

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明	(2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹	(2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹	(2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明	(2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思吟, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双	(2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军	(2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启	(2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅	(2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂	(2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮	(2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞	(2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军	(2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰	(2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方	(2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇	(2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波	(2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红	(2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明	(2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥	(2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威	(2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab	(2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞	(2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂	(2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤	(2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣	(2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷	(2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲	(2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春	(2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇	(2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波	(2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞	(2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼	(2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮	(2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉	(2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明	(2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌	(2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬	(2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达	(2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华	(2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀	(2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元	(2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵	(2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇	(2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉	(2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅	(2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯	(2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚	(2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡现秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰	(2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成	(2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭	(2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森	(2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进	(2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰	(2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘	(2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍	(2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽	(2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡	(3003)
《环境科学》征订启事(2480)	《环境科学》征稿简则(2538)	信息(2766, 2798, 2927)

贵州省旱地土壤 Hg 污染状况与玉米安全生产评估

马丽钧¹, 周浪¹, 宋波^{1,2*}, 王佛鹏¹, 张云霞¹, 吴勇³

(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; 3. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004)

摘要: 贵州省是我国 Hg 产量和储量最大的省份, 玉米是其第二大粮食作物, 有必要摸清贵州省土壤 Hg 含量状况, 并评估其玉米生产安全性。在玉米主产区采集了 990 组土壤-玉米样品和 270 个土壤单一样品, 测定土壤 pH、阳离子交换量(CEC)和有机质(SOM)含量, 以及土壤和玉米中 Hg 含量。结果表明, 贵州省旱地土壤 pH 在 3.93~9.82 之间, $\omega(\text{SOM})$ 几何均值为 27.5 g·kg⁻¹, CEC 几何均值为 11.7 cmol·kg⁻¹; 土壤 $\omega(\text{Hg})$ 范围为 0.005~686 mg·kg⁻¹, 几何均值为 0.632 mg·kg⁻¹, 样点超标率为 7.22%; 其中, 铜仁市土壤 Hg 污染最突出, 超标率达 21.3%; 就县级而言, 黔东南苗族侗族自治州丹寨县、铜仁市万山区和碧江区土壤 Hg 点位超标率较高; 基于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017), 玉米籽粒 Hg 含量超标率为 1.11%, 超标点位主要分布于铜仁市万山区和安顺市西秀区等工矿业活动区周围。由结果可知, 贵州省存在土壤 Hg 污染严重的情况, 整体上玉米可实现安全种植, 但需要密切关注工矿业区周围籽粒 Hg 含量和居民 Hg 暴露风险。

关键词: 贵州; 旱地土壤; 玉米; 汞污染; 粮食安全

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2868-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205136

Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province

MA Li-jun¹, ZHOU Lang¹, SONG Bo^{1,2,*}, WANG Fo-peng¹, ZHANG Yun-xia¹, WU Yong³

(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 University of Technology, Guilin 541004, China; 3. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Guizhou Province is the province with the largest Hg production and reserves in China, and maize is the second largest grain crop in Guizhou Province. It is necessary to identify the status of soil Hg content in Guizhou Province and evaluate the safety of maize production. A total of 990 soil-maize samples and 270 single soil samples were collected in the main maize-producing areas to determine soil pH, cation exchange capacity (CEC), and organic matter content (SOM), as well as Hg content in soil and maize. The results showed that the pH of dryland soil in Guizhou Province ranged from 3.93 to 9.82, the geometric mean of $\omega(\text{SOM})$ was 27.5 g·kg⁻¹, and the geometric mean of CEC was 11.7 cmol·kg⁻¹. Soil $\omega(\text{Hg})$ ranged from 0.005 to 686 mg·kg⁻¹, the geometric mean was 0.632 mg·kg⁻¹, and the over-standard rate was 7.22%. Among them, the soil Hg pollution in Tongren was the most prominent, with the exceedance rate of 21.3%. At the county level, Danzhai County, Qiongdongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture, and Tongren City Wanshan District and Bijiang District had high exceedance rates of Hg. According to the Limit of Pollutants in Food according to National Standards for Food Safety (GB 2762-2017), the exceedance rate of Hg content in maize grains was 1.11%, and the exceedance points were mainly distributed around industrial and mining activity areas such as Wanshan District in Tongren City and Xixiu District in Anshun City. According to the results, there was serious soil Hg pollution in Guizhou Province. On the whole, maize can be safely planted, but it is necessary to pay close attention to the Hg content in grains and the Hg exposure risk of residents around industrial and mining areas.

Key words: Guizhou; dryland soil; corn; mercury pollution; food security

汞(Hg)及其化合物具有强致畸作用、神经毒性、遗传毒性和生物积累效应^[1], 已被世界卫生组织国际癌症研究机构列入三类致癌物清单中。随着科技的发展, Hg 被广泛应用于化学、医药、冶金、电器仪器、军事和其他精密高新科技领域^[2,3], Hg 的市场需求量也随之增加。贵州是我国 Hg 主要产区之一, 矿储量及产量常年居我国首位, 2019 年, 贵州省 Hg 矿资源保有储量为 3.05 万 t, 年产矿量为 6.5 万 t, 集中分布于遵义市务川县, 铜仁市万山区、碧江区、松桃县和印江县, 贵阳市开阳县, 黔东南苗族侗族自治州(以下简称“黔东南州”)黄平县和丹寨县, 黔南布依族苗族自治州(以下简称“黔南州”)三都县和独山县及黔西南布依族苗族自治州(以下

简称“黔西南州”)兴仁县、贞丰县和晴隆县等地^[4]。矿业开采冶炼活动会产生大量的含 Hg 的“三废”——废气、废水和废渣, 极易导致其周边土壤受到重金属污染。土壤重金属污染隐蔽性高, 主要通过生物表现其危害, 富集在动植物体内的重金属可通过食物链危害人体。

已有研究表明, 贵州省 Hg 矿地区的土壤处于严重污染的状态, 铜仁市万山区、黔东南州丹寨县、遵义市务川县和滥木厂等 Hg 矿地区土壤 ω (总

收稿日期: 2022-05-11; 修订日期: 2022-07-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600)

作者简介: 马丽钧(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: 1084853631@qq.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

Hg)变化范围为 0.18 ~ 750 mg·kg⁻¹^[5~9]. 土壤 Hg 含量的严重超标能影响当地农产品的安全种植,研究在贵州省某矿区尾矿堆场的农产品发现水稻、蔬菜和玉米中 Hg 的超标率分别为 82.8%、46.7% 和 20.0%^[10]; 铜仁市谷物重金属超标率可达 19.1%^[11],可见对于局部地区,土壤-作物 Hg 污染的情况已非常严峻.据贵州省统计局数据显示,2020 年贵州省玉米产量为 220.3 万 t,占当年粮食作物产量的 20.85%^[12],其生产安全性与民众安全有着密切关联,因此对贵州省土壤 Hg 污染现状及玉米安全生产性进行调查研究具有十分重要的意义.本次调查以贵州省玉米主要种植区的土壤-玉米为研究对象,对土壤的基本理化性质、土壤和玉米籽粒的 Hg 含量进行分析,探究土壤 Hg 含量水平和污染程度,同时进行玉米生产安全性评估,分析影响玉米 Hg 含量的主导因素,以期对贵州粮食安全生产提供支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

贵州省地处中国西南内陆地区,北接四川和重庆,东毗湖南,南邻广西,西连云南.地处于北纬 24°37' ~ 29°13',东经 103°36' ~ 109°35'.贵州境内地势西高东低,自中部向北、东、南三面

倾斜;全省年平均气温在 16℃左右,雨季明显,年降水量可达 1 448.3 mm.贵州是矿产资源大省,现发现矿产 110 多种,其中有 76 种探明了储量,Hg 矿和煤矿等的保有储量和开采量均排在全国前列^[12].

1.2 样品采集及预处理

样品采集时间为 2018 年 7 ~ 9 月,采样点分布情况如图 1 所示.首先,基于土地利用方式和工矿业活动区域,按照《环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)进行初步布点,进行首轮土壤-玉米样品采样;其次,对于玉米未成熟区域,在首次采样中只采集了旱地土壤样品,玉米成熟后,进行二次采集土壤-玉米样品.共采集土壤-玉米样品 990 组,旱地土壤单一样品 270 个.

土壤样品采用五点采样法,去除土壤表层的落叶、杂物等,每点取耕作层 0 ~ 20 cm 土壤约 1 kg,后将土样混匀,用四分法取 1 kg 土壤作为样品.样品于阴凉处风干,除去石子和植物根系等杂物,研磨后过 0.149 mm 孔径筛,装样待测.

在采集土壤样品时对应选取生长状况良好的玉米.将剥下的玉米籽粒混匀后用四分法取样,用自来水冲洗干净后,再用去离子水冲洗 3 遍,于烘干机内 60℃烘干至恒重,样品使用不锈钢打磨机粉碎后装袋存储于干燥器内待测.

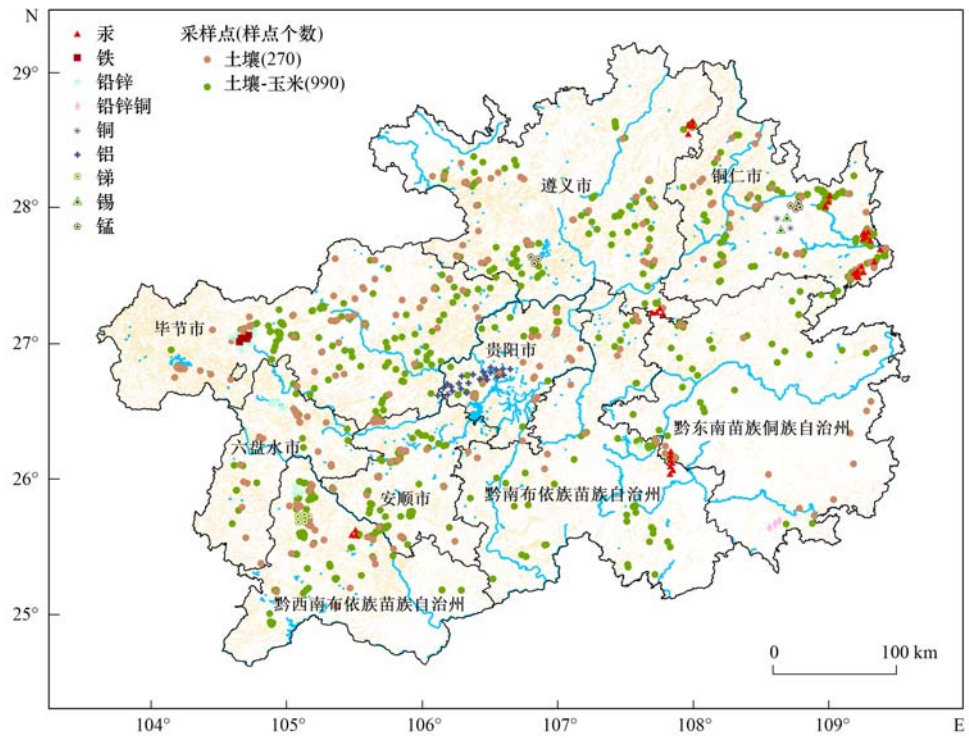


图 1 贵州省采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Guizhou Province

1.3 样品的测定

样品需测定的项目有土壤的 pH 值、土壤有机

质(SOM)、土壤阳离子交换量(CEC)、土壤全量 Hg (THg)、土壤有效态 Hg (AHg) 和玉米籽粒 Hg

(GHg)含量.

土壤 pH 的测定采用 pH 电位测定法 (NY/T 1121.2-2006); SOM 的测定采用水合热重铬酸钾氧化-比色法 (GB 9834-88); CEC 的测定采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法 (HJ 889-2017); 土壤和籽粒 Hg 含量的测定采用硝酸-盐酸 (1:1) 进行水浴消解, 利用原子荧光光度分析仪 (AFS-9700) 测定; 土壤有效态 Hg 采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 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, 其 Hg 回收率分别为 86.6%~95.3%、80.2%~86.2% 和 90.4%~95.1%; 随机选取 10% 的样品进行重复实验, 相对误差在 $\pm 5\%$ 以内, 符合文献 [13] 和《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》(GB/T 22105.1-2008) 中的要求.

1.4 评价方法

单因子污染指数法是针对单一元素污染的污染程度进行评价, 表达式如下:

$$P_i = C/S$$

式中, P_i 为污染指数, $P_i \leq 1$ 表示无污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 表示中度污染, $P_i > 5$ 表示重度污染; C 为样品实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S 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》(试行) (GB 15618-2018) [以下简称“农地土壤风险管控标准 (GB 15618-2018)”] 中的风险筛选值.

1.5 数据处理与分析

利用 SPSS 23.0 进行数据统计与分析, 用 ArcGIS 10.0 绘制土壤和玉米籽粒汞含量的空间分布.

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

贵州省 9.4% 旱地土壤点位 pH 小于 5.5, 15.4% 点位 pH 在 5.5~6.5 之间, 33.5% 点位 pH 在 6.5~7.5 之间, 41.1% 点 pH 在 7.5~8.5 之间. 可见贵州省旱地土壤主要呈中性或碱性, 适宜玉米生长. 贵州省土壤 pH 中位数为 7.30, 其中毕节市、六盘水市和贵阳市这 3 个地区旱地土壤 pH 最高, 中位数分别为 7.60、7.30 和 7.35; 黔东南州、黔西南州和黔南州土壤 pH 最低, 其 pH 中位数依次为 6.93、7.00 和 7.10.

通过图 2(b) 可知, 贵州省旱地 $\omega(\text{SOM})$ 多集中在 $20 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 依据文献 [14] 中“全国土壤养分含量分级标准表”来分类, 属于二类或三类, 土壤肥

沃, 适合耕作. 贵州省旱地 SOM 原始数据符合对数正态分布, 采用几何均值表示. 贵州省旱地 $\omega(\text{SOM})$ 几何均值为 $27.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中黔西南州地区 $\omega(\text{SOM})$ 最高, 可达 $34.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 六盘水市和毕节市两地次之, 含量分别为 $30.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $29.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 黔东南州地区旱地最低, 含量仅为 $21.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次为铜仁市和遵义市, 含量分别为 $23.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $25.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

CEC 不仅是土壤保肥保水能力的体现, 也是土壤缓冲能力的体现^[15]. 一般认为 CEC 高于 $20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是保肥能力强的土壤, $10 \sim 20 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为保肥能力中等, 低于 $10 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 保肥能力

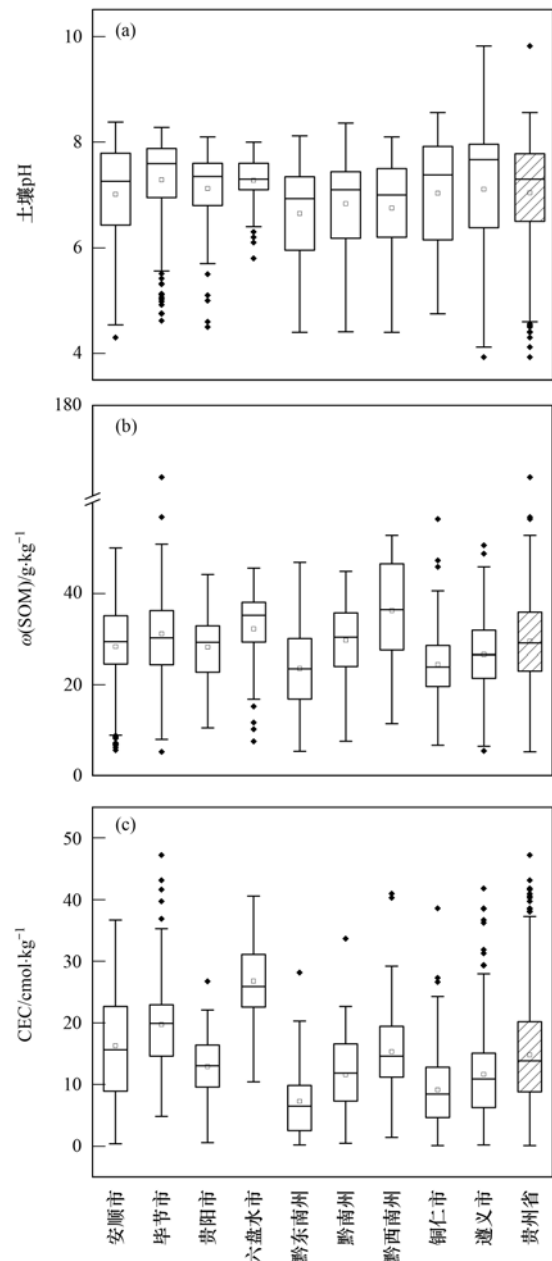


图2 贵州省各市采样点土壤基本理化性质

Fig. 2 Basic physical and chemical properties of soil samples in various cities of Guizhou Province

低^[16]. 由图 2(c)可知,贵州省采样点的 CEC 多处于 10~20 cmol·kg⁻¹,属保肥能力中等的土壤;黔东南州地区 CEC 最低,其次是铜仁市;六盘水市和毕节市两地 CEC 排在前列.

2.2 土壤 Hg 含量分析

表 1 和表 2 分别为贵州省旱地土壤 Hg 含量和有效态 Hg 含量基本特征统计,两者的原始数据基本符合对数正态分布,采用几何均值来表征土壤中 Hg 含量.

由表 1 可知,贵州省旱地 $\omega(\text{Hg})$ 均值为 0.632 mg·kg⁻¹,约为贵州省土壤 Hg 含量背景值(0.11 mg·kg⁻¹)的 6 倍^[17],变异系数为 9.49,属于极高变

异水平. 各市中铜仁市土壤 $\omega(\text{Hg})$ 最高,均值可达 1.23 mg·kg⁻¹,最高值约为管制值的 114 倍,变异系数为 6.38;在工矿业活动丰富的安顺市、毕节市、贵阳市和黔西南州这 4 个地区,其土壤 $\omega(\text{Hg})$ 也远高于贵州土壤背景值,均值分别到达了 0.71、0.70、0.83 和 0.87 mg·kg⁻¹,变异系数均在 1 左右,属高变异水平. 通过差异性分析(方差分析),所得结果为 $P>0.05$,表明贵州省各市土壤 Hg 含量存在显著差异. 土壤在正常发育过程中由于成土母质的不同,使得土壤 Hg 含量存在差异^[18],同时由于贵州省汞矿开采冶炼时间久远,局部地区土壤 Hg 含量偏高,最终导致贵州省各地区土壤 Hg 含量差异大.

表 1 贵州省旱地土壤 Hg 含量基本特征统计

Table 1 Basic characteristics of mercury content in dryland soil in Guizhou Province

采样区	$N^{1)}$	范围 /mg·kg ⁻¹	算术平均值±标准差 /mg·kg ⁻¹	几何平均值 /mg·kg ⁻¹	变异 系数	偏度 (原数据)	偏度 (对数转换)	$P_{K-S}^{2)}$
安顺市	147	0.072~9.04	1.04±1.15	0.710	1.11	3.54	-0.136	0.000
毕节市	286	0.100~9.69	0.970±0.932	0.697	0.96	3.59	0.401	0.000
贵阳市	106	0.052~138	3.34±14.4	0.828	4.32	8.21	1.41	0.000
六盘水市	55	0.086~2.79	0.451±0.473	0.334	1.05	3.24	0.856	0.000
黔东南州	56	0.037~89.3	2.81±12.6	0.242	4.48	6.28	2.74	0.000
黔南州	99	0.096~2.66	0.602±0.463	0.455	0.77	1.80	-0.278	0.009
黔西南州	188	0.148~4.55	1.03±0.621	0.874	0.61	2.22	-0.477	0.000
铜仁市	163	0.149~686	8.61±54.9	1.23	6.38	11.78	1.61	0.000
遵义市	160	0.005~22.1	0.618±2.33	0.295	3.77	8.66	0.801	0.000
贵州省	1 260	0.005~686	2.16±20.5	0.632	9.49	30.0	1.07	0.000

1) N 表示采样点个数; 2) 单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫均匀检验

由表 2 可知贵州省旱地 $\omega(\text{Hg 有效态})$ 均值为 0.654 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,活化率为 0.104%. 黔东南州地区 $\omega(\text{Hg 有效态})$ 最高,可达 1.54 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.35,活化率高达 0.636%,至少为其他地区的 3.7 倍;其次为铜仁市, $\omega(\text{Hg 有效态})$ 均值为 1.31 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,活化率为 0.106%. 有效态 Hg 含量最低的地区为安顺市,六盘水市和毕节市次之. 通过差异性

分析(方差分析),所得结果为 $P<0.05$,表明贵州省各市土壤有效态 Hg 含量不存在显著差异. 贵州省各地区土壤有效态 Hg 含量极低,活化率均未达 1%,说明土壤有着极强的固 Hg 能力,杨国治等^[19]的研究结果表明,当外源 Hg 添加量达 10 mg·kg⁻¹ 时,黑土、红壤、黄土和黄棕土的固汞率仍大于 70%.

表 2 贵州省旱地土壤有效态 Hg 含量基本特征统计

Table 2 Basic characteristic statistics of available mercury content in dryland soil of Guizhou Province

采样区	$N^{1)}$	范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术平均值±标准差 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异 系数	活化率 /%	偏度 (原数据)	偏度 (对数转换)	$P_{K-S}^{2)}$
安顺市	147	0.120~8.28	0.597±0.756	0.430	1.27	0.061	7.55	0.329	0.000
毕节市	286	0.060~4.88	0.623±0.499	0.501	0.80	0.072	4.50	-0.472	0.000
贵阳市	106	0.075~13.7	0.928±1.42	0.623	1.53	0.075	7.35	-0.117	0.000
六盘水市	55	0.220~0.985	0.511±0.222	0.465	0.43	0.139	0.51	-0.016	1.000
黔东南州	56	0.895~3.56	1.63±0.573	1.54	0.35	0.636	1.40	0.341	0.001
黔南州	99	0.185~2.54	0.887±0.437	0.779	0.49	0.171	1.01	-0.744	0.000
黔西南州	188	0.160~3.63	0.840±0.590	0.700	0.70	0.080	2.49	0.193	0.000
铜仁市	163	0.141~126	2.23±9.84	1.31	4.42	0.106	12.4	2.00	0.000
遵义市	160	0.215~1.72	0.611±0.298	0.544	0.49	0.184	1.03	-0.098	0.000
贵州省	1 260	0.060~126	0.945±3.63	0.654	3.84	0.104	32.7	0.067	0.000

1) N 表示采样点个数; 2) 单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫均匀检验

2.3 土壤 Hg 污染评价及空间分布特征

在 1 260 个土壤采样点中,有 91 个点位土壤 Hg

含量超过了农地土壤风险管控标准(GB 15618-2018)中的风险筛选值,点位超标率为 7.22%. 从表

3 可知铜仁市为超标最严重的地区,超标率高达 22.70%;其次为贵阳市,超标率为 11.32%;黔东南州地区以 8.93% 的超标率位居第三.3 个地区均有 Hg 矿开采活动,因此除地质背景高,人为活动带来的影响也是导致其 Hg 含量超标的原因之一.此外还发现对于不同的土壤 pH 范围,当 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 时,相较其他 pH 范围,其点位超标率最低,为 5.64%. Gabriel 等^[20] 研究表明,当土壤处于酸性条件下,土壤 pH 升高,土壤对 Hg 的解析量迅速增加;当土壤处于碱性条件下,土壤 pH 升高,土壤对 Hg 的解析量随 pH 升高而下降.所以当 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$, Hg 在土壤中的迁移能力增强,被固定在土壤中的 Hg 减少,超标率也随之降低.

据图 3 可知,1 260 个土壤采样点中,无 Hg 污染点位占 92.78%,轻微污染占 4.13%,轻度污染占 0.56%,中度污染占 0.79%,重度污染占 1.75%. 结合贵州省工矿业分布和污染程度可知,无污染或轻度污染点位主要分布于非工矿业活动区域;重度污染点位分布在遵义市的务川县(图 3 中 1 号框),铜仁市万山区、碧江区和松桃县(图 3 中 2 号框),贵阳市清镇市和开阳县(图 3 中 3 号框),黔东南州丹寨县(图 3 中 4 号框),以铜仁市土壤 Hg 污染最为严重.由此可推测土壤受 Hg 污染与工矿业活动有直接联系,工矿业生产过程中产生的大量含 Hg“三废”,处理不妥当时,大量的 Hg 进入环境,导致土壤 Hg 污染^[21,22].

表 3 基于风险筛选值贵州省旱地土壤 Hg 含量超标情况¹⁾

Table 3 Excess mercury situation of dryland soil in Guizhou Province based on risk screening value

采样区	N ²⁾	超标率/%				总超标率/%
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5	
安顺市	147	0	0	1.92	17.86	7.48
毕节市	286	21.43	6.25	10.00	0	4.55
贵阳市	106	0	10.00	9.09	17.14	11.32
六盘水市	55	0	0	2.86	0	1.82
黔东南州	56	0	0	6.90	37.50	8.93
黔南州	99	0	0	0	0	0
黔西南州	188	20.00	0	2.30	5.41	4.79
铜仁市	163	4.00	30.43	34.15	20.27	22.70
遵义市	160	0	4.00	4.00	1.12	1.88
贵州省	1 260	7.32	5.64	7.59	7.49	7.22

1) 超标率是以不同 pH 区间的点位总数作为分母来计算,如: pH≤5.5 的点位总共 123 个,其中超标点位 9 个,超标率为 7.32%; 2) N 表示采样点个数

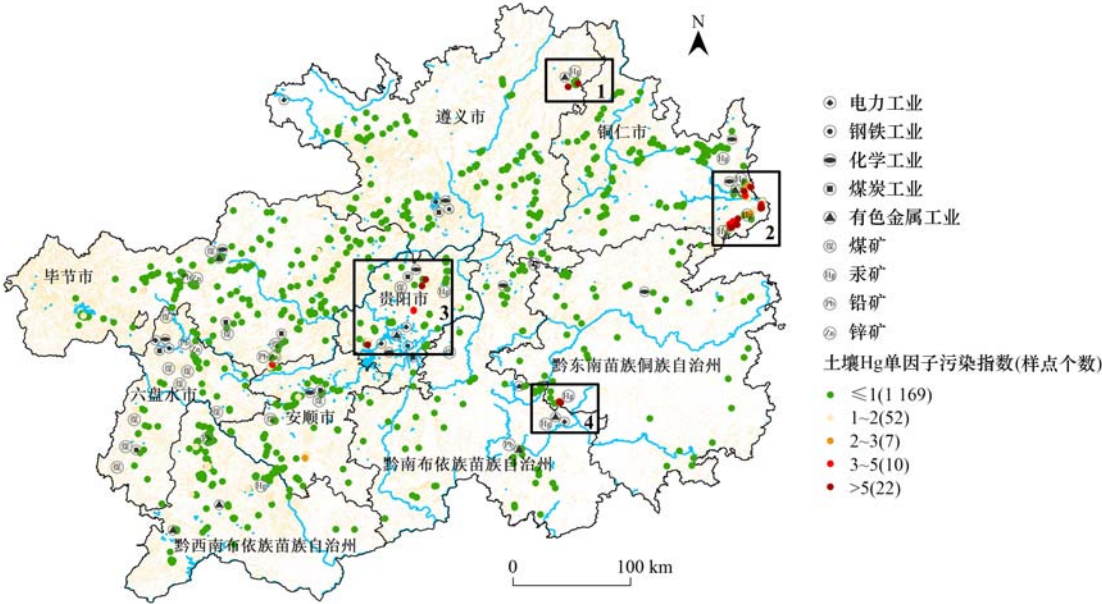


图 3 贵州省旱地土壤 Hg 单因子污染指数分布

Fig. 3 Distribution of Hg single factor pollution index of dryland soil in Guizhou Province

就县一级而言,参照农地土壤风险管控标准 (GB 15618-2018) 中的风险管制值,铜仁市万山区

的点位超标率可达 52.17% (表 4),碧江区的超标率为 35.00%;黔东南州丹寨县的点位超标率为

表 4 基于风险管制值贵州省县级旱地土壤 Hg 含量超标情况¹⁾

采样区	N ²⁾	超标倍数占比/%					总超标率 /%
		$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$3 < P_i \leq 5$	$P_i > 5$	
安顺市镇宁县	36	97.22	2.78	0	0	0	2.78
毕节市赫章县	68	97.06	2.94	0	0	0	2.94
毕节市织金县	28	92.86	3.57	3.57	0	0	7.14
贵阳市开阳县	34	91.18	2.94	0	2.94	2.94	8.82
贵阳市清镇市	44	90.91	2.27	2.27	2.27	2.27	9.09
黔东南州丹寨县	11	54.55	18.18	0	18.18	9.09	45.45
铜仁市碧江区	40	65.00	10.00	7.50	12.50	5.00	35.00
铜仁市万山区	23	47.83	17.39	4.35	8.70	21.74	52.17
遵义市务川县	8	75.00	0	0	25.00	0	25.00

1) 未列出的县区不存在超管制值的情况; 2) N 表示采样点个数

45.45%,可见就这 3 个县区而言,旱地土壤 Hg 污染的情况十分严重。

利用 ArcGIS 10.2 软件中 Kriging 插值法绘制贵州省的旱地土壤 Hg 含量预测图(图 4)。发现在工矿业活动丰富的地区,其周围土壤 Hg 含量偏高,主要呈现为辐射状,越接近工矿业地区中心土壤 Hg 浓度越

高,向外递减。同时对土壤和玉米籽粒 Hg 含量是否超标进行分类,分为 4 类:以“土不超籽粒不超”的情况为主导;“土不超籽粒超”的情况多出现于有矿业活动的地区;“土超标籽粒超”均位于铜仁地区东侧;“土超籽粒不超”的点位基本集中在工矿业地区。可见工矿业活动对土壤-玉米系统 Hg 含量有直接影响。

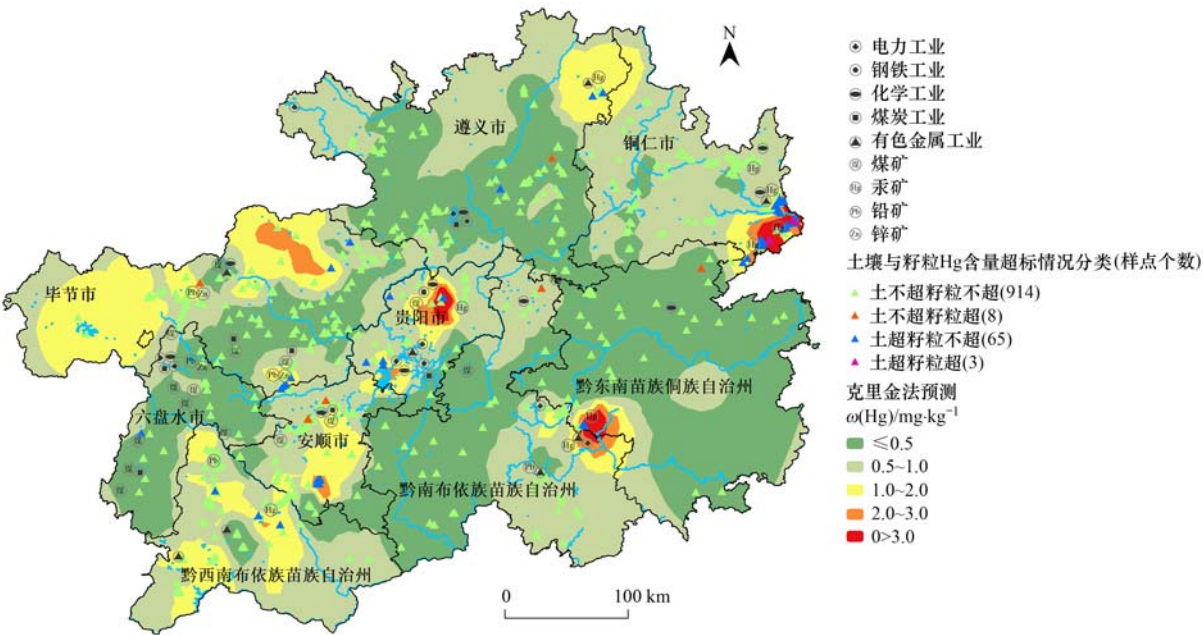


图 4 贵州省旱地土壤 Hg 含量预测

Fig. 4 Prediction of Hg content in dryland soil of Guizhou Province

2.4 玉米籽粒 Hg 含量分析及安全生产评估

玉米籽粒 Hg 含量原始数据符合对数正态分布,采用几何均值表示,统计结果如表 5 所示。990 个玉米样品中有 11 个样品超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)的限值[谷物中 $\omega(\text{Hg})$ 不得高于 $20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$],分别为安顺市 4 个、毕节市 1 个、黔东南州 1 个、黔南州 1 个、铜仁市 3 个和遵义市 1 个,总超标率为 1.11%,毕节市超标点位仅为一个,但其玉米籽粒 $\omega(\text{Hg})$ 最高值为 $92.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,接近《饲料卫生标准》(GB 13078-

2017)的 Hg 限值($100 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);其次是安顺市、黔东南州和铜仁市,籽粒 $\omega(\text{Hg})$ 最高分别达到了 66.7 、 53.6 和 $83.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过限值 5~8 倍;黔东南州和遵义市籽粒 $\omega(\text{Hg})$ 最高分别为 $25.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $27.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,略高于国家食品卫生限制标准;无样品超过《饲料卫生标准》(GB 13078-2017)总 Hg 限值。因此个别籽粒 Hg 含量较高的县区,玉米的直接食用存在一定的风险,将其作为饲料,可保证玉米的安全生产。

依据各地区籽粒 Hg 含量几何均值,未见籽粒

Hg 含量超标,但铜仁市、黔东南州和安顺市变异系数均大于1,属于极高变异水平,可知不同地区籽粒 Hg 含量差异大.结合籽粒 Hg 含量在空间上的分布(图5),可知籽粒 Hg 含量超标的情况主要分布在铜仁市万山区和安顺市西秀区等工矿业活动区周围;此外,籽粒 $\omega(\text{Hg})$ 在 $15 \sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间的点位有4个,主要分布于铜仁市万山区、黔南州独山县和

毕节市大方县;在 $20 \sim 60 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间的点位有7个,主要分布于安顺市西秀区、铜仁市碧江区和黔南州瓮安县;大于 $60 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的点位有4个,主要分布于安顺市西秀区和铜仁市万山区,这些地区均有矿业开采冶炼活动.由此可推测,在工矿业活动丰富的地区周围种植玉米,其 Hg 含量超标的可能性较大.

表5 贵州省玉米籽粒 Hg 含量特征

Table 5 Characteristics of Hg content in maize grains in Guizhou Province						
采样区	N ¹⁾	范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术平均值 $\pm$ 标准差 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	超标率 /%
安顺市	123	0.981 ~ 66.7	5.52 ± 6.70	4.50	1.21	3.25
毕节市	221	1.46 ~ 92.6	6.36 ± 6.29	5.57	0.989	0.452
贵阳市	83	2.26 ~ 11.1	4.94 ± 1.52	4.75	0.308	0
六盘水市	27	3.16 ~ 6.83	4.99 ± 0.878	4.91	0.176	0
黔东南州	41	1.58 ~ 53.6	5.57 ± 7.84	4.35	1.41	2.44
黔南州	86	4.71 ~ 25.7	8.04 ± 2.69	7.74	0.334	1.16
黔西南州	156	0.196 ~ 9.98	3.67 ± 1.84	3.15	0.500	0
铜仁市	129	0.0943 ~ 83.3	6.66 ± 9.64	4.49	1.46	2.33
遵义市	124	0.786 ~ 27.2	5.80 ± 3.20	5.05	0.552	0.780
贵州省	990	0.0943 ~ 92.6	5.76 ± 5.73	4.77	0.996	1.11

1) N 表示采样点个数

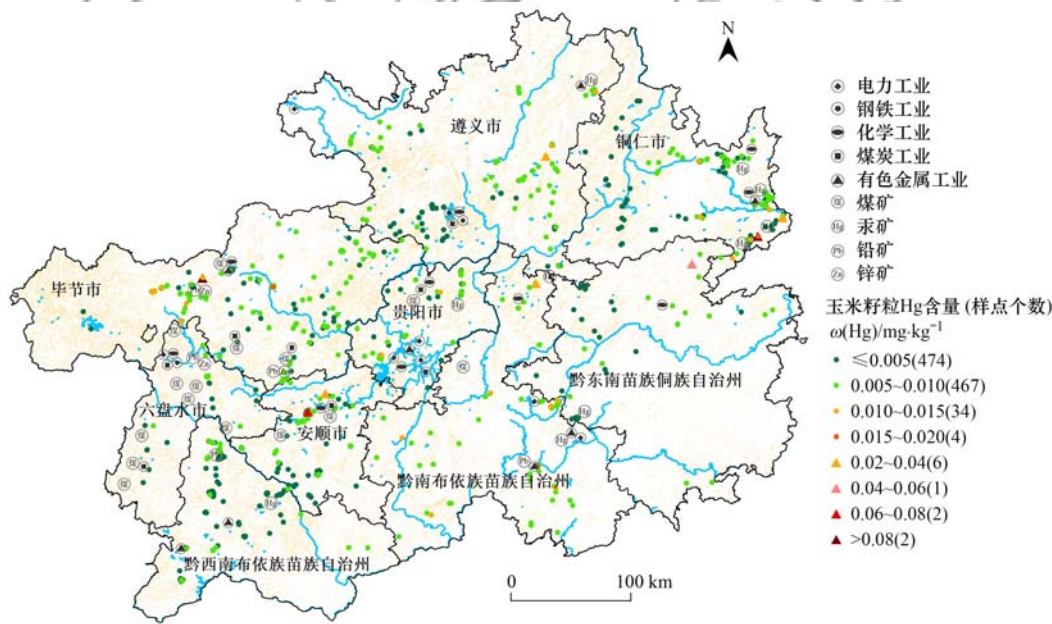


图5 贵州省玉米籽粒 Hg 含量分布

Fig. 5 Distribution of mercury content in maize grains in Guizhou Province

2.5 玉米 Hg 含量与土壤各指标相关性分析

通过表6可知,土壤 Hg 含量与 pH、SOM 和 CEC 之间达到显著性水平 ($P < 0.05$,下同),Huljev^[23]和 Kerndorff 等^[24]发现 Hg 与腐殖质的亲和性随 pH 的升高而降低,pH 越高,吸附量越小.贵州省土壤 pH 主要呈中性, $\omega(\text{SOM})$ 几何均值为 $27.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,可见贵州省土壤的固 Hg 能力主要是依靠有机质对 Hg 的吸附;黔东南州的土壤 pH 和 SOM 均为最低,活化率却为最高,黔西

南州的土壤 pH 仅高于黔东南州,SOM 在各地区最高,活化率仅为黔东南州的 1/8,也说明了这一点.

土壤有效态 Hg 与 pH 和 SOM 均为显著负相关,在一定范围内,土壤 pH 对 Hg 的吸附-解吸过程影响较大,pH 的升高导致土壤胶体表面的负电荷开始增加,专性吸附的能力增强和土壤有机质与 Hg 的络合能力增加,稳定性升高,不利于解吸反应的进行,进而导致土壤中 Hg 的解吸量下降^[19,25],

证明可以通过调节土壤 pH 来降低土壤有效态 Hg 含量；土壤有效态 Hg 与 CEC 均为负相关,说明当土壤肥沃和保肥能力较高时,其结合重金属的能力较强,能保护植株免受重金属胁迫^[26]。

表 6 各项测定指标相关系数¹⁾

Table 6 Correlation coefficient of each measurement index					
	pH	ln SOM	ln CEC	ln THg	ln AHg
ln SOM	-0.112 **				
ln CEC	0.360 **	0.368 **			
ln THg	0.066 *	0.136 **	0.095 **		
ln AHg	-0.044 **	-0.072 *	-0.382 **	0.141 **	
ln GHg	0.026	0.037	0.073 *	-0.016	-0.009

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

由于样本量较大且土壤环境复杂,除 CEC,未见籽粒 Hg 含量与其他指标存在显著相关性,因此采取偏相关和对不同指标分级的方法来进行籽粒 Hg 含量与土壤各项指标的相关性分析.由表 7 可知,在不同的控制因素下,籽粒 Hg 含量与土壤 Hg 含量均呈现显著正相关($P < 0.05$),与土壤有效态 Hg 含量均无显著相关性,可见,土壤 Hg 化学有效

态不能很好地表征玉米籽粒吸收 Hg 能力的强弱;由表 8 可知,仅当 $6.5 \leq \text{pH} < 7.5$ 时,籽粒 Hg 含量与土壤有效态 Hg 含量呈现显著相关($P < 0.01$);当 CEC 大于 $10 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,籽粒 Hg 与土壤 Hg 呈现显著相关($P < 0.05$);对于不同范围 SOM,籽粒 Hg 与土壤 Hg 和土壤有效态 Hg 均无显著相关性.

表 7 籽粒 Hg 含量与土壤各项指标偏相关分析¹⁾

Table 7 Partial correlation analysis between Hg content in grains and soil indexes						
控制变量 ²⁾	指标	pH	ln SOM	ln CEC	ln THg	ln AHg
pH	ln GHg	—	0.048	0.005	0.078 *	-0.003
ln SOM		0.029	—	0.001	0.079 *	-0.011
ln CEC		0.019	0.042	—	0.080 *	-0.007
ln THg		0.016	0.044	0.015	—	-0.030
ln AHg		0.021	0.045	0.013	0.084 **	—

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$; 2) 在不同控制变量下,玉米籽粒 Hg 含量对数转化与各项指标的相关系数,如 pH 作为控制变量时经对数转化后,籽粒 Hg 含量与土壤有机质含量的相关系数为 0.048

表 8 不同分类下籽粒 Hg 含量与土壤各项指标相关性¹⁾

Table 8 Correlation between grain Hg content and soil indexes under different classifications							
分组 ²⁾	$N^{3)}$	指标	pH	ln SOM	ln CEC	ln THg	ln AHg
pH ≤ 5.5	86	ln GHg	0.047	-0.076	-0.021	-0.059	0.013
$5.5 < \text{pH} \leq 6.5$	166		0.098	-0.028	0.021	-0.113	0.058
$6.5 < \text{pH} \leq 7.5$	353		-0.049	0.059	0.018	0.064	0.137 *
pH > 7.5	385		-0.031	0.091	0.159 **	-0.059	-0.083
CEC ≤ 10	280	ln GHg	0.031	0.027	0.022	0.015	-0.005
$10 < \text{CEC} \leq 20$	480		-0.387 **	0.049	-0.146 **	0.277 **	0.010
CEC > 20	230		0.025	-0.064	-0.198 **	-0.135 *	-0.018
$\omega(\text{SOM}) \leq 2$	163	ln GHg	-0.056	0.034	-0.004	-0.145	-0.052
$2 < \omega(\text{SOM}) \leq 3$	380		0.057	-0.009	-0.026	0.030	-0.011
$3 < \omega(\text{SOM}) \leq 4$	307		-0.067	0.152 **	0.161 **	0.051	0.033
$\omega(\text{SOM}) > 4$	140		0.233 **	-0.335 **	0.192 *	-0.165	-0.028

1) 如有 86 个土壤样品 pH ≤ 5.5 ,其对应的玉米样品 Hg 含量经对数转化后与 pH 的相关系数为 0.047; ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$; 2) CEC 单位为 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{SOM})$ 单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 3) N 表示样本数量

3 讨论

土壤中的 Hg 来源可分为自然源和人为源,自然源来自成土母质及大气沉降(不考虑人为引入的部分);人为源主要有有色金属冶炼、燃煤电厂和水泥生产等^[27,28].结合图 3 和图 4,对比土壤 Hg 超

标情况和工矿业分布情况可知,工业生产是导致土壤 Hg 污染的主要原因.汞矿、铅锌矿和煤矿的开采冶炼及使用等工矿业活动会产生大量的含 Hg 废渣和废水,由于原料中 Hg 含量不同,废渣 $\omega(\text{Hg})$ 可达 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,废水 $\rho(\text{Hg})$ 可达 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[29~32],废渣露天堆放,废水随意排放等不当行为,都会造成

土壤 Hg 污染. 当大量含 Hg 废水流入地表河流会导致矿区水生系统 Hg 污染, 有研究显示贵州 Hg 矿区地表河流受炉渣废水的影响, 其 $\rho(\text{Hg})$ 可达 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ [33, 34].

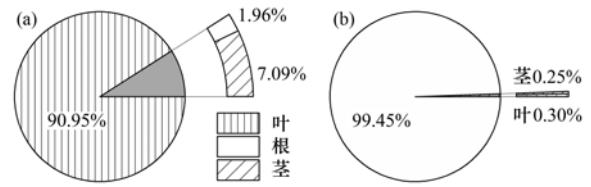
大气 Hg 的干湿沉降是土壤 Hg 含量超标的主要原因之一. 大气中 Hg 的存在形态主要分为气态元素 Hg、活性气态 Hg 和颗粒态 Hg, 后两者可通过干湿沉降影响土壤 Hg 含量 [35], 这与王定勇等 [36] 研究发现相符, 土壤 Hg 含量与大气 Hg 含量呈显著正相关, 相关系数为 0.741. 随人类科技的发展, 大气 Hg 含量较工业革命前增加了约 3 倍 [37]. 同时已经被土壤固定的 Hg 还可再被释放出来, 一方面是土壤去气作用对土壤中单质 Hg 的影响 [35], 有研究指出, 我国的土壤 Hg 释放通量要显著高于国外同等类型地区 [38, 39], 调查表明贵州滥木厂汞矿区在停止生产活动 10a 后, 矿区表层土壤向大气的 Hg 释放量仍高达 $10\,500 \text{ ng} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ [40]; 另一方面是土壤中活性 Hg^{2+} 的光致还原作用, 能增加近地表大气 Hg 浓度, 已有研究表明大气 Hg 释放通量与土壤 Hg 含量和光照强度呈显著正相关性 [35]. 另外, 温度和微生物活性对土壤 Hg 的释放也均有影响.

植物-土壤系统的 Hg 交换及植物叶片-大气界面的 Hg 交换, 是导致植物体内的 Hg 含量变化的主要原因.

植物-土壤系统的 Hg 交换主要受两方面影响, 一是来自土壤中重金属有效态含量的影响, 重金属有效态作为植物极易利用积累的一种形态, 能直接影响植物体内重金属的含量 [41], 贵州省旱地有效态 Hg 含量低, 活化率低于 1%, 对植物的毒害作用小, 降低了籽粒 Hg 含量超标率; 二是来自植物自身调节系统的影响, 玉米作为低富集作物, 其对 Hg 的富集低于 Cd、Ni、Pb 和 Zn 等重金属元素 [42, 43], Greger 等 [44] 研究发现植物从土壤吸收的 Hg 向地上部位迁移占比很低 (0.17% ~ 2.5%), 这进一步降低籽粒 Hg 含量超标的可能, 也是“土超籽粒不超”情况出现的主要原因.

植物叶片-大气界面的 Hg 交换是玉米籽粒 Hg 含量超标的主要原因. 朱宗强等 [45] 的研究发现玉米从大气吸收的 Hg, 90.95% 分布于叶片中, 7.09% 分布在茎中, 仅有 1.96% 分布于根中 [图 6(a)], 且植物叶片 Hg 的沉降通量与大气 Hg 浓度呈显著正相关 ($R^2 = 0.995$), Cui 等 [46] 的研究发现玉米从土壤中吸收的 Hg, 98% 以上都积累在根部, 进入地上部分的 Hg 占比不足 2% [图 6(b)]. 植株生长发育的过程中茎叶中的重金属可向籽粒迁移, 由此可知大气 Hg 浓度是玉米籽粒 Hg 含量的主要影响因素,

这也是土壤各项指标与玉米籽粒 Hg 含量相关性不显著的主要原因. 图 4 中“土不超籽粒超”样品主要分布于工矿业地区周围, 也说明了这些地区种植的玉米可不断富集来自大气和灌溉水中的 Hg, 最终导致籽粒 Hg 含量超标.



(a) 玉米从大气吸收的 ^{202}Hg 在其体内的分布, (b) 玉米从地下吸收的 ^{198}Hg 在其体内的分布; 改自文献[40, 41]

图 6 玉米吸收的 Hg 在其体内的分布

Fig. 6 Distribution of mercury in maize root, stem, and leaf

本研究主要讨论了贵州省旱地-玉米系统中无机 Hg 含量的分布情况, 但实际生产生活中, Hg 能从土壤迁移到大气和水体中, 经干湿沉降和生物作用, 影响范围增大的同时还能转化为毒性更强的有机汞, 已有研究表明, 贵州 Hg 矿区居民受到了 Hg 的严重暴露, 当地居民头发中 $\omega(\text{Hg})$ 均值为 $5.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [36]. 但本文并未涉及该部分内容, 存在一定的局限性. 因此对于贵州省旱地-玉米系统污染程度认定是一种保守的估计, 但可为贵州省粮食安全生产的进一步研究科学依据. 总体而言, 工矿业活动区的土壤与玉米均有 Hg 超标的可能, 不建议直接食用铜仁市万山区、碧江区和松桃县、遵义市务川县、黔东南州丹寨县、贵阳市清镇市和开阳县、安顺市西秀区和毕节市七星关区等工矿业活动区域周围种植的玉米, 可将其作为饲料投入生产; 同时要密切关注工矿业区周围居民的 Hg 暴露风险.

4 结论

(1) 贵州省旱地土壤主要呈中性或碱性, 有机质含量多集中在二类或三类, 土壤保肥能力中等, 适宜耕作.

(2) 土壤 $\omega(\text{Hg})$ 为 $0.632 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Hg}$ 有效态) 为 $0.654 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 基于农地土壤风险管控标准 (GB 15618-2018) 中的风险筛选值, 贵州省旱地土壤样点 Hg 超标率为 7.22%; 汞矿开采冶炼地区 (铜仁市万山区、碧江区、松桃县、遵义市务川县、黔东南州丹寨县、贵阳市清镇市和开阳县) 存在土壤重度 Hg 污染情况; 煤、铅锌工矿业地区 (安顺市、毕节市和黔西南州) 也存在不同程度 Hg 污染, 需要警惕工矿业地区居民具有 Hg 暴露风险.

(3) 玉米籽粒 $\omega(\text{Hg})$ 为 $4.77 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 基于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-

2017), 贵州省玉米籽粒样点超标率为 1.11%, 无样品 Hg 含量超过《饲料卫生标准》(GB 13078-2017) 的 Hg 限值。由于超标点位多位于工矿业地区(铜仁市万山区、安顺市西秀区和毕节市七星关区), 不建议直接食用工矿业地区周围种植的玉米, 可将其作为饲料投入生产。

参考文献:

- [1] 鲁洪娟, 倪吾钟, 叶正钱, 等. 土壤中汞的存在形态及过量汞对生物的不良影响[J]. 土壤通报, 2007, **38**(3): 597-600.
- Lu H J, Ni W Z, Ye Z Q, *et al.* Mercury form in soil and the effect of excessive mercury on plants and human beings[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, **38**(3): 597-600.
- [2] 喻建, 马捷, 路俊刚, 等. 压汞—恒速压汞在致密储层微观孔喉结构定量表征中的应用——以鄂尔多斯盆地华池—合水地区长 7 储层为例[J]. 石油实验地质, 2015, **37**(6): 789-795.
- Yu J, Ma J, Lu J G, *et al.* Application of mercury injection and rate-controlled mercury penetration in quantitative characterization of microscopic pore structure of tight reservoirs: a case study of the Chang7 reservoir in Huachi-Heshui area, the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, **37**(6): 789-795.
- [3] 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.
- Wu Q. Application and design of amalgam in ultraviolet lamp[J]. China Light & Lighting, 2021, (12): 9-15.
- [4] 贵州省自然资源厅. 矿产资源储量数据[EB/OL]. <http://www.minecloud.com.cn/ui/index/indexBigData.jsp?type=2>, 2019-12-31.
- [5] Horvat M, Nolde N, Fajon V, *et al.* Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China[J]. Science of the Total Environment, 2003, **304**(1-3): 231-256.
- [6] Li P, Feng X B, Shang L H, *et al.* Mercury pollution from artisanal mercury mining in Tongren, Guizhou, China[J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(8): 2055-2064.
- [7] Qiu G L, Feng X B, Wang S F, *et al.* Mercury and methylmercury in riparian soil, sediments, mine-waste calcines, and moss from abandoned Hg mines in east Guizhou Province, Southwestern China[J]. Applied Geochemistry, 2005, **20**(3): 627-638.
- [8] Qiu G L, Feng X B, Wang S F, *et al.* Environmental contamination of mercury from Hg-mining areas in Wuchuan, northeastern Guizhou, China[J]. Environmental Pollution, 2006, **142**(3): 549-558.
- [9] Qiu G L, Feng X B, Wang S F, *et al.* Mercury contaminations from historic mining to water, soil and vegetation in Lanmuchang, Guizhou, Southwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **368**(1): 56-68.
- [10] 贾亚琪, 刘文政, 秦俊虎, 等. 汞矿区土壤和农产品重金属污染状况及风险评估[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021, (3): 43-50.
- Jia Y Q, Liu W Z, Qin J H, *et al.* Pollution and risk assessment of heavy metals in soil and agricultural products around mercury mining areas[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021, (3): 43-50.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [14] 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.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 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.
- [18] 陈默涵, 何腾兵, 黄会前. 贵州地形地貌对土壤类型及分布的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, **33**(5): 14-16, 35.
- Chen M H, He T B, Huang H Q. The effect of landform on the types and distribution of soils in Guizhou[J]. Journal of Guizhou University(Natural Sciences), 2016, **33**(5): 14-16, 35.
- [19] 杨国治, 夏家琪, 戎捷. 土壤中汞的固定与释放的初步研究[J]. 土壤学报, 1979, (1): 38-43.
- Yang G Z, Xia J Q, Rong J. A preliminary study on the fixation and release of mercury in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1979, (1): 38-43.
- [20] Gabriel M C, Williamson D G. Principal biogeochemical factors affecting the Speciation and transport of mercury through the terrestrial environment[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, **26**(3-4): 421-434.
- [21] Jiang G B, Shi J B, Feng X B. Mercury pollution in China[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(12): 3672-3678.
- [22] 惠霖霖, 张磊, 王祖光, 等. 中国燃煤电厂汞的物质流向与汞排放研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2241-2250.
- Hui M L, Zhang L, Wang Z G, *et al.* The mercury mass flow and emissions of coal-fired power plants in China[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2241-2250.
- [23] Huljev D J. Interaction of some metals between marine-origin humic acids and aqueous solutions[J]. Environmental Research, 1986, **40**(2): 470-478.
- [24] Kerndorff H, Schnitzer M. Sorption of metals on humic acid[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, **44**(11): 1701-1708.
- [25] 王磊, 胡超超, 李一夫, 等. 重金属汞在土壤中的吸附解吸特性研究[J]. 四川环境, 2017, **36**(6): 1-7.
- Wang L, Hu C C, Li Y F, *et al.* Research on adsorption and desorption characteristics of mercury in soil[J]. Sichuan Environment, 2017, **36**(6): 1-7.
- [26] 余贵芬, 青长乐, 牟树森, 等. 汞在腐殖酸上的吸附与解吸特征[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(5): 601-606.
- Yu G F, Qing C L, Mou S S, *et al.* Characteristics of mercury adsorption and desorption on humic acids[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, **21**(5): 601-606.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 段宏志. 锌冶炼污水处理工艺改进实践[J]. *中国有色冶金*, 2017, **46**(2): 57-60.
Duan H Z. Practice of zinc smelting waste acid treatment process improvement [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2017, **46**(2): 57-60.
- [30] 唐念, 盘思伟. 大型煤粉锅炉汞的排放特性和迁移规律研究[J]. *燃料化学学报*, 2013, **41**(4): 484-490.
Tang N, Pan S W. Study on mercury emission and migration from large-scale pulverized coal-fired boiler [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2013, **41**(4): 484-490.
- [31] 王起超, 马如龙. 煤及其灰渣中的汞[J]. *中国环境科学*, 1997, **17**(1): 78-81.
Wang Q C, Ma R L. The mercury in coal and its cinder [J]. *China Environmental Science*, 1997, **17**(1): 78-81.
- [32] 殷立宝, 高正阳, 钟俊, 等. 燃煤电厂脱硫石膏汞形态及热稳定性分析[J]. *中国电力*, 2013, **46**(9): 145-149.
Yin L B, Gao Z Y, Zhong J, *et al.* Analysis of mercury species and thermal stability of desulphurized gypsum in coal-fired boiler [J]. *Electric Power*, 2013, **46**(9): 145-149.
- [33] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. *化学进展*, 2009, **21**(2-3): 436-457.
Feng X B, Qiu G L, Fu X W, *et al.* Mercury pollution in the environment [J]. *Progress in Chemistry*, 2009, **21**(2-3): 436-457.
- [34] 梁隆超. 西南喀斯特煤矿区汞的表生环境地球化学研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
Liang L C. Supergene environmental geochemistry of mercury in karst coal mining areas, Southwest China [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [35] 仇广乐. 贵州省典型汞矿地区汞的环境地球化学研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2005.
Qiu G L. Environmental geochemistry of mercury in typical Hg-mined areas, Guizhou Province [D]. Beijing: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [36] 王定勇, 石孝洪, 杨学春. 大气汞在土壤中转化及其与土壤汞富集的相关性[J]. *重庆环境科学*, 1998, **20**(5): 22-25.
Wang D Y, Shi X H, Yang X C. Transformation of atmospheric mercury in soil and its influence on the accumulation of mercury in soil [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1998, **20**(5): 22-25.
- [37] 冯新斌, 陈玖斌, 付学吾, 等. 汞的环境地球化学研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, **32**(5): 503-530.
Feng X B, Chen J B, Fu X W, *et al.* Progresses on environmental geochemistry of mercury [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, **32**(5): 503-530.
- [38] 谭清友, 付学吾, 何天容. 我国自然源汞排放研究进展[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(3): 833-845.
Tan Q Y, Fu X W, He T R. Mercury emission from natural sources in China: a critical review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(3): 833-845.
- [39] 李杰颖. 污染土壤中汞的形态特征及其释放的初步研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [40] Wang S, Feng X, Qiu G, *et al.* Mercury emission to atmosphere from Lanmuchang Hg-Tl mining area, southwestern Guizhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(39): 7459-7473.
- [41] 王凌, 张国印, 张小龙, 等. 蔬菜土壤重金属生物有效性及有效态与全量相关性研究[J]. *华北农学报*, 2011, **26**(S1): 85-88.
Wang L, Zhang G Y, Zhang X L, *et al.* Study on the bioavailability of heavy metal and correlation between the available concentration and the total in vegetable soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, **26**(S1): 85-88.
- [42] 陆素芬, 张云霞, 余元元, 等. 广西南丹土壤-玉米重金属积累特征及其健康风险[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, **33**(8): 706-714.
Lu S F, Zhang Y X, Yu Y Y, *et al.* Characteristics of heavy metal accumulation in soil-corn system contents and their health risks in Nandan, Guangxi [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, **33**(8): 706-714.
- [43] 周浪, 张云霞, 徐启琳, 等. 铜仁市土壤-玉米重金属含量及其健康风险[J]. *环境化学*, 2021, **40**(1): 213-222.
Zhou L, Zhang Y X, Xu Q C, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil-corn system of Tongren, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(1): 213-222.
- [44] Greger M, Wang Y, Neuschütz C. Absence of Hg transpiration by shoot after Hg uptake by roots of six terrestrial plant species [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **134**(2): 201-208.
- [45] 朱宗强, 王训, 王衡, 等. 单一汞同位素示踪大气与农田作物汞的交换过程[J]. *环境化学*, 2018, **37**(3): 419-427.
Zhu Z Q, Wang X, Wang H, *et al.* Mercury exchange process between crop foliage and atmosphere by using single mercury isotope [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(3): 419-427.
- [46] Cui L W, Feng X B, Lin C J, *et al.* Accumulation and translocation of ^{198}Hg in four crop species [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, **33**(2): 334-340.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwlun Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)