

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

贵州省水田土壤-水稻 Hg 含量特征与安全种植区划

韦美溜¹, 周浪¹, 黄燕玲¹, 庞瑞¹, 王佛鹏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. 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: 贵州省 Hg 储量和产量均居全国第一, 水稻是其第一大粮食作物. 为研究贵州省级尺度上土壤-水稻 Hg 含量特征与污染成因, 并进行安全种植区划, 采集土壤-水稻成对样品 1 564 组, 自然土样 470 个, 水田土样 203 个, 测试其 Hg 含量和土壤基本理化性质. 结果表明: ① 水田土壤 pH 呈中性偏酸为主, 水田土壤 $\omega(\text{Hg})$ 范围为 0.005 ~ 93.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何平均值为 0.864 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于自然土壤 (0.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.05$); 与筛选值和管制值比较, 土壤样品超标率分别为 63.25% 和 14.71%; 就区域性而言, 黔东南州的丹寨县、遵义市的务川县、黔西南州的贞丰县和铜仁市的万山区土壤 Hg 污染较为突出; ② 水稻 $\omega(\text{Hg})$ 范围为 0.000 5 ~ 0.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 几何均值为 0.010 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 水稻 Hg 含量超标率为 25.87%, 超标点位主要分布于遵义市的绥阳县、黔西南州的贞丰县、安顺市的西秀区和铜仁市的碧江区等工矿业活动密集区; ③ 研究区绝大部分为优先保护类 (占比为 74.75%), 安全利用类 (占比为 24.62%), 严格管控类 (占比为 0.93%) 零星分布在黔南州和黔东南州交界的丹寨县, 黔西南州的贞丰县和铜仁市的万山地区, 不建议种植水稻, 稻米可作为饲料再生产.

关键词: 贵州省; 汞 (Hg); 水田土壤; 水稻; 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(2024)05-3005-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202305023

Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province

WEI Mei-liu¹, ZHOU Lang¹, HUANG Yan-ling¹, PANG Rui¹, WANG Fo-peng¹, SONG Bo^{1,2,*}

(1. College of Environment 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: Guizhou Province ranks first in terms of Hg reserves and production in the country, and rice is its largest grain crop. In order to study the characteristics and pollution causes of soil-rice Hg content at the provincial level in Guizhou and to carry out safe planting zoning, 1 564 pairs of soil-rice samples, 470 natural soil samples, and 203 individual paddy soil samples were collected to test their Hg content and basic physical and chemical properties of the soil. The results showed that: ① Paddy soil was mainly neutral and acidic, the paddy soil $\omega(\text{Hg})$ range was 0.005-93.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the geometric mean was 0.864 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The Hg content of paddy soil in Guizhou Province was significantly higher than that in natural soil (0.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $P < 0.05$). Compared with the filtered value and control value, the soil samples exceeded the standard by 63.25% and 14.71%, respectively. Among them, the soil Hg pollution in Danzhai County of Qiandongnan Prefecture, Wuchuan County of Zunyi City, Zhenfeng County of Qianxinan Prefecture, and Wanshan District of Tongren City was more prominent. ② Rice $\omega(\text{Hg})$ ranged from 0.000 5 to 0.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the geometric mean was 0.010 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the percentage of rice Hg content exceeding the standard was 25.87%, and the exceeding points were mainly distributed in Suiyang County of Zunyi City, Zhenfeng County of Qianxinan Prefecture, Xixiu District of Anshun City, Bijiang District of Tongren City, and other industrial and mining activity-intensive areas. ③ The majority of the study area was in the priority protection category (74.75%); the safe use category accounted for (24.62%); and the strictly controlled category (0.93%) was scattered in Danzhai County at the border between Qiannan Prefecture and Qiandongnan Prefecture, Zhenfeng County in Qianxinan Prefecture, and Wanshan District in Tongren. It is not recommended to plant rice, which can be used as feed for reproduction.

Key words: Guizhou Province; Hg; paddy field soil; rice; safe planting zoning

随着工业生产、人类活动的加剧, 汞 (Hg) 及其化合物的用途和需求量越来越多, 生产量剧增^[1], 广泛用于医药、化学、电器仪器 and 精密高科技等领域^[2,3]. 自然源和人为源产生的 Hg 经复杂的迁移转化严重污染环境^[4-6], 进而危害人体健康^[6-8]; Hg 因其剧毒性、生物累积性和作用机制复杂性^[9], 已被列为世界上最严重的十大污染源之一. 贵州省 Hg 矿开采和冶炼活动历史悠久, 含有大量矿床, 是我国典型汞矿活动区, 矿业活动产生含 Hg 的“三废”, 带来周边农田土壤重金属污染问题.

已有研究表明, 贵州省矿区周边土壤、水体和大气均受不同程度 Hg 污染且土壤中 Hg 含量远超出

贵州省和全国土壤背景值^[10-12]; 有研究表明 Hg 矿区周边的大米 [138 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Hg})$, 下同]、蔬菜 (182.33 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和猪肉 (216 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 超出食品安全范围 (蔬菜 10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、糙米 20 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、肉类 50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[13]; 居民人体血液 $\rho(\text{Hg})$ 最高可达 54.26 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 有 21.5% 血液样本 Hg 浓度超过人体血液 Hg 安全限值 (5.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[14]. 据贵州省宏观经济数据库

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-07-22

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: 韦美溜 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复及其评价, E-mail: 1326576742@qq.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

显示^[15], 2020年贵州省水稻播种面积达66.51万 hm^2 , 产量为415.98万t, 占当年粮食作物产量的39.33%, 作为贵州省第一大粮食作物, 其安全生产性和食用安全性需引起高度重视。

有学者研究了贵州省部分矿区周边区域土壤和农作物Hg含量特征分布^[16~22], 对贵州省级尺度的水田土壤Hg污染状况及水稻含量特征调查均具有重要意义。本文以贵州省水田土壤和水稻为研究对象, 分析土壤基本理化性质(pH、土壤阳离子交换量、土壤有机质)和土壤全量和有效态Hg、水稻籽粒Hg含量, 使用地累积污染指数法和单因子污染指数法进行土壤Hg污染评价, 水稻用单因子污染指数法评价。最后, 基于土壤-水稻重金属的含量进行安全种植区划, 以期为农田土壤污染防治工作、安全种植等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

贵州省地处我国西南部, 地理范围为 $103^{\circ}36' \sim 109^{\circ}35' \text{E}$, $24^{\circ}37' \sim 29^{\circ}13' \text{N}$, 总面积约为17.2万 km^2 , 地势西高东低, 自中部向北、东和南三面倾斜。贵州省矿产资源丰富, 土壤类型多, 地质构造上主要由石灰岩和白云岩组成, 广泛发育着世界五大造型地貌之一的喀斯特地貌, 气候上属于亚热带

季风性湿润气候, 冬暖夏凉, 年均气温 $10 \sim 18^{\circ}\text{C}$, 年均降水量在1000~1500 mm, 适宜种植粮食作物。

1.2 样品采集与前处理

样品采集时间为2018年7~9月, 采集自然土壤样品470个, 水田土壤样品203个, 土壤-水稻成对样品1564组(图1)。土壤样品的抽样布点主要参照贵州省水田分布状况, 尽量使样点在整个区域均匀分布; 在有色金属矿业、工业密集区和农业活动相对频繁的耕地进行加密采样。自然土壤样品分布于受人类活动影响较小的山地或草地, 去除表层10 cm枯枝落叶和腐殖质层, 取10~30 cm土层, 以避免大气沉降等人类活动的影响; 水田土壤采样点远离局地污染源和田埂, 采集去除表面附着物0~20 cm的耕作层土壤, 每块采集单元采用梅花形布点法由5个子样等量混合而成, 留下1~2 kg装入布袋中; 水稻样品的采集据成熟情况, 与土样同步采集, 避免采集到空穗和受病虫害影响的样本。记录周边基本地貌特征和GPS定点位置、海拔和土壤基本颜色、结构和质地。土壤样品在室内自然风干, 剔除石块和植物根系等杂物后研磨过0.149 mm孔径筛, 将样品装于信封袋待分析。水稻样品自然晾干, 脱粒, 用不锈钢打磨机粉碎后装袋待测。

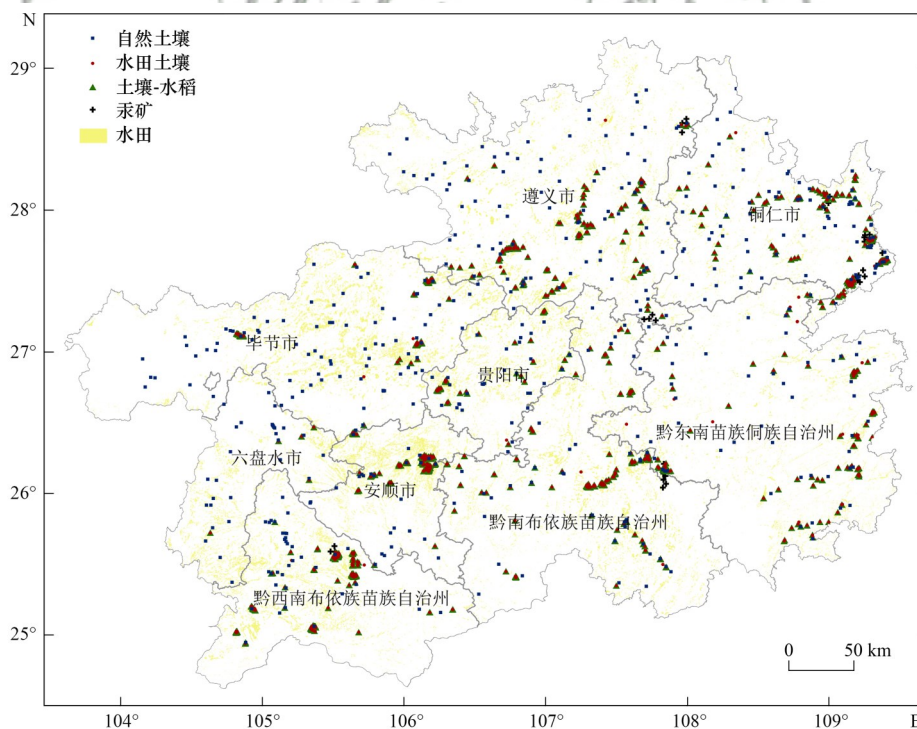


图1 研究区域概况示意

Fig. 1 Overview of the study area

1.3 样品分析方法

土壤pH值的测定依据pH电位测定法(NY/T

1121.2-2006); 土壤有机质(SOM)采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定(NY/T 1121.2-2006); 土壤阳离子

交换量(CEC)采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法(HJ 889-2017)测定;土壤和水稻 Hg 含量的测定采用硝酸-盐酸(1:1)进行水浴消解,土壤有效态 Hg 采用 0.1 mol·L⁻¹ 的盐酸浸提,用原子荧光形态分析仪(AFS-9700)测定.分析过程中加入石灰岩土壤标准物质(GSS-4)、土壤形态成分标准物质(GSF-4)和大米标准物质(GBW 100357)进行质量控制,样品分析重复率为 10%,相对误差在±5%以内.标准物质中 Hg 的回收率为 88%~106%,实验中所有试剂为优级纯,实验用水为超纯水,所有玻璃器皿均在 10%的硝酸中浸泡 24 h 以上.

1.4 数据处理

数据采用 SPSS 27.0 分析,用软件 Origin 2021 和 ArcGIS 10.7 作图.

1.5 评价方法

(1)水田土壤采用地累积指数评价法,公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (1.5 \times S_i)] \tag{1}$$

式中, I_{geo} 表示地累积指数, C_i 表示土壤中元素的实测值, S_i 表示土壤中元素的背景值,该值为本研究土壤背景值 0.164 mg·kg⁻¹,常数 1.5 为重金属含量自然波动的校正系数.地累积指数分级标准依次分为:<0、0~1、1~2、2~3、3~4、4~5 和 >5.

(2)水稻 Hg 和土壤 Hg 高密度区分析、安全种植区划污染评价,采用单因子污染指数法进行评价,公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \tag{2}$$

式中, P_i 表示土壤或水稻 Hg 的单因子污染指数; C_i 为土壤或水稻 Hg 的实测含量,mg·kg⁻¹; S_i 表示 Hg 的评价标准值,mg·kg⁻¹,土壤采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(试行)(GB 15618-2018)中规定的土壤污染风险筛选值;水稻采用《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的食物污染物限量值 0.02 mg·kg⁻¹,单因子污染指数划分为 3 级: $P_i \leq 1$ 、 $1 < P_i \leq 2$ 和 $P_i > 2$.

(3)区划方法

Hg 安全区划分析赋值规则为:水稻 Hg 的单因子污染指数 $P_i \leq 1$ 、 $1 < P_i \leq 2$ 和 $P_i > 2$ 分别赋值为 0、1 和 2;土壤中 Hg 超稻田土壤风险筛选值和风险管制值分别赋值为 1 和 2,土壤 Hg 未超稻田土壤风险筛选值赋值为 0.通过叠加各点赋值,其中定义赋值 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.

优先保护类主要包含:土壤 Hg 含量低于筛选值且作物不超标、土壤 Hg 含量超过筛选值但低于管制值且作物不超标、土壤 Hg 低于筛选值且作物超标($1 < P_i \leq 2$);安全利用类主要包括:土壤 Hg 含量低于筛选值且作物超标($P_i > 2$)、土壤 Hg 含量超过风险筛选值但不超管制值且作物超标($1 < P_i \leq 2$)、土壤 Hg 含量超过风险管制值且作物不超标;严格管控类主要包括:土壤 Hg 含量超过风险筛选值但不超管制值且作物超标($P_i > 2$)、土壤 Hg 含量超过风险管制值且作物超标^[14].

2 结果与分析

2.1 背景土壤 Hg 含量特征分析

背景土壤样品 Hg 含量经对数转换后符合正态分布,用几何平均值和几何标准差来表示其大小与数据集中趋势(表 1).经单样本 T 检验,贵州省自然土壤 Hg 含量显著高于“七五”期间 A 层和 C 层土壤背景^[23]($P < 0.01$),可能与土壤类型、成土母质和地质结构复杂等因素有关^[24],95% 以上高分位值主要集中在遵义的务川县、铜仁市的松桃县、碧江区和黔西南布依族苗族自治州(黔西南州,下同)的贞丰县,变异系数范围为 72.56%~200.7%,属于高变异水平,说明区域分异程度显著,由于研究区域地理分布广、成土母质复杂^[25、26]以及人为污染^[27]等均可能导致贵州省背景土壤 Hg 含量整体上变异系数高.本次研究的背景土壤区是受人类活动影响小的林地、山地、远离矿区等地,样点分布均匀广泛,具有代表性,其 $\omega(\text{Hg})$ 几何平均值 0.16 mg·kg⁻¹ 可作为贵州省表层土壤 Hg 含量背景值.

表 1 背景土壤 Hg 含量统计¹⁾

Table1 Statistics of Hg in natural soil

地区	样品数 /个	范围 /mg·kg ⁻¹	算术平均值±标 准差/mg·kg ⁻¹	几何平均值 (标准差) /mg·kg ⁻¹	95%分位值 /mg·kg ⁻¹	95% 置信度
贵州省	470	0.003 ~ 5.17	0.27±0.35	0.16(2.69)	0.84	0.08 ~ 0.95
中国土壤背景值(A层)	50	0.001 ~ 0.30	0.11±0.07	0.08(2.25)	0.28	—
中国土壤背景值(C层)	38	0.020 ~ 0.95	0.19±0.21	0.12(2.50)	0.63	—
差异/%	—	—	-1.48	-0.94	—	—

1)差异=(中国土壤元素背景值-本研究的数值)/中国土壤元素背景值×100%;“—”表示无数据

2.2 土壤基本理化性质分析

土壤 pH 值符合正态分布, SOM、CEC 符合对数正态分布, 以几何平均值表征其大小(图 2). 水田土壤 pH 值范围在 3.37~8.46, 平均值为 6.68, 变异系数为 12.50%, 属于弱变异水平, 与同区域田茂苑^[28]研究的范围(3.32~8.40)相近, 整体以中度偏酸性为主, 其中黔东南苗族侗族自治州(黔东南州, 下同)和黔南布依族苗族自治州(黔南州, 下同)呈现较强酸性, 黔西南州呈较强碱性, 贵阳市呈中性偏碱, 研究区水田土壤 pH 值可能受土壤脱硅富铝、风化淋溶、土壤施肥等影响导致其酸化^[29]. $\omega(\text{SOM})$ 范围为 3.51~203.84 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 43.60 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其变

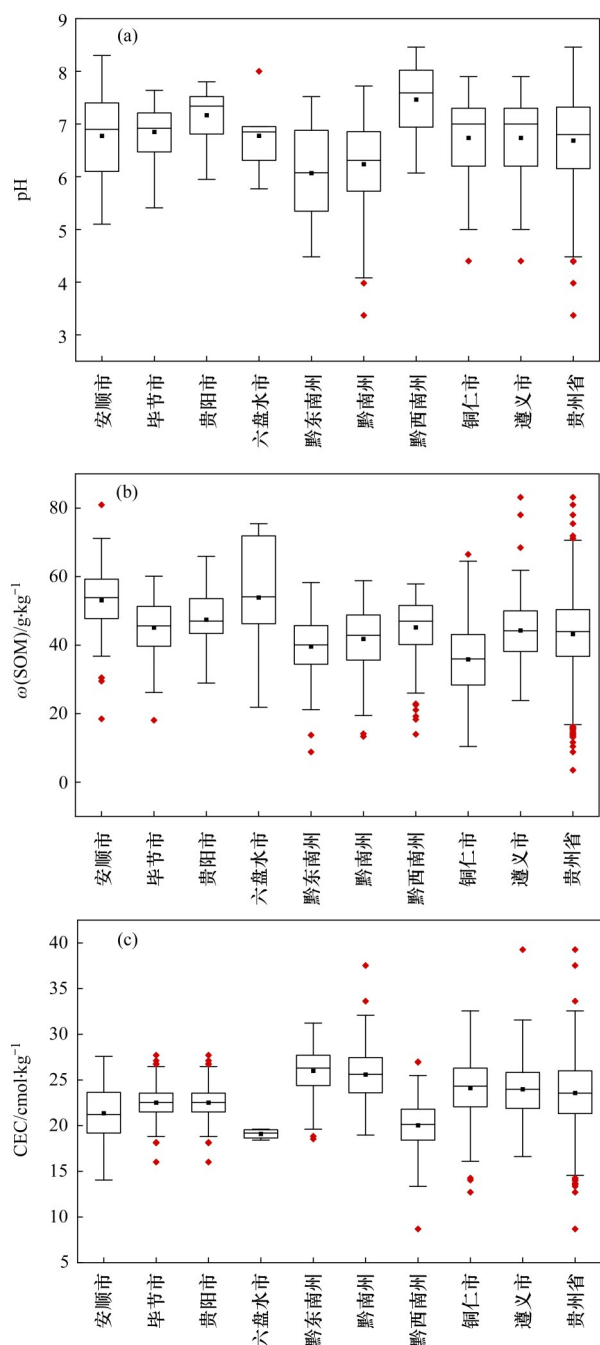


图2 土壤基本理化性质

Fig. 2 Basic properties of the soil

异系数为 42.29%, 属于中等变异强度, 有 64.26% 的土壤 $\omega(\text{SOM})$ 大于 40.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有 25.58% 的土壤 $\omega(\text{SOM})$ 介于 30~40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根据全国第二次土壤普查耕作层有机质含量分级, 贵州省土壤有机质含量总体属中等偏上水平, 说明土壤肥沃^[30]. CEC 范围为 8.69~39.27 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 23.58 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中强保肥土壤($\text{CEC} > 20 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤占 86.40%, 变异系数为 14.22%, 属于弱变异水平.

2.3 土壤 Hg 含量特征分析

对研究区土壤原始数据进行 Grubbs 检验, 剔除异常值. 经检验, 研究区域土壤 Hg 含量(表 2)符合对数正态分布, 用几何平均值表征其含量. 贵州省水田土壤样品 $\omega(\text{Hg})$ 范围为 0.005~93.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 0.864 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤有效态 $\omega(\text{Hg})$ 范围为 0.000 1~0.039 3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 0.003 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 经独立样本 T 检验, 水田土壤 Hg 含量显著高于自然土壤($P < 0.05$), 表明水田土壤存在 Hg 累积效应. 变异系数范围 60.1%~224.1%, 达到强变异水平. 贵州省各地区土壤 Hg 含量差距较大, 土壤 Hg 含量可能与播种方式、播种时间、耕地类型和种植户施肥情况等有关, 最主要是受到矿区资源开发、工业发展的影响, 经过复杂迁移转化, 使研究区土壤积累 Hg, 其中, 遵义市的北部和南部, 铜仁市的东南部和东北部, 黔东南州与黔南州的交界处以及黔西南州的东部含有典型汞矿.

贵州省水田土壤样品中有 63.25% 超过风险筛选值, 14.71% 土壤样品超过风险管制值; 各地区受到不同程度 Hg 污染, 可能存在农产品质量安全、生态、人体健康风险, 需警惕土壤环境质量和农产品安全.

2.4 土壤污染评价与空间分布

据式(1)计算土壤地累积污染指数 I_{geo} , 研究区 1 747 个土壤样点 Hg 的 I_{geo} 范围为 -5.62~12.01. 通过 ArcGIS 克里格进行插值, 分析水田土壤 Hg 地累积污染指数空间分布和 Hg 含量等级分布(图 3). 空间结构半变异函数中, 块金值(C_0)表示一种非采样点间距造成的变异属随机变异, 反映了人为污染等随机因素引起的空间变异, 基台值($C_1 + C_0$)表示在不同采样间距中存在的半方差极大值, 反映了自然因素(如成土母质、地形等)和社会经济因素(如施肥、种植制度等)共同引起的空间变异, 其由随机性变异和结构性变异构成. 块金值(C_0)与基台值($C_1 + C_0$)之比是反映区域化变量空间变异程度的重要指标, 又称为块金效应, 该比值用以反映空间变异影响因素中结构性(自然因素)和随机性因素(人为因素)谁占主导作用^[31]. 当 $C_0/(C_1 + C_0) < 25\%$ 时, 表明变量的

表 2 水田土壤 Hg 含量统计
Table 2 Statistics of Hg in paddy soil

地区	样品数 /个	范围 /mg·kg ⁻¹	算术平均值±标准差 /mg·kg ⁻¹	几何平均值(标准差) /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%	基于筛选值的 超标率/%	基于管制值的 超标率/%
安顺市	194	0.005~2.045	0.248±0.312	0.102(4.505)	126.3	9.79	0.00
毕节市	143	0.169~2.926	0.643±0.386	0.552(1.737)	60.06	39.86	0.70
贵阳市	75	0.005~17.40	1.396 ±0.071	0.977(2.404)	148.4	81.33	6.67
六盘水市	5	0.000 5~1.203	0.744 ±0.458	0.500(3.678)	61.56	60.00	0.00
黔东南州	191	0.055~93.06	10.16 ±20.15	2.470(4.911)	197.8	92.67	34.03
黔南州	346	0.226~5.977	0.888 ±0.673	0.742(1.767)	75.73	71.10	2.60
黔西南州	213	0.040~60.22	2.371±5.313	0.865(4.122)	224.1	44.16	17.37
铜仁市	286	0.055~55.40	3.395±7.319	0.878(4.744)	217.7	51.05	18.18
遵义市	294	0.829~37.62	3.393 ±3.643	2.713(1.794)	107.4	100.0	39.93
总计	1 747	0.005~93.06	4.581±15.54	0.864(4.432)	287.6	63.25	14.71

空间变异以结构性变异为主，变量具有强烈的空间相关性，受人为因素影响较小；当 $25\% \leq C_0 / (C_1 + C_0) \leq 75\%$ 时，表明变量具有中等程度的空间相关性；当 $C_0 / (C_1 + C_0) > 75\%$ 时，表示变量以随机性变异为主，变量的空间相关性很弱，受人为因素影响较大^[32]。通过综合比较，选用球面函数模型， C_0 为 1.12， $(C_1 + C_0)$ 为 3.41，则 $C_0 / (C_1 + C_0)$ 为 32.84%，说明空间相关性中等，同时受自然因素与人为因素影响。其中，黔东南州的丹寨县、从江县，黔西南州的贞丰县，遵义市的务川县、红花岗区和铜仁市的碧江区土壤 Hg 污染较为突出，由此可推测 Hg 污染与矿业活动有直接联系，以贵阳市为中心，贵州省的北部和东南部比西部和西南部 Hg 污染更严重，其余地区均有零星分布。

2.5 水稻 Hg 含量特征与污染评价

水稻重金属 Hg 统计分析结果见表 3，数据经对数转换后均符合正态分布，以几何均值表征水稻 Hg 含量大小。各地区均值均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中限量标准值 ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)，超标率为 25.87%，与《饲料卫生标准》(GB 13078-2017)中 Hg 限量标准 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相比，超标率为 1.45%，安顺市、毕节市、黔东南州、黔南州、黔西南州、铜仁市和遵义市超标点数分别为 3 个、2 个、4 个、5 个、3 个、4 个和 5 个，超标点数大多集中在工矿业活动密集区。

将水稻 Hg 含量进行等级划分[图 4(a)]，水稻 $\omega(\text{Hg}) \leq 0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占比 74.13%， $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < \omega(\text{Hg}) \leq 0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 在各地区均有零星分布， $\omega(\text{Hg}) > 0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 主要集中在遵义市的绥阳县、黔南州的都匀市，黔东南州的丹寨县，铜仁市的松桃县。据式(1)计算水稻单因子污染指数[图 4(b)]， P_i 范围为 0.03~25.95，其中 $P_i \leq 1$ 占 74.13%， $1 < P_i \leq 2$ 占比 16.84%， $P_i > 2$ 占比 9.03%，但是遵义市

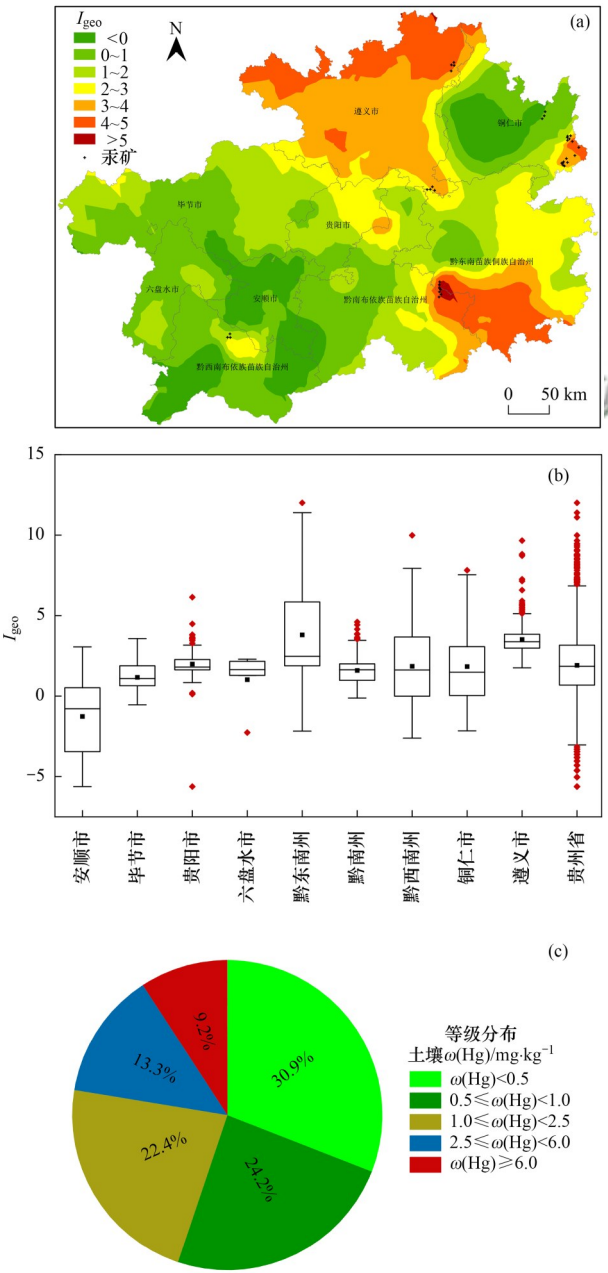


图 3 水田土壤 Hg 地累积污染指数和含量分布
Fig. 3 Accumulative pollution index and content distribution of Hg in paddy soil

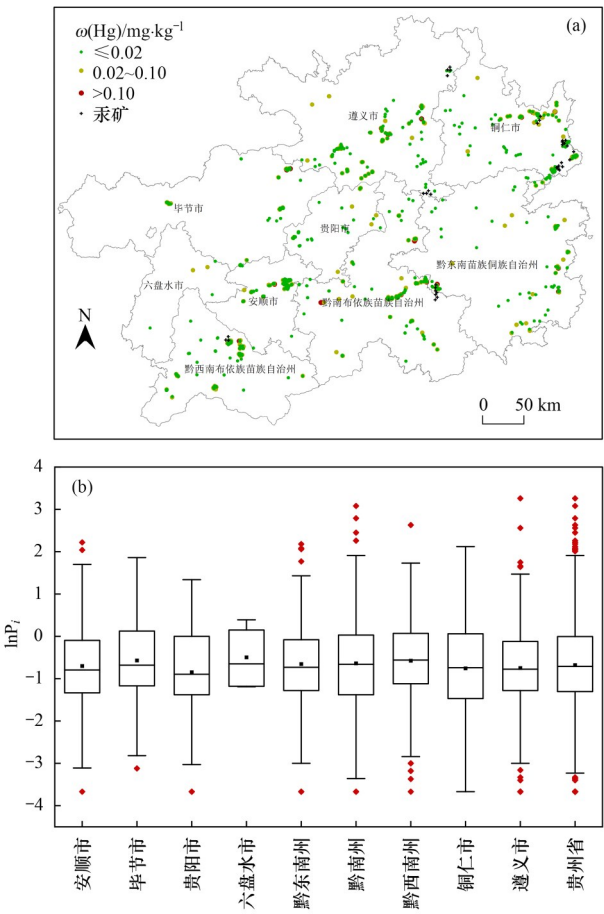


图4 水稻 Hg 含量和单因子污染指数分布
Fig. 4 Hg content and single factor pollution exponential distribution in rice

的绥阳县和凤冈县，黔南州的都匀市、福泉县和惠水县，黔西南州的贞丰县，安顺市的西秀区和镇宁县，毕节市的金沙县和赫章县，贵阳市的开阳县和花溪区，黔东南州的黎平县、丹寨县和从江县，铜仁市的松桃县和碧江区存在部分点位 P_i 远大于 3，需高度重视。土壤和水稻 Hg 含量均超标集中在遵义市的丹寨县、怀仁市和红花岗区，铜仁市的碧江区，贵阳市的开阳县和黔西南州的都匀市和锦屏县；土壤和水稻 Hg 含量均不超标主要分布在安顺市

的西秀区，毕节市的赫章县和黔西县，贵阳市的清镇市，黔东南州的黎平县和施秉县，黔南州的都匀市和罗甸县，铜仁市的玉屏县和松桃县；在矿业活动密集区，如铜仁市的万山 Hg 矿、黔东南的丹寨汞矿、遵义市锰矿和黔西南兴义煤矿，水稻 Hg 含量较高，可推测矿业活动对水稻 Hg 的积累影响大；土壤 Hg 含量与水稻超标的情况并未表现出明显一致性，可能与农户播种方式、耕地方式、大气沉降和地质背景等原因有关。

2.6 Hg 高密度区分析

为更精确揭示贵州省 Hg 含量高密度区，对 703 个土壤 Hg 的 $P_i > 2$ 土壤和 390 个水稻 $\omega(\text{Hg}) \geq 0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 进行分析(图 5)。土壤和水稻 Hg 含量经对数转换后服从正态分布，用几何均值表征其大小，水田土壤样品 $\omega(\text{Hg})$ 范围为 $0.005 \sim 93.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $0.864 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但是异常高值的存在却不容忽视。其中， $\omega(\text{Hg}) > 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 主要集中在图 5 的 A 号框和 B 号框，最高可达 $1\,012 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，该地区地处矿区周边，属于低山岩溶地貌且成土母岩多以碳酸岩发育，遵义的德江-湄潭-开阳低山丘地区成土母岩多以碳酸岩为主，也存在区域 Hg 元素地球化学异常。有研究指出^[33]，贵州省土壤类型较多，从亚热带的红壤到暖温带的棕壤都有分布，其中，黄壤分布面积最多，占比 46.4%，同时境内还广泛发育石灰土和紫色土等岩性土，占比 17.50%，另有占比 9.74% 的水稻土在全省也零星分布；与农业生产紧密关联的耕地土壤资源以山坡可耕地为主，占 47.36%；综合条件优越的坝地(山沟打坝，拦住从山上冲刷的泥土而淤成的农田)土壤面积较小，仅占耕地总面积的 11.96%。由图 5 可知，土壤和水稻的 Hg 高度集中，在黄壤、石灰土、水稻土和红壤均有分布，其中在水稻土区域最为明显，黄壤次之；陈清霞等^[25]将贵州省高程划为 4 个等级，147 ~ 900 m 占比 35.98%，900 ~ 1 400 m 占比 14.79%，1 400 ~

表3 水稻 Hg 含量统计

Table 3 Statistics of Hg content in rice

地区	样品数/个	范围/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	超标率/%	算术均值±标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	几何均值(标准差) / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数/%
安顺市	164	0.000 5 ~ 0.184	21.34	0.017±0.025	0.010(2.77)	143.5
毕节市	128	0.000 5 ~ 0.128	28.13	0.019±0.024	0.011(2.83)	121.0
贵阳市	70	0.000 5 ~ 0.077	21.43	0.015±0.016	0.009(3.08)	1 082
六盘水市	5	0.006 1 ~ 0.029	40.00	0.015±0.011	0.012(2.08)	70.77
黔东南州	183	0.000 5 ~ 0.178	22.40	0.017±0.025	0.010(2.76)	142.7
黔南州	305	0.000 5 ~ 0.453	24.92	0.020±0.038	0.011(2.91)	190.3
黔西南州	187	0.000 5 ~ 0.277	26.74	0.019±0.027	0.011(2.81)	141.6
铜仁市	264	0.000 5 ~ 0.166	25.00	0.017±0.021	0.010(2.99)	124.9
遵义市	258	0.000 5 ~ 0.519	22.87	0.018±0.039	0.009(2.93)	216.9
总计	1 564	0.000 5 ~ 0.519	25.87	0.018±0.025	0.010(2.78)	139.9

1 900 m 占比 14.79%, 1 900 ~ 2 890 m 占比 6.47%, 贵州省呈现由西北向东南逐渐递减的规律, 结合图 5, 得出土壤 Hg 和水稻 Hg 高密度区主要分布在 147 ~ 900 m 区域; 贵州省矿业活动密集, 如铜仁市的万山汞矿、黔东南的丹寨汞矿、遵义市锰矿和黔西南兴义煤矿等, 高含量的土壤 Hg 和水稻 Hg 高度集中

在矿区周围, 且与汞矿距离越小分布越密集, 可见, 土壤 Hg 和水稻 Hg 累积与矿业活动直接相关; 也有部分点位受矿业活动影响较小, 但土壤 Hg 和水稻 Hg 含量高, 如图 5 的 C 号框土壤 $\omega(\text{Hg})$ 高达 $199.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 图 5 的 D 号框水稻 $\omega(\text{Hg})$ 高达 $0.519 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可能与成土母质有关, 具体原因有待研究.

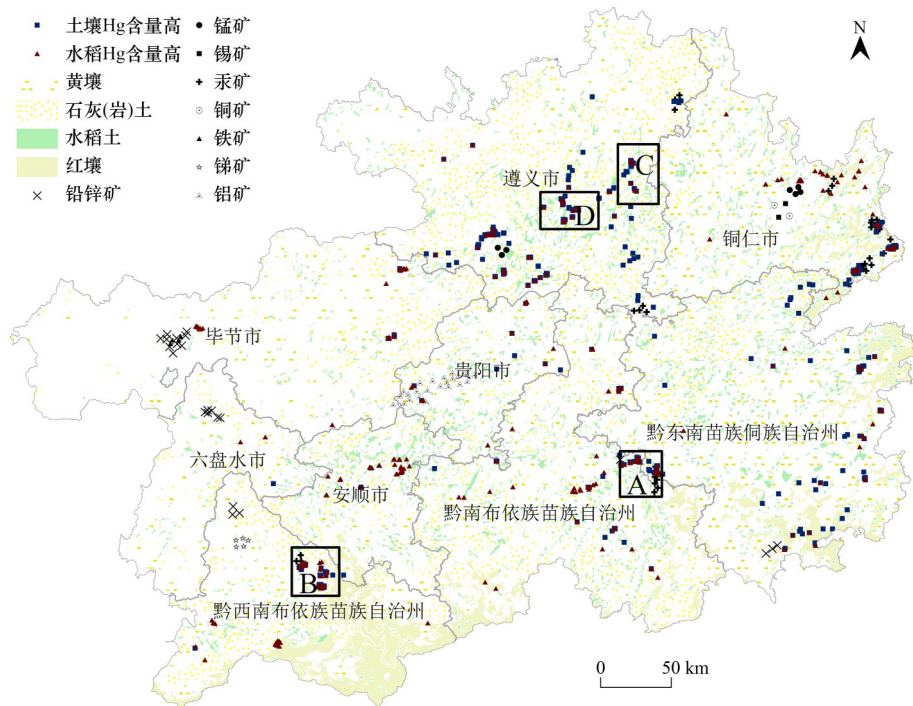


图 5 高密度 Hg 含量分析
Fig. 5 Concentration of Hg in density area

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水田重金属风险筛选值和管控制、食品中污染物限量, 基于《农用地土壤环境质量类别划分技术指南》分别对土壤 Hg 含量[图 6(a)]和水稻 Hg 含量[图 6(b)]给出了优先保护类、安全利用类和严格管控类这 3 类参考. 就本研究而言, 由图 6(a)可知, 在方框 A、B 和 C 区域, 采样点较少, 划分为严格管控类具有一定局限性, 水稻 Hg[图 6(b)]质量分类主要是优先保护类, 安全利用类零星分布在遵义市和黔西南州等地; 通过对土壤环境质量初步评价, 而后通过农产品安全性评价辅助判定, 可以更精确地对大面积水田土壤进行区划管控, 从而得出更可靠的种植区划. 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水稻重金属含量超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, 通过分析 Hg 控制下的水稻安全种植评估赋值和综合污染风险[图 6(c)]. 通过 ArcGIS 中克里格插值, 选用球面函数模型, C_0 为 0.44, (C_1+C_0) 为 2.73, 则 $C_0/(C_1+C_0)$ 为 16.11%,

说明空间相关性强, 变异以结构性变异为主, 受人为因素影响较小. 由图 6 可知, 贵州省绝大部分区域为优先保护类, 面积占比为 74.45%, 安全利用类占比为 24.62%, 严格管控类面积占比最小, 仅为 0.93%, 零星分布在黔南州和黔东南州交界的丹寨县, 黔西南州的贞丰县和铜仁市的万山等地区.

3 讨论

贵州省是我国重要资源大省, 自然条件复杂, 矿产资源丰富, 其中汞矿储量和产量均居全国第一, 被誉为“中国汞都”. 稻米作为贵州省第一大粮食作物, 已有研究证实水稻能富集毒性最强的甲基 Hg 以及矿区居民暴露甲基 Hg^[34]的主要途径是通过食用大米^[20,35]. 环境 Hg 来源复杂^[36,37], 有自然源和人为源, 自然源是经复杂的火山和地热活动、水体释放、表层土壤和沉积物的释放等, 最终主要进入大气环境, 每年全球自然释放到大气环境中的 Hg 量约为 1 800 ~ 5 800 t^[38~41], 人类活动排放到环境中的途径主要有化石燃料的燃烧、垃圾的焚烧、金属冶炼、采矿炼油和氯碱制造等.

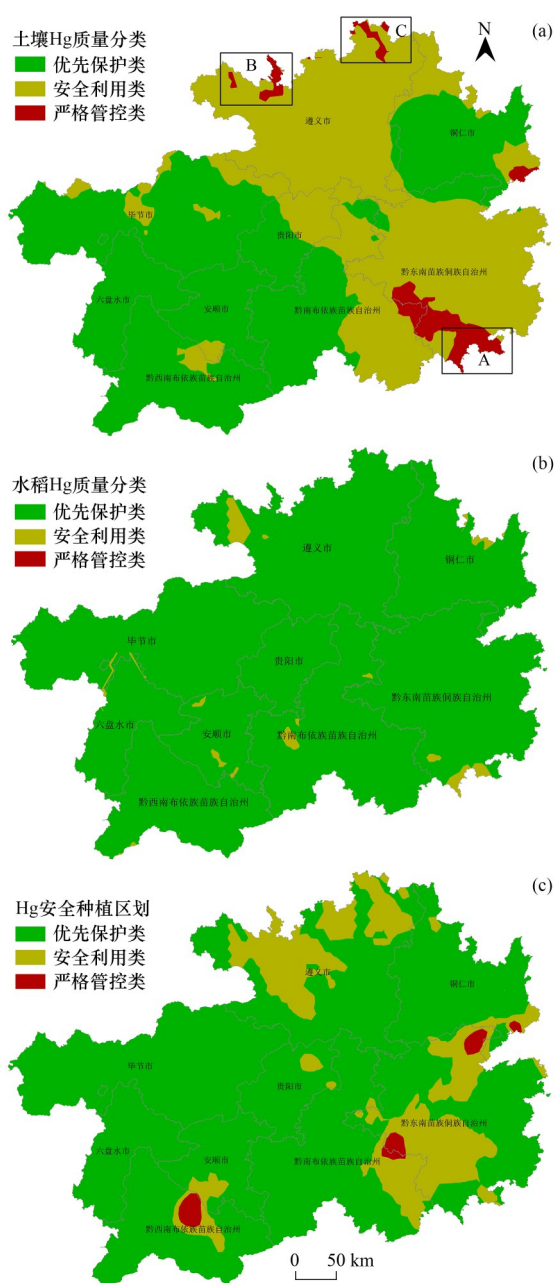


图6 土壤-水稻 Hg 安全种植区划

Fig. 6 Safe planting zoning of soil-rice

由图3和图5可知,土壤和水稻Hg含量与矿业活动有直接关系,但土壤Hg含量超标,其对应的水稻Hg含量未必超标,而土壤Hg含量未超标,水稻Hg含量可能存在超标现象.孙睿婕^[42]对贵州矿区的调查也发现此类现象.本研究万山矿区周边土壤 $\omega(\text{Hg})$ 为 $2.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均显著低于高令健等^[43]($4.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和杜静静^[44]($8.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的研究结果,水稻 $\omega(\text{Hg})$ 为 $0.012 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超标率为20%,对万山矿区周边调查有90%的水稻样品超过标准限值($0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);丹寨矿区周边农田土壤 $\omega(\text{Hg})$ 为 $88.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于朱丹妮等^[45]调查结果($22.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),丹寨水稻超标率为22.39%,高于朱丹妮等^[46]

调查结果(水稻超标率14.28%);经相关性分析,水稻Hg含量与土壤Hg含量以及基本理化性质相关性均不显著,可见土壤Hg含量或土壤基本理化性质并不是显著影响水稻Hg含量的因子,说明影响水稻Hg含量原因复杂,可能与地势、成土母质、风化岩石和农户种植方式等因素有关,尤其对土壤Hg含量极高但水稻Hg含量不超标(如黔东南州的丹寨县、遵义市的风冈县等)和土壤Hg含量不超标但水稻Hg含量超标(如铜仁市的松桃县、黔西南州的贞丰县等)情况应作更深入研究.本研究对有色金属矿业、工业密集区和农业活动相对频繁的耕地进行加密采样调查分析,所得各地级市与贵州省土壤和水稻Hg含量均值会总体偏高;土壤Hg和水稻Hg高值高度集中在矿区周围,且与汞矿距离越小分布越密集,如丹寨汞矿、万山汞矿和务川汞矿等周边土壤和水稻Hg含量高,由此得出土壤Hg和水稻Hg含量与矿业活动直接相关,也有部分点位受矿业活动影响较小,但土壤Hg和水稻Hg含量高,说明矿业活动并不是影响Hg含量的唯一因素,具体原因有待研究.据研究,不同区域下不同生长环境以及同一区域不同水稻品种对重金属的积累能力存在极其显著的差异^[47~50].因此水稻对Hg的富集能力受土壤性质和自身吸收特性等众多因素的影响,这也解释了“土超米不超”和“土不超米超”的现象.

在稻田这种特殊的湿地生态系统中,来自大气沉降的“新”Hg易于被转化为高神经毒性的甲基汞,进而在水稻体内富集,故对大气中Hg含量监测与控制尤为重要;此外,朱丹妮等^[45]对丹寨汞矿的水田-水稻和旱地-玉米Hg含量分析,得出旱地Hg含量高于水田,而玉米Hg含量普遍低于水稻,表明水田-水稻系统中农作物除了从土壤吸收Hg之外,还可能从水田水体吸收Hg,需因地制宜,在水田土壤Hg的地区,建议种植玉米.有机质能通过影响土壤Hg甲基化和水稻富集Hg过程而影响糙米对Hg的积累,杜舒阳等^[51]研究指出,猪粪能提高土壤Hg的生物有效性,进而提高水稻Hg含量,而油菜秸秆和水稻秸秆抑制水稻吸收Hg,故在Hg污染农田中应当慎重施加猪粪;此外,可通过施加钝化材料提高土壤pH值从而抑制农作物吸收Hg^[52];宁梗8、武运梗31和武运梗23为汞低累积水稻品种且晒肥和生物炭作为土壤调理剂均可减少水稻籽粒对Hg的吸收^[53],以保证农产品安全利用.

基于土壤-水稻Hg含量特征,比较土壤重金属超土壤风险筛选值、风险管制值和稻米重金属含量超食品中污染物限量标准,对贵州省进行安全种植区划(图6),定义的优先保护区种植环境最佳,应

防止外源重金属输入, 重视划定区域内土壤环境质量定期检测, 进行生态健康友好型种植体系建设和升级. 安全利用区本着因地制宜, 选取适合本区域的种植作物进行栽培, 可采用农艺调控减少土壤重金属污染风险, 使其活性变弱, 有研究指出, 土壤受 Hg 污染安全利用区可以通过种植低积累 Hg 的两系杂交籼稻品种^[54]. 严格管控类可以利用植物修复, 赵甲亭等^[55]研究指出栽种悬钩子和野蒿等耐受富集 Hg 植物可用于待修复污染土壤. 现阶段严格管控区万山汞矿和黔东南丹寨汞矿均已关闭, 但 Hg 污染稻田土壤主要受矿业活动遗留影响, 一方面应进行现有污染稻田土壤的确定和摸查归档, 另一方面应进行土壤植物修复和矿渣处理. 对于黔西南地区的严格管控区, 受制于当地仍在进行矿业活动, 污染源仍未消失, 可进行产业环保设备升级和植物修复.

本研究样品采集范围广, 样品数量多, 覆盖不同地区和不同品种的水稻品种, 但由于自然环境与采样条件限值, 如六盘水市采集样品数相对较少, 对结果分析、数据规划等方面可能存在一定影响; 本次研究对离工矿业活动密集区较远的样点分析较少, 对整体数据分析存在一定影响, 需对离工矿业较远区域作更深入调查研究; 本次研究未能建立水稻品种与土壤类型关系, 为更深入了解 Hg 含量特征, 需对水稻品种、土壤类型、成土母质和施肥情况等作更深入调查.

4 结论

(1) 贵州省水田土壤主要呈弱酸性和中性, 有机质主要是一类和二类, 保肥能力多数是中等及以上, 适合耕作; 水田土壤 $\omega(\text{Hg})$ 几何平均值为 $0.864 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与筛选值和管制值相比, 土壤样品超标率分别为 63.25% 和 14.71%; 水稻 $\omega(\text{Hg})$ 几何平均值为 $0.010 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与安全限值相比, 其超标率为 25.87%.

(2) 水田土壤 Hg 污染区分布在遵义市、黔东南州, 黔西南州的贞丰县, 铜仁市的碧江区, 贵阳市的开阳县等地区; 水稻超标点主要分布在遵义市的丹寨县、怀仁市和红花岗区, 铜仁市的碧江区, 贵阳市的开阳县和黔西南州的都匀市和锦屏县.

(3) 安全种植区划将贵州省划为优先保护区(占比 74.45%)、安全利用区(占比 24.62%)和严格管控区(占比 0.93%), 不建议直接食用严格管控区水稻, 可将其作为饲料投入生产.

参考文献:

- [1] 菅小东, 沈英娃, 姚薇, 等. 我国汞供需现状分析及削减对策[J]. 环境科学研究, 2009, 22(7): 788-792.
- [2] 孙淑兰. 汞的来源、特性、用途及对环境的污染和对人类健康的危害[J]. 上海计量测试, 2006, 33(5): 6-9.
- [3] Sun S L. The source, characteristic, use of the mercury and the pollution of the environment and the mankind's healthy bane[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2006, 33(5): 6-9.
- [4] 吴琼. 汞齐在紫外线灯中的应用与设计[J]. 中国照明电器, 2021, (12): 9-15.
- [5] Wu Q. Application and design of amalgam in ultraviolet lamp[J]. China Light & Lighting, 2021, (12): 9-15.
- [6] O'Connor D, Hou D Y, Ok Y S, et al. Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: A critical review [J]. Environment International, 2019, 126: 747-761.
- [7] 吴嘉国. 汞在人工湿地中的迁移与转化[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [8] Wu J G. Migration and transformation of mercury in constructed wetland[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [9] 冯琳, 赵娟, 冯新斌, 等. 食用大米人群甲基汞暴露健康风险及摄入量限值研究进展[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(5): 5-12.
- [10] Feng L, Zhao M, Feng X B, et al. Research progress on health risk and intake limit of methylmercury exposure among rice consumption population [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(5): 5-12.
- [11] 路文芳, 田宇, 战景明, 等. 我国大气汞污染对人体健康的影响[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(8): 761-763.
- [12] Lu W F, Tian Y, Zhan J M, et al. Effects of atmospheric mercury pollution on human health in China: a review of recent studies[J]. Journal of Environment and Health, 2012, 29(8): 761-763.
- [13] Mortazavi S M J, Mortazavi G, Paknahad M. A review on the distribution of Hg in the environment and its human health impacts [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 310: 278-279.
- [14] 杨倩, 王方圆, 申艳冰. 砷、汞对植物毒性影响及其迁移富集效应探讨[J]. 能源环境保护, 2020, 34(2): 87-91.
- [15] Yang Q, Wang F Y, Shen Y B. Study on the effects of arsenic and mercury on phytotoxicity and their migration and enrichment effects [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(2): 87-91.
- [16] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. Fractionation, distribution and transport of mercury in rivers and tributaries around Wanshan Hg mining district, Guizhou province, southwestern China: Part 1-Total mercury[J]. Applied Geochemistry, 2010, 25(5): 633-641.
- [17] Li P, Du B Y, Chan H M, et al. Human inorganic mercury exposure, renal effects and possible pathways in Wanshan mercury mining area, China [J]. Environmental Research, 2015, 140: 198-204.
- [18] 张莉, 周康. 贵州省土壤重金属污染现状与对策[J]. 贵州农业科学, 2005, 33(5): 114-115.
- [19] Zhang L, Zhou K. Current status and countermeasures for heavy metal contamination in soil in Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2005, 33(5): 114-115.
- [20] 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价[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 914-921.
- [21] 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.
- [22] 孔林, 刘杰民, 韦艳, 等. 贵州省典型铅锌矿区居民血液总汞

- 和甲基汞暴露及健康风险模型预测评估[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(6): 1499-1508.
- Kong L, Liu J M, Wei Y, *et al.* Total mercury and methyl mercury in blood of inhabitant and their associated modelling prediction evaluation in typical lead-zinc mining region, Guizhou Province, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(6): 1499-1508.
- [15] 贵州省统计局. 贵州省宏观经济数据库-部门数据[EB/OL]. <http://hgk.guizhou.gov.cn/index.vhtml#/>, 2021-12-31.
- [16] 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 等. 铜仁土壤-水稻重金属积累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.
- [17] 倪莘然, 龙明睿, 杨瑞东, 等. 贵州丹寨排庭汞矿区土壤-玉米重金属含量及生态影响[J]. 生态毒理学报, 2020, **15**(6): 324-333.
- Ni X R, Long M R, Yang R D, *et al.* Heavy metal contents of soil-maizes and its ecological effects in mercury mining area of Danzhai Paiting, Guizhou [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, **15**(6): 324-333.
- [18] 陶惠, 陈颖, 刘艳伟, 等. 贵州万山汞矿区植物中汞的累积特征[J]. 环境化学, 2022, **41**(12): 4047-4056.
- Tao H, Chen Y, Liu Y F, *et al.* Bioaccumulation of mercury in plants collected from Wanshan mercury mining areas in Guizhou Province [J]. Environmental Chemistry, 2022, **41**(12): 4047-4056.
- [19] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [20] 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.
- [21] Feng X B, Qiu G L. Mercury pollution in Guizhou, Southwestern China - an overview [J]. Science of the Total Environment, 2008, **400**(1-3): 227-237.
- [22] Zhao L, Qiu G L, Anderson C W N, *et al.* Mercury methylation in rice paddies and its possible controlling factors in the Hg mining area, Guizhou province, Southwest China [J]. Environmental Pollution, 2016, **215**: 1-9.
- [23] 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.
- [24] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, **21**(3): 265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. Earth Science Frontiers, 2014, **21**(3): 265-306.
- [25] 陈清霞, 陆晓辉, 赵文轩, 等. 不同地形条件下贵州省主要土壤类型的空间分异[J]. 江苏农业科学, 2022, **50**(7): 205-213.
- Chen Q X, Lu X H, Zhao W X, *et al.* Spatial differentiation of main soil types in Guizhou Province under different topographical conditions [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, **50**(7): 205-213.
- [26] 赵飞飞, 张显云, 付婷, 等. 贵州省不同地貌类型土壤湿度变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(6): 217-225.
- Zhao F F, Zhang X Y, Fu T, *et al.* Variation of soil moisture of its response to climate change in different geomorphological types of Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(6): 217-225.
- [27] 瞿丽雅. 贵州省汞污染防治与生态恢复[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2002, **20**(3): 56-59.
- Qu L Y. The pollution and prevention of mercury in Guizhou Province [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2002, **20**(3): 56-59.
- [28] 田茂苑. 贵州喀斯特地区不同水稻土镉污染风险格局划分[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- Tian M Y. Classification of cadmium pollution risk patterns of different paddy soils in karst area of Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou university, 2019.
- [29] 汪吉东, 许仙菊, 宁运旺, 等. 土壤加速酸化的主要农业驱动因素研究进展[J]. 土壤, 2015, **47**(4): 627-633.
- Wang J D, Xu X J, Ning Y W, *et al.* Progresses in agricultural driving factors on accelerated acidification of soils [J]. Soils, 2015, **47**(4): 627-633.
- [30] 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 北京: 农业出版社, 1979.
- [31] 杨之江, 陈效民, 景峰, 等. 基于GIS和地统计学的稻田土壤养分与重金属空间变异[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(6): 1893-1901.
- Yang Z J, Chen X M, Jing F, *et al.* Spatial variability of nutrients and heavy metals in paddy field soils based on GIS and geostatistics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(6): 1893-1901.
- [32] 张舜凯, 刘继龙, 刘海岳. 基于地统计学农田不同土层土壤容重的空间变异特征分析[J]. 湖北农业科学, 2019, **58**(15): 30-32, 50.
- Zhang S K, Liu J L, Liu H Y. Spatial variability of soil bulk density in different soil layers based on geostatistics [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, **58**(15): 30-32, 50.
- [33] 秦松, 范成五, 孙锐锋. 贵州土壤资源的特点、问题及利用对策[J]. 贵州农业科学, 2009, **37**(5): 94-98.
- Qin S, Fang C W, Sun R F. Characteristic, problems and utilization countermeasures [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2009, **37**(5): 94-98.
- [34] Qiu G L, Feng X B, Li P, *et al.* Methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown at abandoned mercury mines in Guizhou, China [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, **56**(7): 2465-2468.
- [35] Feng X B, Li P, Qiu G L, *et al.* Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou Province, China [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(1): 326-332.
- [36] 戴前进, 冯新斌, 唐桂萍. 土壤汞的地球化学行为及其污染的防治对策[J]. 地质地球化学, 2002, **30**(4): 75-79.
- Dai Q J, Feng X B, Tang G P. The geochemical behavior of mercury in soil and its pollution control [J]. Geology-Geochemistry, 2002, **30**(4): 75-79.
- [37] 王济, 王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2005, **23**(2): 113-120.
- Wang J, Wang S J. The sources and crops effect of heavy metal

- elements of contamination in soil [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2005, **23**(2): 113-120.
- [38] Lamborg C H, Fitzgerald W F, O'Donnell J, *et al.* A non-steady-state compartmental model of global-scale mercury biogeochemistry with interhemispheric atmospheric gradients [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, **66**(7): 1105-1118.
- [39] Mason R P, Sheu G R. Role of the ocean in the global mercury cycle [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, **16**(4), doi: 10.1029/2001GB001440.
- [40] Shia R L, Seigneur C, Pai P, *et al.* Global simulation of atmospheric mercury concentrations and deposition fluxes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, **104**(D19): 23747-23760.
- [41] Bergan T, Gallardo L, Rodhe H. Mercury in the global troposphere: a three-dimensional model study [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(10): 1575-1585.
- [42] 孙睿婕. 贵州某汞矿区下游土壤-农作物系统汞污染现状及风险评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- Sun R J. The status of mercury pollution in soil-crop system and environmental risk assessment in the downstream of one mercury mine in Guizhou Province [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018.
- [43] 高令健, 毛康, 张伟, 等. 贵州万山汞矿区稻田土壤汞的分布及污染特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, **40**(1): 148-154.
- Gao L J, Mao K, Zhang W, *et al.* Temporal and spatial distribution and pollution characteristics of mercury in paddy soils of the Wanshan mercury mining area, Guizhou Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, **40**(1): 148-154.
- [44] 杜静静. 贵州典型汞污染区土壤-稻米汞分布特征及农艺调控效果[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [45] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 等. 不同耕作类型下土壤-农作物系统中汞、砷含量与生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2021, **48**(3): 708-720.
- Zhu D N, Zou S Z, Zhou C S, *et al.* Hg and As contents of soil-crop system in different tillage types and ecological health risk assessment [J]. Geology in China, 2021, **48**(3): 708-720.
- [46] 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.
- [47] 陈志德, 仲维功, 杨杰, 等. 不同水稻品种在 Cd、As 和 Hg 胁迫下的吸收积累特性[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(2): 389-393.
- Chen Z D, Zhong W G, Yang J, *et al.* Response characteristics of different rice cultivars under Cd, As and Hg stress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, **24**(2): 389-393.
- [48] 李雨岑. 不同类型水稻土甲基汞变化特征及其在水稻中的富集[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- Li Y Q. Variation characteristics of methyl mercury in different types of paddy soils and their enrichment in rice [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [49] 仲维功, 杨杰, 陈志德, 等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, **22**(4): 331-338.
- Zhong W G, Yang J, Chen Z D, *et al.* Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs (*Oryza sativa* L.) [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2006, **22**(4): 331-338.
- [50] 漆璐. 高、低汞积累水稻品种筛选及生理特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- Qi L. Selection and physiological characteristics of high/low mercury rice varieties [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [51] 杜舒阳, 丁昌峰, 王兴祥. 三种有机物料对稻田土壤汞甲基化及水稻汞积累的影响[J]. 土壤, 2022, **54**(6): 1219-1224.
- Du S Y, Ding C F, Wang X X. Effects of three kinds of organic materials on mercury methylation in paddy soil and mercury accumulation in brown rice [J]. Soils, 2022, **54**(6): 1219-1224.
- [52] 刘静, 秦樊鑫, 罗谦, 等. 钝化剂对污染土壤汞钝化效果及辣椒吸收汞的影响[J]. 土壤通报, 2022, **53**(6): 1461-1470.
- Liu J, Qin F X, Luo Q, *et al.* Effects of amendments on inactivation of soil mercury in the soil and the enrichment of absorption by pepper [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, **53**(6): 1461-1470.
- [53] 何建桥, 刘健明, 徐生, 等. 汞污染耕地水稻低积累品种筛选与调理剂应用研究[J]. 农业开发与装备, 2020, (12): 121-122.
- [54] 田甜. 福建省土壤汞、砷及其向籼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.
- [55] 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.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)