素[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2022.
- [36] Masscheleyn P H, Delaune R D, Patrick W H. Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(8): 1414-1419.
- [37] 商成梅, 龙胜楼, 欧灵芝, 等. 贵州某煤矿区周边耕地土壤有效态砷提取方法比较[J]. *应用化工*, 2023, **52**(6): 1933-1938.  
Shang C M, Long S L, Ou L Z, *et al.* Comparison of extraction methods of available arsenic from farmland soil around coal mining area in Guizhou [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, **52**(6): 1933-1938.
- [38] 王京, 方维萱, 郑厚义. 贵州省晴隆梯矿区土壤和植物砷污染调查与分析[J]. *矿物学报*, 2011, (S1): 733-734.
- [39] He Y, Men B, Yang X F, *et al.* Relationship between heavy metals and dissolved organic matter released from sediment by bioturbation/bioirrigation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **75**: 216-223.
- [40] 高雪. 土壤砷生物有效性影响因素的研究综述[J]. *西藏农业科技*, 2019, **41**(1): 68-70.  
Gao X. Review on phyto-availability of arsenic in soils [J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2019, **41**(1): 68-70.
- [41] 王北洪, 马智宏, 冯晓元, 等. 北京市蔬菜重金属含量及健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, **6**(7): 2736-2745.  
Wang B H, Ma Z H, Feng X Y, *et al.* Concentrations and health risk evaluation of heavy metals in vegetables in Beijing [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, **6**(7): 2736-2745.
- [42] 盛昕, 顿梦杰, 肖乃川, 等. 不同品种油菜在镉严格管控类耕地的安全利用探索[J]. *环境工程学报*, 2021, **15**(8): 2711-2720.  
Sheng X, Dun M J, Xiao N C, *et al.* exploration on safe utilization of different varieties of oil sunflowers in cultivated land with strict cadmium control [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, **15**(8): 2711-2720.
- [43] Spanu A, Langasco I, Serra M, *et al.* Sprinkler irrigation in the production of safe rice by soils heavily polluted by arsenic and cadmium [J]. *Chemosphere*, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130351.
- [44] 安礼航, 刘敏超, 张建强, 等. 土壤中砷的来源及迁移释放影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2020, **52**(2): 234-246.  
An L H, Liu M C, Zhang J Q, *et al.* Sources of arsenic in soil and affecting factors of migration and release: a review [J]. *Soils*, 2020, **52**(2): 234-246.
- [45] Douay F, Roussel H, Fourrier H, *et al.* Investigation of heavy metal concentrations on urban soils, dust and vegetables nearby a former smelter site in Mortagne du Nord, Northern France [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, **7**(3): 143-146.
- [46] Fu Y R, Chen M L, Bi X Y, *et al.* Occurrence of arsenic in brown rice and its relationship to soil properties from Hainan Island, China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(7): 1757-1762.
- [47] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 等. 贵州丹寨废弃矿区典型农作物中汞、砷含量的分布特征及差异分析[J]. *地球与环境*, 2021, **49**(2): 172-179.  
Zhu D N, Zou S Z, Zhou C S, *et al.* Distribution and difference of mercury and arsenic in typical crops of an abandoned mining area in Danzhai, Guizhou Province of China [J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(2): 172-179.
- [48] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 84-91.
- [49] Seyferth A L, Mccurdy S, Schaefer M V, *et al.* Arsenic concentrations in paddy soil and rice and health implications for major rice-growing regions of Cambodia [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(9): 4699-4706.
- [50] 陈同斌, 刘更另. 土壤中砷的吸附和砷对水稻的毒害效应与 pH 值的关系[J]. *中国农业科学*, 1993, (1): 63-68.  
Chen T B, Liu G L. Effects of soil pH on arsenic adsorption in soil and its toxicity to rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1993, (1): 63-68.
- [51] Krishnamurti G S R, Huang P M, Kozak L M. Sorption and desorption kinetics of cadmium from soils: influence of phosphate [J]. *Soil Science*, 1999, **164**(12): 888-898.
- [52] Alamgir M. The effects of soil properties to the extent of soil contamination with metals[A]. In: Hasegawa H, Rahman I M M, Rahman M A (Eds.). *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils*[M]. Tokyo: Springer, 2016. 1-19.
- [53] Sungur A, Soylak M, Yilmaz E, *et al.* Characterization of heavy metal fractions in agricultural soils by sequential extraction procedure: the relationship between soil properties and heavy metal fractions [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2015, **24**(1): 1-15.
- [54] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 2014-2021.  
Yang G, Shen F, Zhong G J, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- [55] Li X Y, Li Z G, Lin C J, *et al.* Health risks of heavy metal exposure through vegetable consumption near a large-scale Pb/Zn smelter in central China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **161**: 99-110.
- [56] 曾希柏, 苏世鸣, 吴翠霞, 等. 农田土壤中砷的来源及调控研究与展望[J]. *中国农业科技导报*, 2014, **16**(2): 85-91.  
Zeng X B, Su S M, Wu C X, *et al.* Research and prospect of arsenic source and its regulation in arable land soil [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, **16**(2): 85-91.

## CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China .....	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle .....	REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO <sub>2</sub> Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan .....	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province .....	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study .....	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou .....	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM <sub>2.5</sub> Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River .....	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains .....	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Carbon Components in Tianjin .....	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> in Huaxi District, Guiyang .....	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Xinxiang, North China .....	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018 .....	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing .....	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer .....	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation .....	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River .....	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model .....	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing .....	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin .....	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City .....	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xinyang Section) .....	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia .....	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province .....	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake .....	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years .....	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example .....	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin .....	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes .....	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process .....	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water .....	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System .....	HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index .....	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI .....	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River .....	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis .....	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon .....	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil .....	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages .....	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River .....	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field .....	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China .....	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland .....	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model .....	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi .....	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model .....	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province .....	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil .....	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province .....	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice .....	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor .....	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland .....	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis .....	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis .....	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms .....	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River .....	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish ( <i>Danio rerio</i> ) Embryos .....	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)