

目次

“大气十条”实施期间南京市PM<sub>2.5</sub>化学组成与来源的演变特征 ..... 陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位PM<sub>2.5</sub>组分差异 ..... 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 ..... 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)

天津市采暖季不同气团来向PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 ..... 邓文博, 刘文娟 (38)

北京市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>复合污染数值响应解析 ..... 刘添强 (48)

长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 ..... 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李旻, 王鑫, 黄成 (58)

南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征 ..... 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)

广西柳城县VOCs组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 ..... 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)

城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 ..... 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)

华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征 ..... 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)

WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用 ..... 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)

西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 ..... 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 ..... 魏文淑, 祁建华, 常成 (127)

中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 ..... 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)

长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 ..... 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金宇辰, 李鑫 (158)

人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共线性 ..... 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)

我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 ..... 何姝, 董慧峰, 任南琪 (180)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 ..... 王思瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 ..... 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)

长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 ..... 吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 ..... 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)

渭河微塑料污染现状与风险评价 ..... 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 ..... 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)

苦草叶表附和浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 ..... 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)

基于16S rRNA测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 ..... 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)

基于eDNA的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 ..... 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)

三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 ..... 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)

自然降雨下蔬菜土壤侵蚀及氮素流失特征 ..... 宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重, 张文龙, 李华林 (303)

基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析 ..... 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)

2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究 ..... 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)

青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 ..... 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)

四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 ..... 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)

宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 ..... 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进福, 梁翔宇 (356)

铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价 ..... 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 ..... 凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)

外源Cd在不同类型土壤中的稳定化特征 ..... 王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 ..... 王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)

基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 ..... 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)

贵州省旱地土壤和玉米As含量特征及其种植安全性评估 ..... 黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 ..... 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)

1株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 ..... 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄蔚铭, 张朴心, 铁柏清 (436)

黄土陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 ..... 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (444)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 ..... 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)

优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益 ..... 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 ..... 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)

黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 ..... 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)

红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 ..... 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)

半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 ..... 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)

基于QMEC分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 ..... 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)

中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析 ..... 于滨杭, 姬建梅, 王丽宇, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)

生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的Meta分析 ..... 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)

不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 ..... 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)

中国县城碳排放时空演变与异质性 ..... 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)

近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 ..... 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)

中国1991~2018年突发环境事件时空特征及影响因素 ..... 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)

季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 ..... 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

# 贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估

黄凤艳<sup>1</sup>, 周浪<sup>1</sup>, 宋波<sup>1,2\*</sup>, 庞瑞<sup>1</sup>, 吴勇<sup>1</sup>, 王佛鹏<sup>1</sup>, 张云霞<sup>1</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:** 为了解贵州省旱地土壤和玉米籽粒 As 含量分布特征, 并评估其玉米种植的安全性, 采集自然土壤样品 468 个, 旱地表层土壤样品 1260 个, 相应玉米籽粒样品 980 个, 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旱地土壤  $\omega(\text{As})$  范围为 0.35 ~ 758.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 几何平均值为 23.28  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 经独立样本  $T$  检验, 贵州省旱地土壤的  $\omega(\text{As})$  显著高于自然土壤的 21.29  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $P < 0.05$ ), 表明旱地土壤存在 As 累积效应; 与《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 筛选值相比, 土壤样品超标率为 33.81%. ②玉米籽粒  $\omega(\text{As})$  范围为 0.001 ~ 0.868  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 几何平均值为 0.064  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 0.61% 的玉米籽粒样品超过《食品中污染物限量》(GB 2762-2017) 的限值, 超标点位分布于毕节市、黔西南州和铜仁市. ③将玉米籽粒作为饲料和粮食使用时, 贵州省旱地土壤均可以安全种植玉米. 研究表明贵州省旱地土壤 As 污染较严重, 整体上可实现玉米安全种植, 但涉 As 有色金属矿区周边种植玉米需要加以关注.

**关键词:** 贵州省; 土壤-玉米; 砷污染; 安全种植; 评估

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0415-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202092

## Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province

HUANG Feng-yan<sup>1</sup>, ZHOU Lang<sup>1</sup>, SONG Bo<sup>1,2\*</sup>, PANG Rui<sup>1</sup>, WU Yong<sup>1</sup>, WANG Fu-peng<sup>1</sup>, ZHANG Yun-xia<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to understand the distribution characteristics of As content in dryland soils and maize seeds in Guizhou province and to evaluate the safety of maize cultivation, 468 natural soil samples, 1260 dryland surface soil samples, and 980 corresponding maize seed samples were systematically collected to determine their As content and basic physicochemical properties. The degree of contamination of the samples was evaluated by using the single-factor contamination index method. The results showed that: ① the range of  $\omega(\text{As})$  in dryland soil was 0.35-758.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with a geometric mean of 23.28  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The independent sample  $T$ -test showed that the As content of dryland soil in Guizhou province was significantly higher than that of natural soil  $\omega(\text{As})$  21.29  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $P < 0.01$ ), indicating the existence of arsenic accumulation effects in dryland soil; compared with the screening value of the "Agricultural Land Soil Pollution Risk Management and Control Standard" (GB 15618-2018), the excess rate of soil samples was 33.81%. ② Corn seed  $\omega(\text{As})$  ranged from 0.001 to 0.868  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with a mean value of 0.064  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and 0.61% of the corn seed samples exceeded the limit value of "Limits of Contaminants in Foods" (GB 2762-2017), with the exceeding points distributed in Bijie City, Qianxinan Prefecture, and Tongren City. ③ When corn seeds were used as feed and grain, maize could be safely grown in dryland soils in Guizhou province. This study showed that the soil As pollution in the dryland of Guizhou province was relatively serious, and overall safe maize cultivation can be achieved; however, the cultivation of maize around the As-related non-ferrous metal mining areas is still of concern.

**Key words:** Guizhou province; soil-corn; As contamination; safe planting; assessment

近年来,随着含砷(As)金属矿石的不断开采,化石燃料的燃烧和工农业中含砷化合物的应用等<sup>[1-3]</sup>,使得众多地区土壤 As 污染日益严重.在孟加拉国、西孟加拉邦、阿根廷和越南等国家因砷污染导致几千万人受到不同程度的毒害<sup>[2,4,5]</sup>;我国湖南<sup>[6]</sup>、云南<sup>[7,8]</sup>和广西<sup>[9]</sup>等地也因砷污染出现了典型的地方砷污染中毒现象. As 是一种有毒类金属元素,为 I 类致癌物质<sup>[10,11]</sup>,其大多以硫化物的形式存在于金、铜、铅、锌和锡等矿中<sup>[12]</sup>,常见的含 As 矿物如毒砂( $\text{FeAsS}$ )、砷铁矿( $\text{FeAs}_2$ )、雄黄( $\text{As}_2\text{S}_2$ )和雌黄( $\text{As}_2\text{S}_3$ )等<sup>[13]</sup>. As 暴露对人体皮肤和神经系统等均产生危害,甚至导致癌变<sup>[11]</sup>. 随着

人们对其潜在毒性的不断认识,越来越多人重视土壤中 As 元素的含量、污染特征和种植在含 As 土壤上的农作物的安全性.有研究探讨了北京和湖南郴州等地的菜园土壤和蔬菜 As 污染情况<sup>[3,14]</sup>,分析蔬菜的食用安全性,说明含 As 蔬菜对部分人群存在一定的健康风险.朱晓龙等<sup>[15]</sup>发现湘中某工矿区耕地土壤、水稻和蔬菜均存在不同程度的砷污染,对人体健康存在较大的潜在风险.贵州作为我国矿产资

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600)

作者简介: 黄凤艳(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: 1947591506@qq.com

\* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

源最为丰富的省份之一,其煤炭储量大,素有“江南煤海”之称<sup>[16]</sup>,据报道,贵州西南部许多地区存在含砷过量的高砷煤<sup>[17-19]</sup>.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.

玉米是贵州省第二大主要粮食作物,其不仅是一种粮食和饲料,也是一种经济作物<sup>[20]</sup>,在全省粮食生产和经济发展中有着举足轻重的作用.因此,有必要了解贵州省旱地土壤和玉米As含量的整体情况.陈凤等<sup>[21]</sup>研究表明贵州省某典型锌冶炼区的耕地土壤和主要谷类农作物(稻米、玉米和小麦)均有重金属超标现象,部分作物存在食用健康风险.杨金秀等<sup>[22]</sup>调查结果显示,燃煤电厂周围环境中土壤As含量出现一定程度的富集,玉米粒样品超标率为22.20%,出现明显的As污染现象.周浪等<sup>[23]</sup>研究显示贵州铜仁市土壤中Cu、As和Hg超标较为严重,玉米籽粒存在Cd和Pb超标但不会对居民的健康造成明显影响.在以上研究中,研究区范围相对较小和样本量较少,因此有必要进一步开展更为系统的调查.本文通过对贵州省旱地土壤和玉米籽粒的调查,明确其As含量特征,通过单因子污染指数法对其进行As污染评价,揭示贵州省旱地土壤和玉米籽粒As的污染分布状况,并探讨贵州省玉米的种植安全性,以期旱地土壤污染防治工作、农产品质量安全和种植安全等提供理论参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贵州省地处我国西南部东经103°36′~109°35′,北纬24°37′~29°13′之间,全省管辖贵阳、六盘水、遵义、安顺、毕节和铜仁这6个地级市,黔东南、黔南和黔西南这3个民族自治州.全省地势西高东低,自中部向北、东和南三面倾斜.地貌以高原和山地居多,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%<sup>[24]</sup>.贵州省属亚热带湿润季风气候区,年气温变化小,大部分地区年平均气温为15℃左右,雨季明显,年降水为1100~1300 mm,适宜发展粮食作物和经济作物<sup>[25]</sup>.

### 1.2 样品采集与前处理

样品采集于2018年7~9月,共采集自然土壤样品468个,旱地土壤样品1260个,并同步采集与旱地土壤对应的980个玉米籽粒样品(图1).自然土壤样品尽可能于远离人类活动或受人类活动影响较小的山地或植被发育完好的地方进行采集.刨去表层枯枝落叶和腐殖质层,取10~30 cm土层.旱地土壤在矿业密集区和农业活动相对频繁的耕地进行加密采样,其余地区尽量使样点在整个面上均匀分布.旱地土壤采用五点采样法,每点取耕作层(0~20 cm)土壤1.0 kg,混合均匀后用四分法从中选取1.0 kg土壤作为该点样品,采集土壤样品时对应采

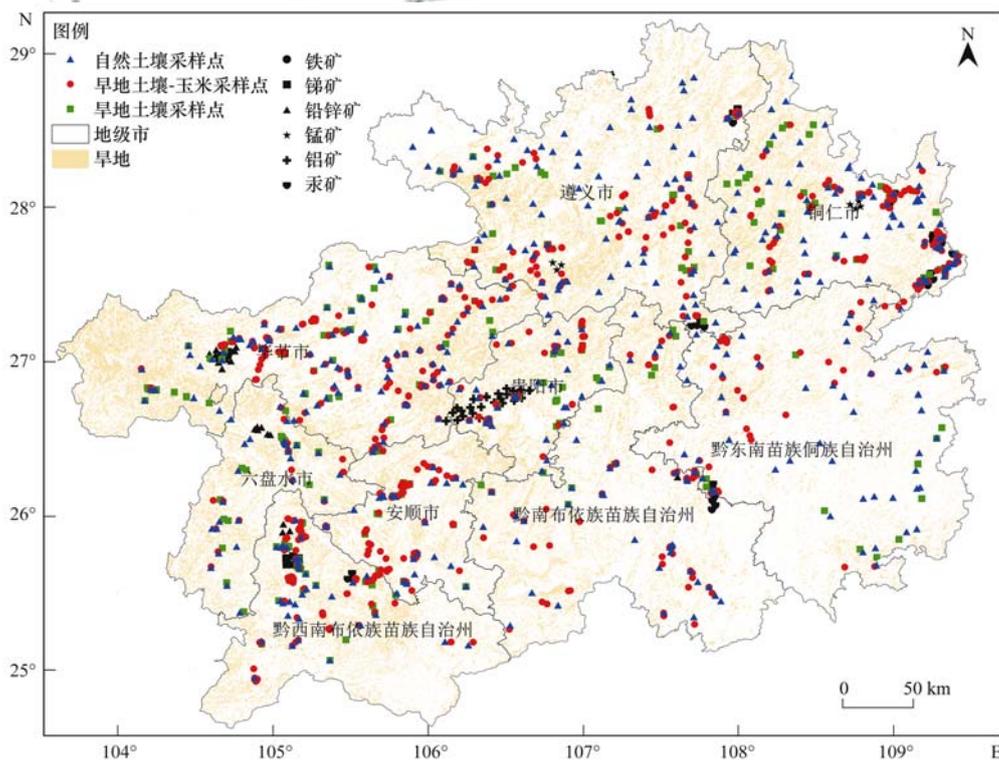


图1 研究区样点分布示意

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

集玉米样品,记好对应编号并利用 GPS 进行定位. 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 尼龙筛,将样品装于信封袋待分析. 玉米籽粒用超纯水洗净,自然晾干后放置于干燥箱中(80℃)烘干,用不锈钢打磨机粉碎后装袋待分析.

### 1.3 样品测定分析

实验室测定项目有土壤 pH、有机质、阳离子交换量、As 含量、As 有效态含量和玉米籽粒 As 含量. 土壤样品 pH 值测定采用土水比为 1:2.5 的 pH 电位法测定;土壤有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定;土壤阳离子交换量采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定;土壤和玉米籽粒样品的 As 含量测定用 1:1 王水水浴消解法<sup>[26]</sup>,由原子荧光分光光度计(AFS-9700)测定;土壤有效态 As 采用 10:1 液土比 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 溶液振荡提取<sup>[27]</sup>,由原子荧光形态分析仪(AFS-9700)测定;分析过程中加入土壤成分分析标准物质(GSS-4)、大米标准物质样品(GBW 100357)和空白进行质量控制,分析样品的重复数为 10%,相对误差结果在

±5% 以内. 标准物质中 As 的回收率均为 88%~103%. 分析过程所用试剂均为优级纯标准,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

采用 Excel 2016 对数据进行处理和 SPSS 23.0 对样本数据进行描述性统计分析,运用 Origin 2021b、R 和 ArcGIS 10.7 软件作图.

### 1.5 评价方法

(1)旱地土壤和玉米籽粒 As 污染评价均采用单因子污染指数法进行评价,公式如下:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, $P_i$  为土壤或玉米籽粒 As 的单因子污染指数; $C_i$  为土壤或玉米籽粒 As 的实测含量,mg·kg<sup>-1</sup>;  $S_i$  为 As 的评价标准值,mg·kg<sup>-1</sup>,旱地土壤采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中规定的土壤污染风险筛选值;玉米籽粒采用《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的食物中污染物限量值,污染分级标准见表 1.

表 1 单项污染指数分级标准

Table 1 Single-factor pollution index classification criteria

单因子污染指数	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$P_i > 3$
污染等级	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染

(2)玉米富集系数(BCF)是玉米籽粒中 As 含量与土壤中 As 含量的比值,用于评估玉米富集 As 的能力,公式如下:

$$BCF = C_g/C_s \quad (2)$$

式中,BCF 为富集系数,  $C_g$  为玉米籽粒中 As 含量,mg·kg<sup>-1</sup>,  $C_s$  为对应土壤中 As 含量,mg·kg<sup>-1</sup>. 该值越大,表明玉米籽粒对 As 的富集系数越强.

## 2 结果与分析

### 2.1 自然土壤 As 含量特征

研究区 468 个自然土壤样品的原始数据经对数转换后 As 含量近似于正态分布,采用几何平均值  $M$  和几何标准差  $D$  来表示其含量,并且剔除  $M/D^3 \sim MD^3$  范围以外的异常值<sup>[28]</sup>,得出有效统计数据 463 个,经对数转换后呈正态分布,用几何平均值表示数据分布的集中趋势,见表 2. 各地区自然土壤  $\omega(As)$  平均值分别为:安顺市(27.12 mg·kg<sup>-1</sup>)、毕节市(20.67 mg·kg<sup>-1</sup>)、贵阳市(29.43 mg·kg<sup>-1</sup>)、六盘水市(16.30 mg·kg<sup>-1</sup>)、黔东南州(18.09 mg·kg<sup>-1</sup>)、黔西南州(29.46 mg·kg<sup>-1</sup>)、黔南州(28.60 mg·kg<sup>-1</sup>)、铜仁市(18.71 mg·kg<sup>-1</sup>)和遵义

市(19.02 mg·kg<sup>-1</sup>);贵州省  $\omega(As)$  平均值为 21.29 mg·kg<sup>-1</sup>,与“七五”期间贵州省 A 层土壤 As 背景值<sup>[28]</sup>相比升高 33.03%. 经单样本  $T$  检验,研究区自然土壤 As 含量显著高于 A 层土壤 As 背景值( $P < 0.01$ );而研究结果与 C 层土壤 As 背景值<sup>[28]</sup>(21.3 mg·kg<sup>-1</sup>)相当. 土壤背景值反映土壤在不受污染或基本不污染的情况下,其原来固有的元素含量水平<sup>[28]</sup>,但人类活动的影响已无处不在,因此研究获得的自然土壤 As 背景值既包括自然背景部分,也可能包括少量外源部分;另外,不同采样点的土壤本身固有的差异、采样差异和分析差异等<sup>[29]</sup>也是导致本研究自然土壤 As 含量比贵州省土壤 As 背景值偏高的原因. 本研究从受人类活动较少的林地和山地等自然土壤中选取有关样点,样点空间分布均匀(图 1),其数量为前人研究中样点数的 9.26 倍(表 2),以此得出的统计参数具有更广泛的代表性. 因此,自然土壤  $\omega(As)$  几何平均值 21.29 mg·kg<sup>-1</sup> 可作为贵州省表层土壤 As 含量背景值.

### 2.2 旱地土壤基本理化性质统计分析

土壤有机质含量、阳离子交换量、As 有效态含量和 As 含量均符合对数正态分布,以几何均值来表

表 2 研究区自然土壤 As 含量统计分析<sup>1)</sup>

Table 2 Statistical analysis of natural soil As content in the study area

地区	样品数/个	范围/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术均值 $\pm$ 标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	几何平均值(标准差) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/%
安顺市	24	11.54 ~ 79.64	30.27 $\pm$ 15.29	27.12(1.610)	50.52
毕节市	85	2.96 ~ 88.01	25.08 $\pm$ 15.41	20.67(1.918)	61.43
贵阳市	30	7.67 ~ 102.8	37.66 $\pm$ 28.16	29.43(2.037)	74.78
六盘水市	28	4.25 ~ 128.7	21.28 $\pm$ 22.61	16.30(1.986)	106.3
黔东南州	51	6.65 ~ 80.20	22.62 $\pm$ 16.80	18.09(1.925)	74.25
黔南州	41	8.80 ~ 94.25	35.43 $\pm$ 22.35	29.46(1.867)	63.08
黔西南州	34	6.63 ~ 233.1	44.93 $\pm$ 50.79	28.60(2.539)	113.0
铜仁市	83	2.72 ~ 112.8	25.71 $\pm$ 20.16	18.71(2.345)	78.39
遵义市	87	6.15 ~ 79.72	23.58 $\pm$ 21.00	19.02(1.847)	89.04
总计	463	2.72 ~ 233.1	27.87 $\pm$ 24.31	21.29(2.067)	87.24
中国土壤元素背景值 <sup>[28]</sup>	50	5.6 ~ 75.5	20.0 $\pm$ 14.55	16.0(1.93)	72.75
差异/%		-67.61 ~ 51.43	-39.35	-33.06	

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  $\times$  100%

示其含量大小. 研究区旱地土壤基本理化性质统计结果见图 2, 贵州省旱地土壤 pH 值范围在 3.93 ~ 9.82 之间, 平均值为 7.04, 以中性偏弱碱性土壤为主, 变异系数为 13.25%, 属于弱变异水平. 土壤阳离子交换量范围为 0.09 ~ 47.23  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 11.73  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 属于中等保肥能力土壤, 适合农作物生长, 其变异系数为 55.60%, 属于中等变异水平. 土壤  $\omega$ (有机质) 范围为 5.21 ~ 164.1  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平

均值为 27.48  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其变异系数为 35.58%, 属于中等变异强度, 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属中等偏上水平, 说明土壤较为肥沃. 土壤  $\omega$ (As 有效态) 范围为 0.0004 ~ 4.40  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 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.

研究区土壤 As 含量统计结果见表 3, 贵州省旱地土壤样品  $\omega$ (As) 范围为 0.35 ~ 758.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,

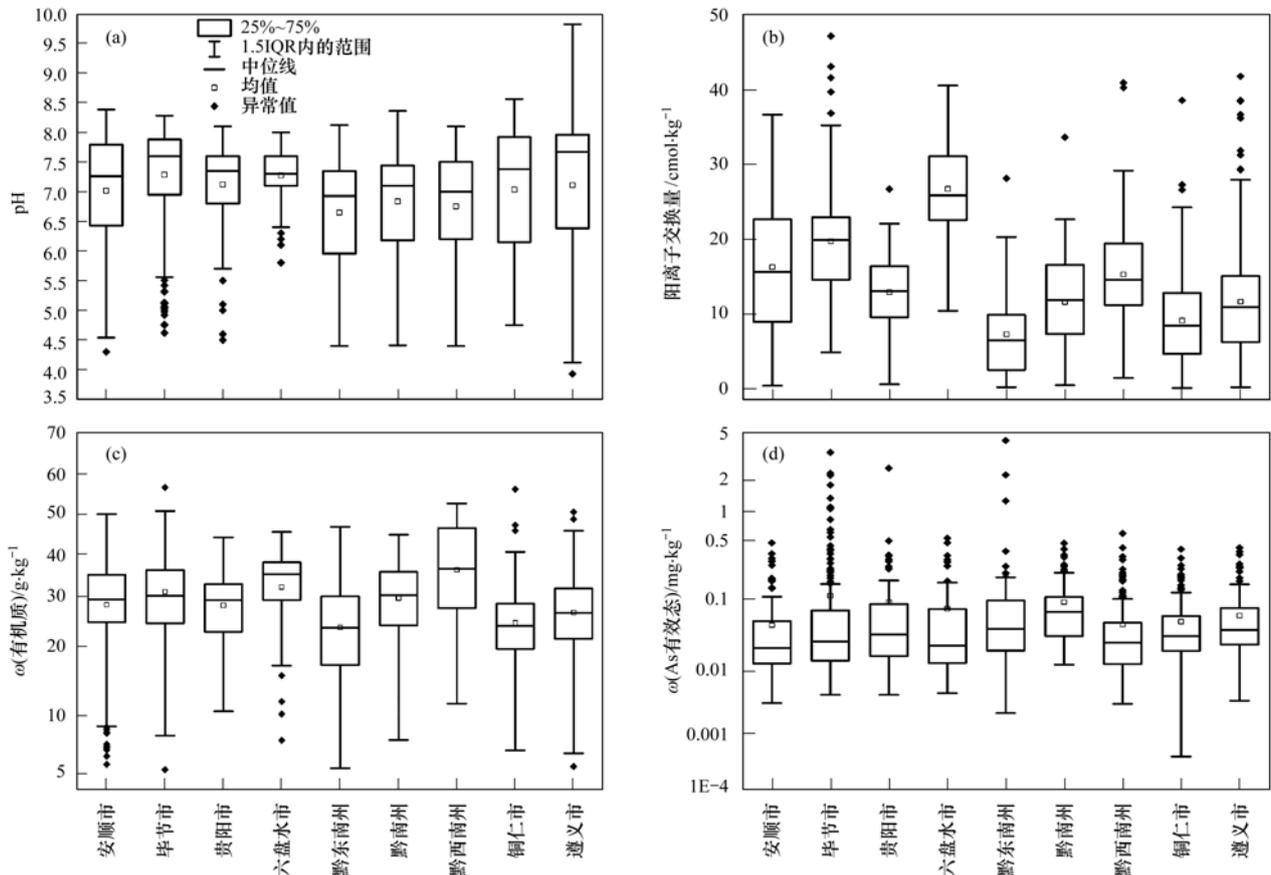


图 2 旱地土壤基本理化性质

Fig. 2 Basic physical and chemical properties of dryland soils

平均值为  $23.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 经独立样本  $T$  检验, 贵州省旱地土壤的 As 含量显著高于自然土壤的 ( $P < 0.05$ ), 表明旱地土壤存在 As 累积效应. 不同地区土壤  $\omega(\text{As})$  大小为: 黔西南州 ( $30.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 黔南州 ( $28.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 黔东南州 ( $27.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 安顺市 ( $25.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 毕节市 ( $24.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 六盘水市 ( $23.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 贵阳市 ( $22.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 铜仁市 ( $17.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 遵义市 ( $16.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 研究区土壤 As 含量差距较大, 每个地区变异情况各不相同, 变异系数的范围为  $63.66\% \sim 219.2\%$ , 呈现中、强变异性, 说明土壤受到各种人类活动的干扰较为严重, 主要原因与玉米种植的方式、耕地的类型和种植户

的施肥等因素有关, 同时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, 使得研究区土壤中的 As 累积, 导致旱地土壤 As 含量在空间上呈现不同的差异性, 整体空间分布趋势为西南部地区高于东北部地区(图 3),  $\omega(\text{As})$  高于  $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的样点主要分在黔西南州, 北部的铜仁市和遵义市的大部分样品  $\omega(\text{As})$  低于  $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 西南地区土壤 As 含量较高与当地具有较多的高砷煤矿区有关, 其中兴仁县就是典型的高砷煤矿区, 根据龚朝兵<sup>[30]</sup>的研究, 兴仁县煤矿 As 含量普遍偏高, 最高可达  $21\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤和地表水体中也发现 As 开采导致该地区重金属 As 的污染较为严重.

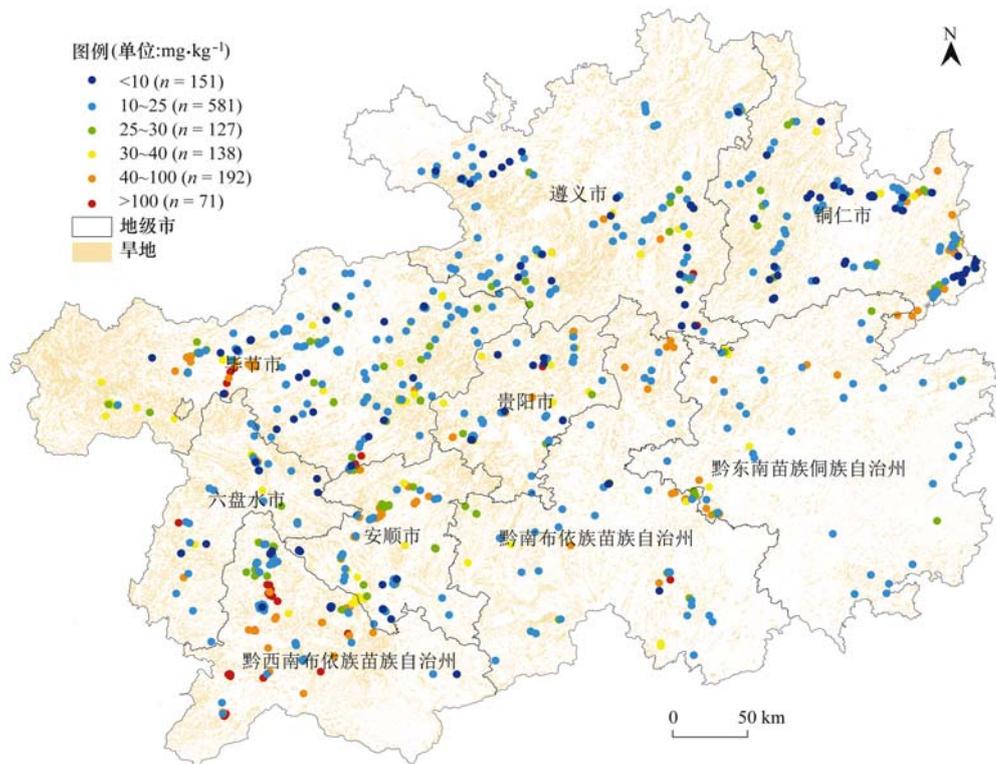


图 3 旱地土壤 As 含量等级化分布

Fig. 3 Hierarchical distribution of As content in dryland soils

表 3 旱地土壤 As 含量统计

Table 3 Total As statistics for dryland soils

地区	样品数 /个	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术平均值 $\pm$ 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 /%	基于筛选值的超标率 /%	基于管控值的超标率 /%
安顺市	147	4.41 ~ 107.6	31.81 $\pm$ 20.25	25.75(2.01)	63.66	42.86	0.00
毕节市	286	6.21 ~ 459.5	34.95 $\pm$ 43.85	24.13(2.18)	125.5	33.57	4.90
贵阳市	106	0.35 ~ 556.0	32.40 $\pm$ 54.88	22.24(2.27)	169.4	33.02	1.89
六盘水市	55	4.67 ~ 634.8	39.70 $\pm$ 87.01	23.00(2.27)	219.2	32.73	5.45
黔东南州	56	11.06 ~ 402.2	39.38 $\pm$ 56.97	27.44(2.04)	144.7	28.57	5.36
黔南州	99	8.17 ~ 128.8	33.16 $\pm$ 21.53	28.06(1.76)	64.92	38.38	1.01
黔西南州	188	3.11 ~ 758.5	58.15 $\pm$ 90.23	30.57(2.97)	155.2	43.62	10.11
铜仁市	163	1.59 ~ 158.7	25.16 $\pm$ 23.18	17.66(2.38)	92.10	30.06	0.61
遵义市	160	4.14 ~ 107.9	19.75 $\pm$ 13.99	16.69(1.76)	70.87	18.13	0.00
总计	1 260	0.35 ~ 758.5	34.90 $\pm$ 51.63	23.28(2.28)	147.9	33.81	3.41

贵州省旱地土壤样品中有 33.81% 超过风险筛选值, 3.41% 土壤样品超过风险管控值; 各地区基于筛选值的超标率为安顺市 (42.86%)、毕节市 (33.57%)、贵阳市 (33.02%)、六盘水市 (32.73%)、黔东南州 (28.57%)、黔南州 (38.38%)、黔西南州 (43.62%)、铜仁市 (30.06%) 和遵义市 (18.13%), 表明种植区域已受到 As 污染, 其中黔西南州的超标率最为严重, 可能对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境等存在风险, 应当加强土壤环境质量和农产品安全的协同监测。

### 2.3 土壤 As 污染评价和空间分布

据式(1)计算土壤 As 的单因子污染指数(表 4), 研究区 1 260 个土壤样点 As 的单因子污染指数  $P_i$  范围为 0.01 ~ 30.34, 各地区均值均小于 1, 但部分样品已达到重度污染风险, 其中有 66.27% 的土壤样品为无污染风险, 33.73% 的土壤样品为污染风险, 表明贵州省旱地土壤 As 污染较为严重, 其种植生产的农产品可能存在 As 污染风险. 从旱地土壤 As 的单因子污染指数空间分布中看出(图 4), 各地区均呈不同程度 As 污染风险, 主要 As 污染区分布于毕节市威宁县、赫章县和织金县, 六盘水市钟山

表 4 基于风险筛选值的旱地土壤 As 单因子污染指数评价结果

Table 4 Evaluation results of single-factor pollution index of dryland soil As based on risk screening values

地区	样品数/个	范围	平均值	污染程度占比/%			
				无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
安顺市	147	0.13 ~ 3.87	0.85	57.82	31.97	7.48	2.72
毕节市	286	0.16 ~ 15.32	0.85	66.43	18.18	3.15	12.24
贵阳市	106	0.01 ~ 22.24	0.77	66.98	21.70	7.55	3.77
六盘水市	55	0.19 ~ 21.16	0.80	67.27	20.00	5.45	7.27
黔东南州	56	0.28 ~ 16.09	0.85	71.43	12.50	8.93	7.14
黔南州	99	0.27 ~ 5.15	0.88	61.62	27.27	10.10	1.01
黔西南州	188	0.08 ~ 30.34	0.97	56.38	16.49	7.98	19.15
铜仁市	163	0.04 ~ 3.97	0.59	69.94	22.09	4.91	3.07
遵义市	160	0.10 ~ 3.60	0.57	81.88	16.88	0.63	0.63
总计	1 260	0.01 ~ 30.34	0.78	66.27	20.71	5.56	7.46

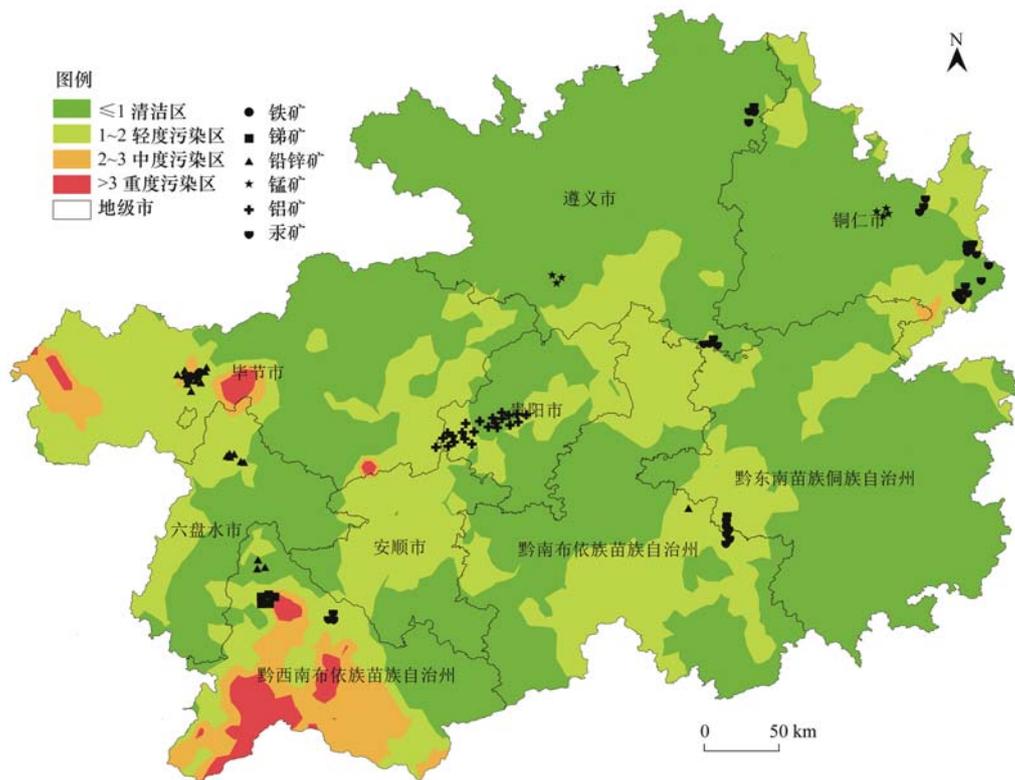


图 4 研究区旱地土壤 As 单因子污染指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of As single-factor pollution index in dryland soils in the study area

区和盘县西部, 安顺市普定县和西秀区, 黔南州平塘县、都匀县和瓮安县, 铜仁市万山区、碧江区和松

桃县以及黔西南州各县等地区, 其他地区均有零星分布, 其中黔西南存在  $P_i$  为 30.34 的土壤样品, 为

重度 As 污染风险。

#### 2.4 玉米籽粒中 As 含量特征及污染分析

对 980 件玉米籽粒样品中 As 含量进行统计, 结果见表 5, 原始数据经对数转换后均符合正态分布, 以几何均值表征玉米籽粒中 As 含量大小。整体上贵州省玉米籽粒  $\omega(\text{As})$  范围为  $0.001 \sim 0.868 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $0.064 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 各地区玉米籽粒中  $\omega(\text{As})$  平均值大小为: 黔东南州 ( $0.123 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 黔南州 ( $0.110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 六盘水市 ( $0.093 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 贵阳市 ( $0.080 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 毕节

市 ( $0.079 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 黔西南州 ( $0.067 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 安顺市 ( $0.049 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 铜仁市 ( $0.042 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) > 遵义市 ( $0.037 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 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 ( $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 但毕节市、黔西南州和铜仁市中有少部分玉米籽粒样品 As 含量大于限量标准值, 超标率分别为 0.45%、0.64% 和 3.31%, 其余样品均符合安全标准。与《饲料卫生标准》(GB 13078-2017) 中 As 限量标准 ( $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 相比, 均未存在超标现象。

表 5 玉米籽粒 As 含量统计

Table 5 Statistics of As content of maize seeds

地区	样品数 /个	范围 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	算术平均值 $\pm$ 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 /%	超标率 /%
安顺市	123	0.006 ~ 0.389	$0.060 \pm 0.047$	$0.049(1.917)$	78.35	0
毕节市	221	0.004 ~ 0.594	$0.104 \pm 0.076$	$0.079(2.260)$	73.09	0.45
贵阳市	83	0.004 ~ 0.321	$0.094 \pm 0.045$	$0.080(1.986)$	47.64	0
六盘水市	27	0.037 ~ 0.146	$0.096 \pm 0.023$	$0.093(1.312)$	24.06	0
黔东南州	41	0.077 ~ 0.446	$0.129 \pm 0.056$	$0.123(1.313)$	43.59	0
黔南州	86	0.007 ~ 0.423	$0.138 \pm 0.083$	$0.110(2.183)$	59.96	0
黔西南州	156	0.022 ~ 0.868	$0.077 \pm 0.071$	$0.067(1.584)$	91.76	0.64
铜仁市	120	0.001 ~ 0.637	$0.131 \pm 0.167$	$0.042(5.459)$	128.3	3.31
遵义市	123	0.001 ~ 0.162	$0.047 \pm 0.028$	$0.037(2.191)$	61.09	0
总计	980	0.001 ~ 0.868	$0.093 \pm 0.087$	$0.064(2.574)$	93.96	0.61

据式(1)计算玉米籽粒中 As 的单因子污染指数(图 5), 各地区均值都远小于 1, 表明整体上各地区玉米籽粒中 As 属于清洁水平, 但毕节市、黔西南州和铜仁市分别有 1、1 和 4 个玉米籽粒样品的单因子污染指数处于 1~2 之间, 存在轻微的 As 污染, 其余地区的单因子污染指数虽然均小于 1, 而黔东南州和黔南州的单因子污染指数变化范围分别为 0.155~0.892 和 0.014~0.846, 存在接近于 1 的点位, 应引起重视。玉米籽粒 As 含量超标点位分布中(图 6), 旱地土壤和玉米籽粒均超标的点位分布在毕节市赫章县和铜仁市万山区, 玉米籽粒超标而土壤不超标的点位分布在黔西南州晴隆县和铜仁市松桃苗族自治县和碧江区。

玉米籽粒对 As 的富集能力直接关系到食品的生产 and 食用安全<sup>[31]</sup>, 富集系数越小, 则表明其吸收 As 的能力越差, 抗土壤 As 污染的能力则较强<sup>[32]</sup>。玉米籽粒对 As 的富集系数经对数转换后均符合正态分布(图 7), 其范围为  $0.00002 \sim 0.3349$ , 平均值为  $0.0028$ , 玉米籽粒对土壤中 As 的富集系数较小, 说明玉米籽粒对 As 积累能力较低, 具有较强的受耐性, 这与国内外的研究结果一致<sup>[31, 33, 34]</sup>, 这也是本研究中旱地土壤存在不同程度 As 污染而玉米籽粒却仅有少量样品发现 As 污染的原因。

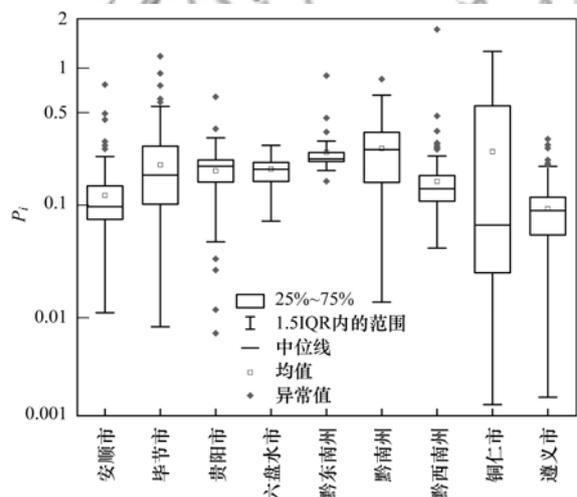


图 5 玉米籽粒单因子污染指数

Fig. 5 Single-factor contamination index of maize seeds

#### 2.5 玉米籽粒 As 含量与土壤理化性质相关性分析

在农田土壤系统中, 玉米对土壤中 As 的吸收和积累除受自身品种的特征影响外, 主要取决于农田土壤的污染水平及理化性质<sup>[35]</sup>。相关性分析结果表明(表 6), 玉米籽粒 As 含量与土壤 As 含量在 0.01 水平上呈现显著正相关, 与 As 有效态含量和有机质含量均在 0.05 水平上呈显著正相关; 即玉米籽粒 As 含量随着土壤 As 含量、As 有效态含量和有机质含量的增加而增加。土壤中 As 有效态含量与有机质含量和阳离子交换量在 0.01 水平上分别呈显著正

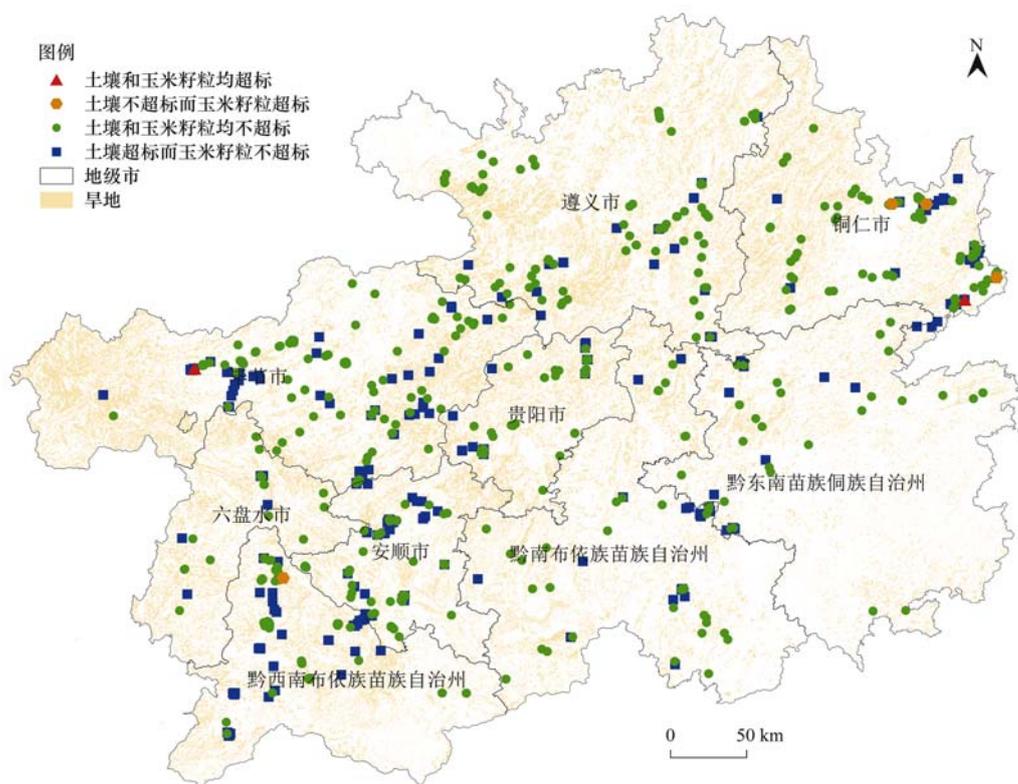


图 6 玉米籽粒 As 含量超标点位分布

Fig. 6 Distribution of points with excessive As content in maize seeds

表 6 玉米籽粒 As 含量与土壤基本理化性质的相关性<sup>1)</sup>

Table 6 Correlation of As content of maize seeds with basic soil physicochemical properties

	玉米籽粒 As	土壤 As	As 有效态	土壤 pH	有机质
土壤 As	0.134 **				
土壤 As 有效态	0.073 *	0.108 **			
土壤 pH	-0.044	0.047	-0.062		
有机质	0.081 *	0.060	0.268 **	-0.120 **	
阳离子交换量	0.037	0.020	-0.082 **	0.343 **	0.390 **

1) \* 表示在 0.05 水平上相关性显著, \*\* 表示在 0.01 水平上相关性显著

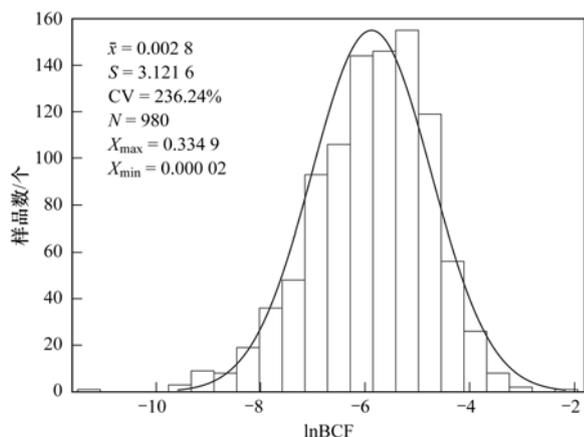


图 7 玉米籽粒对 As 的富集系数

Fig. 7 Enrichment coefficient of As by maize seeds

相关和显著负相关; 而土壤有机质含量和阳离子交换量分别与土壤 pH 在 0.01 水平上呈显著负相关和显著正相关. 表明土壤-玉米籽粒系统 As 的迁移

规律不仅与土壤 As 含量和 As 有效态含量有关, 也受有机质、阳离子交换量和土壤 pH 等众多因素影响.

### 3 讨论

土壤 As 污染来源复杂, 总体可分为自然来源和人为来源<sup>[10]</sup>. 自然来源主要是土壤母岩、岩石风化和土壤侵蚀等产生 As 物质. 人为来源包括农业污染和工业污染, 农业污染来源于化肥、农药和除草剂等含砷物质的施用; 含砷金属矿石的开采、焙烧混合冶炼生产过程中排放的含砷烟尘、废水、废气和废渣等是造成土壤和农作物 As 污染的工业污染来源<sup>[3, 11, 36~38]</sup>. 有研究表明矿产资源开采区及其周围农田和作物均出现不同程度的重金属污染<sup>[39~44]</sup>. 本研究显示(图 4), 旱地土壤在矿产资源集中开采区及其外围均出现 As 污染区, 且西南地区的污染最为

严重. 如金矿、铅锌矿等涉 As 矿产<sup>[12]</sup> 开发过程中产出的大量含砷固废, 通常堆放于地表上或暴露在空气中, 如果处理不当, 重金属等污染物伴随着风蚀吹扬、雨水冲刷和淋洗等自然作用, 最终滞留于土壤中, 对其造成严重的污染与危害, 另外采矿过程产生的粉尘和废气, 会造成大气污染, 其伴随着干湿沉降到达地表, 进一步污染矿区及周边地区的地表水、地下水、土壤、农作物和植被等<sup>[45,46]</sup>.

本研究样品采集范围广, 样品量多, 覆盖不同区域和不同品种的玉米. 将土壤和玉米籽粒 As 含量空间分布进行对比发现(图 6), 土壤 As 含量超标, 其对应玉米籽粒 As 含量未超标, 而土壤 As 含量不超标时, 对应玉米籽粒 As 含量存在超标情况, 两者之间并未表现出明显的一致性, 龚朝兵<sup>[30]</sup> 对黔西南的调查也发现此类现象. 通过相关性分析(表 6)可知玉米籽粒 As 含量除受土壤 As 含量和 As 有效态含量的影响外, 还与土壤理化性质有关. 通过富集系数可知(图 7), 玉米籽粒对 As 累积能力最大仅为 0.3349, 姜森等<sup>[47]</sup> 研究中砷元素在玉米器官中的富集顺序为: 根 > 秸秆 > 玉米棒 > 玉米籽粒, 表明玉米籽粒受土壤 As 污染的影响较小. 据研究, 不同区域下不同生长环境以及同一区域不同玉米品种对重金属的积累能力存在极其显著的差异<sup>[48-51]</sup>. 因此, 玉米籽粒对 As 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, 这其中存在一系列复杂的物理、化学和生理过程.

分别基于风险筛选值和食品安全限值, 贵州省旱地土壤超标率为 33.81%, 玉米籽粒超标率仅为 0.61%. 玉米籽粒超标率低于 5%, 可实现受污染耕地安全利用率达到 95% 以上<sup>[52,53]</sup>, 表明贵州省达到安全利用率的要求. 其中安顺市、贵阳市、六盘水市、黔东南州、黔南州和遵义市的玉米籽粒 As 含量均低于安全限量值( $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 属于安全等级, 说明以上地区的玉米籽粒食用后对人体健康无危害, 表明可以安全种植玉米; 而毕节市、铜仁市和黔西南州共存在 6 个超标的玉米籽粒样品, 根据土壤污染空间分布(图 4)和玉米籽粒超标点位分布(图 6), 超标的玉米籽粒均分布于土壤 As 污染区域内, 因此, 在污染区域(图 4)内种植玉米时, 需加以关注其安全性. 玉米籽粒 As 含量均低于《饲料卫生标准》(GB 13078-2017)中安全限值( $2.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )表明将玉米作为饲料时, 可安全种植.

#### 4 结论

(1) 贵州省旱地土壤呈中性, 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; 旱地

土壤  $\omega(\text{As})$  几何平均值为  $23.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与筛选值相比, 土壤样品超标率为 33.81%. 玉米籽粒  $\omega(\text{As})$  几何平均值为  $0.064 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与安全限值相比, 其超标率为 0.61%.

(2) 旱地土壤 As 污染区主要在毕节市威宁彝族回族苗族自治县、赫章县和织金县, 六盘水市钟山区和盘县西部, 安顺市普定县和西秀区, 黔南州平塘县、都匀县和瓮安县, 铜仁市万山区、碧江区和松桃苗族自治县以及黔西南州各县等地区. 玉米超标点位分布于毕节市赫章县、黔西南州晴隆县和铜仁市松桃苗族自治县、碧江区和万山区.

(3) 以《食品中污染物限量》(GB 2762-2017)的限值、《饲料卫生标准》(GB 13078-2017)中安全限值( $2.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和相关计划中规定的受污染耕地安全利用率达到 95% 以上为评价标准, 贵州省可实现玉米安全种植.

#### 参考文献:

- [1] 李圣发, 王宏斌. 土壤砷污染及其修复技术的研究进展[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 248-253.  
Li S F, Wang H B. Advances in the study of arsenic-contaminated soil and its remediation technology[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(4): 248-253.
- [2] 纪冬丽, 孟凡生, 薛浩, 等. 国内外土壤砷污染及其修复技术现状与展望[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(1): 90-99.  
Ji D L, Meng F S, Xue H, et al. Situation and prospect of soil arsenic pollution and its remediation techniques at home and abroad[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(1): 90-99.
- [3] 蔡保松, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 土壤砷污染对蔬菜砷含量及食用安全性的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 711-717.  
Cai B S, Chen T B, Liao X Y, et al. Arsenic concentrations in soils and vegetables and their risk assessments in highly contaminated area in Hu'nan province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 711-717.
- [4] Saha D P. Arsenic poisoning in west Bengal[J]. Science, 1996, 274(5291): 1287.
- [5] Acharyya S K, Chakraborty P, Lahiri S, et al. Arsenic poisoning in the Ganges delta[J]. Nature, 1999, 401(6753), doi: 10.1038/44052.
- [6] 李莲芳, 曾希柏, 白玲玉, 等. 石门雄黄矿周边地区土壤砷分布及农产品健康风险评估[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2946-2951.  
Li L F, Zeng X B, Bai L Y, et al. Soil arsenic content and its health risk assessment for agricultural products in the region surrounding Shimen arsenic, sulphide mine[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2946-2951.
- [7] 赵娟. 阳宗海和滇池污染的比较研究[J]. 法制与社会, 2009, (13): 219-220.
- [8] 王振华, 何滨, 潘学军, 等. 云南阳宗海砷污染水平、变化趋势及风险评估[J]. 中国科学(化学), 2011, 41(3): 556-564.  
Wang Z H, He B, Pan X J, et al. The levels, trends and risk assessment of arsenic pollution in Yangzonghai Lake, Yunnan [J]. Scientia Sinica (Chimica), 2011, 41(3): 556-564.
- [9] 宋波, 刘畅, 陈同斌. 广西土壤和沉积物砷含量及污染分布

- 特征[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(4): 654-668.
- Song B, Liu C, Chen T B. Contents and pollution distribution characteristics of arsenic in soils and sediments in Guangxi Zhuang autonomous region[J]. Journal of Natural Resources, 2017, **32**(4): 654-668.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张坤, 钱建平, 张璇. 土壤砷污染研究及修复综述[J]. 环境保护与循环经济, 2020, **40**(2): 46-51.
- [14] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J]. 地理学报, 2006, **61**(3): 297-310.
- Chen T B, Song B, Zheng Y M, *et al.* A survey of arsenic concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. Acta Geographical Sinica, 2006, **61**(3): 297-310.
- [15] 朱晓龙, 刘妍, 甘国娟, 等. 湘中某工矿区土壤及作物砷污染特征及其健康风险评价[J]. 环境化学, 2014, **33**(9): 1462-1468.
- Zhu X L, Liu Y, Gang J, *et al.* Arsenic contamination and assessment of potential human health risk of soil and crops systems at an industrial and mining area in central Hunan[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(9): 1462-1468.
- [16] 陈蓉, 杨瑞东. 贵州省煤炭资源开发利用现状与对策[J]. 煤炭经济研究, 2007, (10): 15-18.
- [17] 谢宏. 贵州西部高砷煤地质特征及成因研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2005.
- [18] 段明宇, 吴攀, 张翅鹏, 等. 高砷煤矿污染土壤的小麦砷累积研究[J]. 麦类作物学报, 2017, **37**(7): 985-991.
- Duan M Y, Wu P, Zhang C P, *et al.* Arsenic accumulation in wheat grown in the field polluted by arsenic coal mine [J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, **37**(7): 985-991.
- [19] 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.
- [20] 钱前, 瞿礼嘉, 袁明, 等. 2012年中国植物科学若干领域重要研究进展[J]. 植物学报, 2013, **48**(3): 231-287.
- Qian Q, Qu L J, Yuan M, *et al.* Research advances on plant science in China in 2012[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2013, **48**(3): 231-287.
- [21] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter [J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- [22] 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.
- [23] 周浪, 张云霞, 徐启翀, 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.
- [24] 陈远云, 罗海波, 吴琳娜, 等. 贵州省农村集体建设用地流转现状、问题及对策[J]. 天津农业科学, 2020, **26**(4): 24-28, 40.
- Chen Y Y, Luo H B, Wu L N, *et al.* Current situation, problems and countermeasures of the transfer of rural collective construction land in Guizhou province [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, **26**(4): 24-28, 40.
- [25] 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.
- [26] 唐鹏, 李义连, 徐佳丽, 等. 王水水浴溶解-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.
- [27] Wu C, Cui M Q, Xue S G, *et al.* Remediation of arsenic-contaminated paddy soil by iron-modified biochar [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(21): 20792-20801.
- [28] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [29] 蒋德珍, 滕恩江, 刘延良. 土壤背景值数据差异的来源分析及土壤类型对背景值的影响[J]. 中国环境监测, 1996, **12**(2): 21-24.
- Jiang D Z, Teng E J, Liu Y L. The contribution of difference on the element background values in soils and the analysis of variance of single factor on soil groups [J]. Environmental Monitoring in China, 1996, **12**(2): 21-24.
- [30] 龚朝兵. 黔西南高砷煤开发现状与污染调查[J]. 中国煤炭地质, 2008, **20**(4): 63-66.
- Gong C B. High arsenic coalmine exploitation status quo and pollution survey in southwestern Guizhou province [J]. Coal Geology of China, 2008, **20**(4): 63-66.
- [31] 陆素芬, 张云霞, 余元元, 等. 广西南丹土壤-玉米重金属累积特征及其健康风险[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.

- [32] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(8): 1343-1353.  
Song B, Chen T B, Zheng Y M, *et al.* A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(8): 1343-1353.
- [33] 曹小霞. 玉米品种间对砷累积能力差异及其吸收与耐砷机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.  
Cao X X. The difference of arsenic accumulation capacity among maize varieties and its mechanisms of arsenic uptake and Tolerance [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [34] Nannoni F, Rossi S, Protano G. Potentially toxic element contamination in soil and accumulation in maize plants in a smelter area in Kosovo[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(12): 11937-11946.
- [35] 管伟豆, 郭堤, 王萍, 等. 北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5958-5966.  
Guan W D, Guo D, Wang P, *et al.* Investigations on the derivation of safe maize-producing threshold of soil Cd content and on classification of Cd contaminated maize-producing areas in Northern China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5958-5966.
- [36] 商井远, 朱博, 纪馨越, 等. 土壤环境中砷污染修复技术综述[J]. 辽宁化工, 2021, **50**(7): 1068-1069, 1077.  
Shang J Y, Zhu B, Ji X Y, *et al.* Remediation technology of arsenic pollution in soil environment[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2021, **50**(7): 1068-1069, 1077.
- [37] 罗婷, 孙健雄, 夏科. 土壤砷污染研究综述[J]. 环境与发展, 2017, **29**(8): 11-12.  
Luo T, Sun J X, Xia K. A research review of arsenic pollution in soil[J]. *Environment and Development*, 2017, **29**(8): 11-12.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 马先杰, 陆凤, 陈兰兰, 等. 贵州水城典型铅锌矿区土壤和蔬菜中重金属累积特征及风险评价[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(10): 1227-1232.  
Ma X J, Lu F, Chen L L, *et al.* Accumulation characteristics and risk assessment for heavy metals in soil and vegetables in typical lead-zinc mining region of Shui Cheng, Guizhou [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(10): 1227-1232.
- [41] 李武江, 朱四喜, 王众, 等. 西南山地煤矿区耕地土壤-农作物重金属富集及健康风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2021, **11**(5): 22-30.  
Li W J, Zhu S X, Wang Z, *et al.* Heavy metals enrichment and health risk assessment of cultivated soil-crops in mountainous coal mining areas of Southwest China [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2021, **11**(5): 22-30.
- [42] 陈明. 采取合理措施避免跨界污染——贵州独山瑞丰矿业环境污染事件解析[J]. 环境保护, 2009, (3): 63-64.
- [43] 姚冬菊, 刘恩光, 宁增平, 等. 贵州某锡冶炼厂周边农田土壤镉、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.
- [44] 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.
- [45] 肖瑶. 矿区环境污染现状及防控对策——以煤矿为视角[J]. 北方环境, 2013, **25**(1): 55-56.  
Xiao Y. Discussion on the mining area environmental pollution and countermeasures of prevention and control——taking coal mine as the angle of view[J]. *Environment and Development*, 2013, **25**(1): 55-56.
- [46] 刘桂建, 袁自娇, 周春财, 等. 采矿区土壤环境污染及其修复研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, **29**(9): 37-40, 48.  
Liu G J, Yuan Z J, Zhou C C, *et al.* Mining area soil environmental contamination and rehabilitation study[J]. *Coal Geology of China*, 2017, **29**(9): 37-40, 48.
- [47] 姜森, 高一娜, 徐晶, 等. 玉米植株及其耕地土壤中重金属的分布特征[J]. 黑龙江农业科学, 2018, (5): 116-120.  
Jiang M, Gao Y N, Xu J, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in maize plants and their cultivated land [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018, (5): 116-120.
- [48] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(4): 367-371.  
Guo X F, Wei Z B, Qiu J R, *et al.* Differences between corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metals[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(4): 367-371.
- [49] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对 Cd、Pb、As 积累与转运的差异研究[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(9): 1867-1875.  
Du C Y, Yu X F, Du J L, *et al.* Variety difference of Cd, Pb and As accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(9): 1867-1875.
- [50] Yang N K, Wang H B, Wang H J, *et al.* Screening maize (*Zea mays* L.) varieties with low accumulation of cadmium, arsenic, and lead in edible parts but high accumulation in other parts: a field plot experiment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(25): 33583-33598.
- [51] Artiushenko T, Syshchykov D, Gryshko V, *et al.* Metal uptake, antioxidant status and membrane potential in maize roots exposed to cadmium and nickel [J]. *Biologia*, 2014, **69**(9): 1142-1147.
- [52] 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 等. 桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1855-1863.  
Chen T B, Pang R, Wang F P, *et al.* Safety assessment of rice planting in soil cadmium geological anomaly areas in southwest Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1855-1863.
- [53] 李发生. 土壤污染防治行动计划[J]. 中国环保产业, 2016, (6): 5-11.

## CONTENTS

Evolution of PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP .....	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng ( 1 )
Differences in PM <sub>2.5</sub> Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province .....	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> ( 11 )
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter .....	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> ( 20 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin .....	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> ( 30 )
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method .....	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan ( 38 )
Numerical Response Analysis of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Beijing .....	LIU Tian-qiang ( 48 )
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region .....	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> ( 58 )
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing .....	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> ( 66 )
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO <sub>x</sub> -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi .....	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> ( 75 )
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou .....	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> ( 85 )
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain .....	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> ( 94 )
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models .....	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> ( 104 )
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City .....	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> ( 118 )
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao .....	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng ( 127 )
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China .....	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei ( 138 )
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary .....	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> ( 158 )
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities .....	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> ( 169 )
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China .....	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi ( 180 )
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City .....	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> ( 189 )
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China .....	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> ( 198 )
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta .....	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> ( 210 )
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province .....	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> ( 219 )
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River .....	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> ( 231 )
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae .....	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> ( 243 )
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities .....	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> ( 252 )
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing .....	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> ( 262 )
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA .....	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> ( 272 )
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir .....	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> ( 282 )
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall .....	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> ( 293 )
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> ( 303 )
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector .....	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> ( 312 )
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> ( 323 )
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake .....	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> ( 336 )
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin .....	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> ( 347 )
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia .....	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> ( 356 )
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites .....	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> ( 367 )
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China .....	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> ( 376 )
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil .....	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> ( 387 )
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se .....	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing ( 395 )
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning .....	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> ( 405 )
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province .....	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> ( 415 )
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas .....	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 426 )
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil .....	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> ( 436 )
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region .....	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> ( 444 )
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors .....	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> ( 452 )
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System .....	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> ( 463 )
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field .....	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> ( 473 )
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River .....	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> ( 482 )
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region .....	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> ( 494 )
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China .....	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> ( 502 )
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands .....	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> ( 512 )
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China .....	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> ( 520 )
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis .....	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> ( 531 )
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals .....	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> ( 540 )
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China .....	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> ( 549 )
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years .....	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> ( 560 )
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018 .....	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> ( 572 )
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment .....	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> ( 583 )