

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} -O ₃ 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, 李曼, 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, 栗少丽, 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, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 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现性	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, 董慧岭, 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, 张坤峰, 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)
苦草叶表附和和水体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, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 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, 王任重远, 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, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地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铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘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, 王晓妍, 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, 王丽学, 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)

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^{1,2,3,4}, 许晶^{1,4*}, 侯召雷^{1,4}, 彭敏⁵, 杨帆⁵, 陈杰^{1,4}, 徐永强^{1,4}, 杨树云^{1,4}, 李家云^{1,4}, 于林松^{2,3}

(1. 云南省地质调查院, 昆明 650216; 2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 3. 成都理工大学地核技术重点实验室, 成都 610059; 4. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 昆明 650051; 5. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000)

摘要: 滇东北是中国西南典型的土壤重金属高背景地区, 土壤中重金属普遍富集, 土壤重金属分布和区域内农作物的安全性值得关注. 根据滇东北土壤成土母质分区, 以1 137组农作物和对应的根系土壤为研究对象, 采用元素赋存形态分析和慢性健康风险评价法开展土壤-作物系统重金属累积特征和农作物健康风险评价. 结果表明, 铅锌矿集区土壤 Cd 和 Pb 重金属均高于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 土壤污染管制值, 其余母质区土壤 Cd 介于筛选-管制缓冲区内, Pb 则低于最低土壤风险筛选值. 依据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017), 区内土豆和黄豆中重金属 Cd 超标严重, 苦荞和核桃中重金属 Pb 超过限量值, 农作物重金属 Cd 超标率为: 碎屑岩母质区 > 玄武岩母质区 > 铅锌矿集区 > 碳酸盐岩母质区 ≈ 第四系沉积物区 > 砂(泥)岩母质区. 同时, 根据美国环保署对于人体摄入重金属慢性健康风险评估方法可知, 谷薯类主食和水果类均存在重金属摄入慢性健康低风险, 其中碎屑岩母质区、砂(泥)岩母质区、第四系沉积物区和铅锌矿集区这4个区域内农作物显示较高的人体健康风险, 且随着土壤理化性质改变和食用农作物种类的增加, 风险将逐渐增大.

关键词: 成土母质; 土壤重金属; 地质高背景; 土壤-作物系统; 健康风险

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0405-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202203205

Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning

CHEN Zi-wan^{1,2,3,4}, XU Jing^{1,4*}, HOU Zhao-lei^{1,4}, PENG Min⁵, YANG Fan⁵, CHEN Jie^{1,4}, XU Yong-qiang^{1,4}, YANG Shu-yun^{1,4}, LI Jia-yun^{1,4}, YU Lin-song^{2,3}

(1. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China; 2. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Applied Nuclear Technology in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, MNR, Kunming 650051, China; 5. Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: This study used both the element occurrence form analysis and the chronic health risk assessment method to investigate the accumulation characteristics of heavy metals in the soil-crop system and the health risk assessment of agricultural products in northeastern Yunnan, which is a typical area of Southwest China where heavy metals are enriched in soil. Based on the study of 1 137 groups of agricultural products and corresponding root soils, the results showed that the soil cadmium (Cd) and lead (Pb) in the lead-zinc ore concentration area were higher than the risk-intervention values of the "Soil Environmental Quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land" (GB 15618-2018), whereas the soil Cd in the other parent material areas was within the screening-intervention buffer zone, and Pb was below the minimum risk-screening value. According to the National Food Safety Standard of China (GB 2762-2017), the heavy metal Cd in potatoes and soybeans in the area seriously exceeded the standard, the heavy metal Pb in tartary buckwheat and walnut exceeded the limit value, and the exceeding rate of heavy metal Cd in crops from these parent material areas showed: clastic rock > basalt > lead-zinc ore > carbonate ≈ Quaternary sedimentary > sand (mud) rock. According to the U. S. Environmental Protection Agency's assessment method for the chronic health risk of heavy metal intake by humans, the grains and potatoes, staple foods, and fruits had low chronic health risks of heavy metal intake. Agricultural products from the parent material area of clastic rock, sand (mud) rock, Quaternary sedimentary, and lead-zinc ore concentration showed health risks; with the change in soil physical and chemical properties and the increase in the types of edible crops, the risk will gradually increase. Based on this research, it is urgent to carry out real-time monitoring of agricultural products in the area.

Key words: parent material; soil heavy metals; high geological background; soil-crop system; health risks

滇东北是中国西南典型的土壤重金属高背景地区, 与中国土壤 A 层背景值相比^[1], 区内表层土壤

中镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn)等重金属元素均显示强烈富集, 而

收稿日期: 2022-03-22; 修订日期: 2022-04-29

基金项目: 自然资源部中国地质调查局地质调查项目(121201108000150008-04, DD20160313-04, DD20190522-01-1, DD20190522-06-1); 地学核技术重点实验室四川省重点实验室开放基金项目(gnzds201906); 云南省基础研究计划项目(2019FD064)

作者简介: 陈子万(1985~), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为环境地球化学和同位素地球化学, E-mail: ChenZW_cdut@outlook.com

* 通信作者, E-mail: yj_890209@126.com

被环境工作者关注. 以往的研究成果认为土壤重金属的自然源由成土母质镁铁质岩石、黑色页岩和石灰岩风化产物引起^[2~5], 玄武岩风化产物中的黏土矿物和 Fe-Mn 氧化物是表层土壤中富 Ni 和 Cr 等重金属元素的主要原因^[5~7]. 滇东北地区属于典型高中山切割地貌, 土地利用类型零散多样, 且土壤重金属高背景特征范围广泛, 受成土母岩的影响, 土壤重金属在区域的分布受多种因素驱动机制控制, 但成土母质可能是决定性的因素^[8]. 目前对西南重金属高背景地区土壤-作物系统评价工作主要集中于典型土壤重金属富集区开展, 多考虑 pH 值和黏粒组成等土壤理化性质对元素活动性的影响^[9~13], 且研究对象主要为碳酸盐岩区土壤系统, 而未针对区内玄武岩、含煤碎屑岩和铅锌矿集区中土壤-作物系统的重金属累积特征开展系统研究.

本文采集滇东北不同母质区土壤和不同类型农作物样本, 在复杂成土母质来源土壤重金属高背景的区域开展重金属在土壤-作物系统中累积特征研究, 旨在解决: ① 研究滇东北不同成土母质区土壤重金属分布特征; ② 了解不同成土母质区农作物重金属累积程度和安全性; ③ 探讨区内农作物人体健康风险, 以期为中国西南典型土壤重金属高背景区土壤自然来源重金属研究方法选择和土地资源合理开发利用提供依据.

1 研究区概况

研究区位于中国西南地区云南省东北部, 行政区划隶属于昭通市和曲靖市辖区(图1), 属于高原亚热带和暖温带共存的高原季风立体气候, 年平均气温 12.6℃. 区内最高海拔 4 025 m, 最低海拔 175 m, 属于深切切割的高-中山地貌. 区内土地资源受地形地貌多样性的影响, 各类用地零散分布, 土地利用呈现出多样性和复杂性. 区内农业种植以山坡旱地为主, 山间坝区多分布水浇地和水田. 特殊的地貌条件为区内农业生产提供了得天独厚的条件, 同时又为因地制宜的农业生产活动提出了较高的要求.

研究区属华南地层大区中的上扬子地层, 主要分布古生代-中生代碳酸盐岩、碎屑岩和砂(泥)岩, 同时晚古生代二叠系峨眉山玄武岩大面积分布, 占研究区面积的 22.9%. 区内以沉积成矿和热液成矿为主的铅锌矿广泛分布, 并有煤矿和磷矿等特色矿种产出, 广泛分布的矿床(点)对区内土壤元素重金属高背景的贡献亦不容忽视.

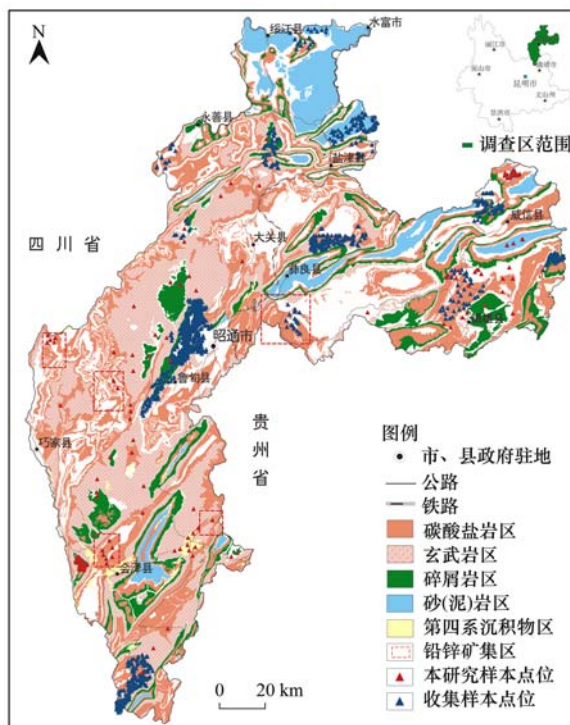


图1 研究区成土母质分区及采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution map of soil parent material division and sampling sites in the study area

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

本研究基于获取的 132 件农作物和配套的根系土壤样品分析数据开展(图1). 农作物在采摘期采集地块 3~5 个子样, 等量组合为一个样品, 同方法采集作物根系土壤, 根系土壤样品采样深度根据作物类型由 20~100 cm 分布. 采样时, 农作物样品采集可食用部分用干净布袋盛装, 分别用自来水及去离子水冲洗, 沥干水分后 60℃ 以下烘干, 并采用谷物粉碎机加工至约 60 目送分析测试. 根系土壤样品先除去非土壤杂质(植物残体和石子等), 低于 60℃ 恒温干燥箱内充分烘干并均匀混合后采用玛瑙球磨机将样品研磨至约 200 目用于全量化学分析, 部分样品研磨至约 100 目用于形态项目分析.

2.2 样品分析测试

分析测试土壤样品用氢氟酸、硝酸和高氯酸分解试料, 用王水溶解后定容并分取澄清溶液, 用 3% 硝酸溶液稀释至 1 000 倍后上机测试, 各指标分析测试方法和检出限见表 1. 土壤重金属形态分析参照文献[14], 采用七步顺序提取法分步提取并通过全谱直读等离子体质谱法(ICP-MS)测定, 提取步骤见表 2. 参照文献[15]的方法通过微波消解法进行样品分解, 并采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)完成分析测试. 测试过程通过国家一级标准物质对分析配套方法进行监控, 国家一级标准物质的分析

对数标准偏差合格率均达到 100%,精密度监控样品总体及各元素合格率均为 100%,元素总体报出率为 99.97%,重复性检验合格率为 99.5%,各指标分析方法、检出限、准确度和精密度均符合相关规范要求^[14,16,17],数据质量可靠。

表 1 土壤样品指标分析方法及检出限¹⁾

Table 1 Instrumental methods and detection limits for soil samples		
指标	分析方法	检出限
As	原子荧光光谱法 (AFS)	1
Cd	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	0.03
Cr	全谱直读电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES)	5
Cu	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	1
Hg	原子荧光光谱法 (AFS)	0.000 5
Ni	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	2
Pb	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	2
Zn	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	4
C _{org}	高频燃烧红外吸收法 (CS)	0.1
pH	电位法 (POT)	0.1

1) C_{org} 为土壤有机碳含量(ω),单位为%,pH 无量纲,其余为μg·g⁻¹

2.3 评价方法

居民每日通过食用农产品摄入重金属的总量与各种类农产品消费权重和农产品中重金属含量密切相关,本文根据农作物样本数对农产品的消费权重进行计算^[18],见计算公式:

$$HM_j = Q \cdot \sum_{i=1}^m \left[\bar{X}_i \cdot N_i^2 \left(\sum_{i=1}^m N_i^2 \right)^{-1} \right] \quad (1)$$

式中, HM_j 为居民从农产品中摄入的重金属 j 的总量; Q 为日均农产品消费量, (kg·d)⁻¹; $\bar{X}_i$ 为第 i 种农产品中重金属含量的平均值; N_i 为第 i 种农产品的样本数; m 为农产品种类数。

土壤中的重金属通过食物链向人体转移,以饮食摄入为暴露途径的健康慢性病风险(HQ),用饮食摄入农产品暴露途径下人体摄入重金属量与该污染物指定的摄入参考计量(RfD)的比值来表征^[19]:

$$CDI_{\text{ingest}} = HM_j \cdot ED \cdot EF \cdot CF / (BW \cdot AT) \quad (2)$$

$$HQ_j = CDI_{\text{ingest}} / RfD_j \quad (3)$$

表 2 土壤重金属化学形态分析方法

Table 2 Analytical steps for determining the chemical fraction of soil heavy metals			
步骤	形态	提取剂	提取方法
1	水溶态	蒸馏水	2.5 g 样品加入 25 mL 蒸馏水,超声提取 30 min,离心分离
2	离子交换态	MgCl ₂ 溶液	残渣中加入 25 mL 氯化镁溶液,摇匀,超声提取 30 min,离心分离
3	碳酸盐结合态	NaAc 溶液	残渣中加入 25 mL 醋酸钠溶液,摇匀,超声提取 60 min,离心分离
4	腐殖酸结合态	Na ₄ P ₂ O ₇ 溶液	残渣中加入 50 mL 焦磷酸钠溶液,摇匀,超声提取 40 min,放置 2 h 后离心分离
5	铁锰氧化态	HONH ₃ Cl 溶液	残渣中加入 50 mL 盐酸羟胺-盐酸混合溶液,摇匀,超声提取 60 min,离心分离
6	强有机结合态	H ₂ O ₂ -HNO ₃ 溶液	残渣中加入 3 mL 硝酸溶液和 5 mL 过氧化氢,摇匀,83℃ 水浴恒温 1.5 h,加 2.5 mL 醋酸铵-硝酸混合液,定容至 25 mL,放置 10 h 后离心分离
7	残渣态	HNO ₃ -HClO ₄ 溶液	0.2 g 残渣加入硝酸-高氯酸溶解

式中, CDI_{ingest} 为饮食摄入暴露途径下重金属慢性摄入量, mg·(kg·d)⁻¹; ED 为污染物人体暴露频率,慢性风险暴露周期为 24 a^[19]; EF 为污染物人体暴露频率,农用地和居民地暴露频率为 350 d·a⁻¹; BW 为成人平均体重,取 62 kg^[20]; AT 为污染物平均暴露时间, 365 d·a⁻¹^[19]; CF 为转换系数^[21], RfD_j 为第 j 种重金属在饮食暴露途径下的参考计量, mg·(kg·d)⁻¹,参考计量 RfD_{Cd} 取值 1.00E-03^[22], RfD_{Pb} 取值 3.50E-03^[23]。

2.4 数据处理

数据特征值和相关系数计算采用 Office Excel 2016 和 IBM SPSS statistics 19 统计完成. 采样点位图、箱式图和含量累加图分别采用 MapGIS 6.7 和 SigmaPlot 10.0 制作完成,最后采用 CorelDRAW X7 清绘。

3 结果与讨论

3.1 成土母质区土壤重金属含量特征

滇东北地区土壤成土母质主要为沉积岩类、基

性喷出岩类和第四系松散沉积物风化物. 沉积岩和基性喷出岩风化物多分布于山地地区,表层土壤不发育,为浅覆盖区;第四系松散沉积物区多分布于山间盆地,属于耕地集中区. 区内出露岩石地层复杂多样,为便于统计分析,本研究主要针对岩石类型和人为活动影响程度将土壤重金属富集区划分为 6 个成土母质类型区:碳酸盐岩风化物母质区、玄武岩风化物母质区、碎屑岩风化物母质区、砂(泥)岩风化物母质区、第四系沉积物母质区和铅锌矿集区(图 1). 针对研究区内重金属富集成土母质分区,在 6 类母质区共采集农作物和对应根系土壤样品 132 件,同时收集区内近 5 年完成的农作物和对应根系土壤样品分析数据 1 005 组^[9,11,12,24],样品点位分布情况见图 1。

根据研究区土壤分析数据统计结果显示(表 3),相对于中国土壤(A 层)背景值^[1],研究区表层土壤除 As 外,其余元素均显示富集, Cd、Cu 和 Pb 元素均显示较强的富集程度, Cd、Hg 和 Pb 元素变

表 3 研究区表层土壤重金属元素特征值¹⁾

Table 3 Descriptive statistics for heavy metals in surface soils

成土母质区	特征值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
碳酸盐岩风化物 母质区 (N = 536)	算术平均值	15.8	1.13	134	93.2	0.16	57.5	52.6	150
	标准离差	9.10	1.20	62.1	65.2	0.11	25.3	80.4	114
	变异系数	57.5	106	46.3	70.0	66.3	43.9	153	75.7
	最大值	64.4	17.4	474	274	0.96	176	1 523	1 610
	最小值	2.35	0.10	36.8	8.23	0.02	5.23	12.6	24.7
	富集系数	1.41	11.3	2.20	4.05	2.31	2.13	2.02	2.03
玄武岩风化物 母质区 (N = 207)	算术平均值	7.63	0.64	127	164	0.16	63.5	31.6	147
	标准离差	5.63	0.53	85.0	77.1	0.12	18.1	11.7	37.9
	变异系数	73.8	83.6	66.7	47.1	72.8	28.5	37.0	25.8
	最大值	59.7	5.03	434	460	0.99	109	83.2	340
	最小值	1.14	0.11	16.9	18.1	0.03	11.9	11.7	48.7
	富集系数	0.68	6.40	2.09	7.11	2.30	2.35	1.22	1.99
碎屑岩风化物 母质区 (N = 166)	算术平均值	6.01	0.46	192	94.4	0.08	65.3	27.5	121
	标准离差	4.28	0.40	101	65.2	0.09	24.6	8.59	33.4
	变异系数	71.2	86.9	52.3	69.1	104	37.7	31.2	27.7
	最大值	30.4	4.30	457	395	0.72	133	63.6	287
	最小值	1.24	0.12	43.1	11.5	0.01	12.1	8.60	34.0
	富集系数	0.54	4.61	3.15	4.10	1.19	2.42	1.06	1.63
砂(泥)岩风化物 母质区 (N = 100)	算术平均值	5.33	0.37	77.5	27.8	0.08	32.8	33.8	91.3
	标准离差	2.29	0.13	11.4	4.75	0.04	6.72	4.75	15.1
	变异系数	42.9	35.3	14.7	17.1	43.8	20.5	14.0	16.6
	最大值	13.4	0.72	109	46.1	0.21	48.6	53.8	130
	最小值	1.38	0.05	54.2	13.7	0.03	16.4	16.6	44.0
	富集系数	0.48	3.71	1.27	1.21	1.15	1.21	1.30	1.23
第四系沉积物 母质区 (N = 128)	算术平均值	7.73	0.72	168	122	0.12	63.7	45.0	152
	标准离差	5.01	1.03	95.8	52.6	0.10	10.2	69.1	125
	变异系数	64.9	142	56.9	43.1	78.5	16.0	154	82.3
	最大值	34.3	9.05	562	325	0.38	82.5	519	1 006
	最小值	2.49	0.12	60.0	31.2	0.02	42.7	14.1	44.4
	富集系数	0.69	7.24	2.76	5.31	1.78	2.36	1.73	2.06
铅锌矿集区 (N = 33)	算术平均值	22.2	2.12	92.1	105	0.19	52.5	239	379
	标准离差	15.7	1.93	40.2	72.8	0.14	18.9	273	295
	变异系数	70.6	90.9	43.6	69.1	70.4	36.1	114	78.0
	最大值	64.4	9.05	238	236	0.67	92.4	1 523	1 082
	最小值	3.01	0.19	31.2	20.2	0.05	18.3	28.3	71.3
	富集系数	1.99	21.2	1.51	4.58	2.75	1.94	9.19	5.12

1) 富集系数(无量纲)计算以中国表层土壤(A层)背景值^[1]为参考; 变异系数的单位为%,其余为mg·kg⁻¹

异系数普遍偏大(>100%),显示较大变化程度和多来源特征,As、Cd、Hg和Pb元素表层土壤相对于深层土壤强烈富集,其中,研究区80%以上面积表层土壤较深层土壤强烈富集Cd元素,且背景值相对基准值富集3.5倍,且各成土母质区元素地球化学空间分布显示不同特征。

碳酸盐岩母质区在研究区内分布最广,区内显示二叠系和三叠系碳酸盐岩呈条带状出露,该母质区土壤元素显示所有8种重金属元素均富集,其中Cd和Cu元素富集系数分别为11.3和4.05,属于强烈富集元素。受三叠纪火山活动影响,重金属Cr元素在三叠系风化产物中显示较峨眉山玄武岩更高的富集程度。Cd和Pb变异系数均大于100%,显示此母质区内Cd和Pb元素空间分布的差异性,具有多

来源特征。玄武岩母质区土壤除As外其余重金属均显示富集,其中Cd和Cu富集程度最高,富集系数分别为6.40和7.11,此母质区内强相容元素Cr和Ni的富集程度却不高,富集系数均小于2.50,这与区内峨眉山玄武岩形成过程中上地幔的不一致熔融有关^[25~27]。碎屑岩母质区土壤元素显示As贫化,Cd、Cr和Cu富集,富集系数分别为Cd(4.61)、Cr(3.15)和Cu(4.10),Hg和Pb显示与中国土壤(A层)背景值相当。砂(泥)岩区土壤亦显示As贫化,Cd元素富集系数3.71,其余重金属元素富集系数介于1.0~1.3,显示与中国土壤(A层)背景值相当。第四系松散沉积物区成土母质物源广泛,显示As贫化与Cd和Cu富集,Cd和Cu的富集系数分别为7.24和5.31。铅锌矿集区土壤显示8种重金属元素

均富集,其中 Cd 元素较中国土壤(A 层)背景值富集程度高达 21.2 倍,Pb、Zn 和 Cu 分别富集 9.19 倍、5.12 倍和 4.58 倍.区内已知的铅锌矿床(点)86 个,其中大(中)型铅锌矿 9 个,多数为浅成中-低温热液型、碳酸盐岩型和砂岩型矿床^[28],重金属 Pb、Zn、As、Hg 和 Cd 元素的空间分布与已知铅锌矿区分布范围一致,土壤中重金属的累积主要由铅锌矿成矿作用和矿山开采活动引起.

由于地表环境受人为和自然等多种因素影响,不同母质区土壤元素含量和分布特征既有一定规律,又复杂多变.总体上不同岩石类型风化物发育的土壤,与成土母岩元素地球化学特征相似,是成土母质继承性的结果^[11,12,29],其地球化学组分保留了部分原成土母质特有元素组合特征,受元素地球化学驱动机制和典型碳酸盐岩区表生富集作用的影响,重金属在表层土壤中的分布被改变,尤其是生物元素和环境元素受到的影响最为显著,呈现出区域性富集的特点^[4,8~10].区内广泛分布的铅锌矿床(点)和人类活动影响也成为土壤重金属的主要来源,矿山活动是其来源之一.

3.2 土壤中重金属赋存形态特征

根据土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)^[30]中对农用地土壤污染风险筛选值和管制值的定义,对土壤不同 pH 值和土地利用方式下的农用地土壤污染风险筛选和管制界限取值,将根系土壤中重金属污染风险划分为 4 个变化区间:安全区、筛选缓冲区、管制缓冲区和管制区.根据各成土母质区土壤样本风险分布结果显示,不同成土母质区根系土壤元素特征差异明显(图 2).碳酸盐岩母质区与铅锌矿集区内根系土壤 Cd 和 Pb 含量平均值均超过了滇东北地区表层土壤背景值 [$\omega(\text{Cd})$ 为 $0.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 为 35.1

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$].其中,除铅锌矿集区外,各成土母质区土壤 Cd 主要分布于筛选缓冲区内 [$0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \leq \omega(\text{Cd}) \leq 1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],其样本量占 67.6%.Cd 元素随着土壤 pH 值和耕作方式的变化,在缓冲区内变化,显示区内土壤在发生理化性质改变时,对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险.铅锌矿集区和部分碳酸盐岩区根系土壤 Cd 分布于管制缓冲区内 [$1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \leq \omega(\text{Cd}) \leq 4.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],样本量占 8.4%,在缓冲区内 Cd 元素随着土壤 pH 值和耕作方式的变化而改变,显示区内土壤在发生理化性质改变时,食用农产品不符合质量安全标准等,农用地土壤污染风险高[图 2(a)].全区 15.3% 的样本进入管制区内 [$\omega(\text{Cd}) \geq 4.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],主要为碳酸盐岩、玄武岩和碎屑岩母质区异常样本,其中,99.4% 的样本属于旱地耕作方式,其食用农产品不符合质量安全标准等,农用地土壤污染风险高,需要采取管控措施.同样,铅元素在铅锌矿集区和碳酸盐岩母质区根系土壤中显示较高含量水平,尤其铅锌矿集区样本远超过表层土壤背景值[图 2(b)],分布于筛选缓冲区内 [$70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \leq \omega(\text{Pb}) \leq 400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],其样本量占 5.1%,随着土壤 pH 值和耕作方式的变化风险增高.全区 13.6% 的样本分布于管制区内 [$\omega(\text{Pb}) \geq 1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$],其中,全部样本均为旱地耕作方式,其食用农产品不符合质量安全标准等,农用地土壤污染风险高,需要采取管控措施.而其余母质区内样本显示 $\omega(\text{Pb}) \leq 70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于安全区范围,区内土壤样品对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境风险低或可忽略,土壤属于安全状态.

元素赋存状态中的“潜在活动态”指水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态总和,被认为是直接决定土壤重金属生物有效性的重要指标^[31~33].本文选择

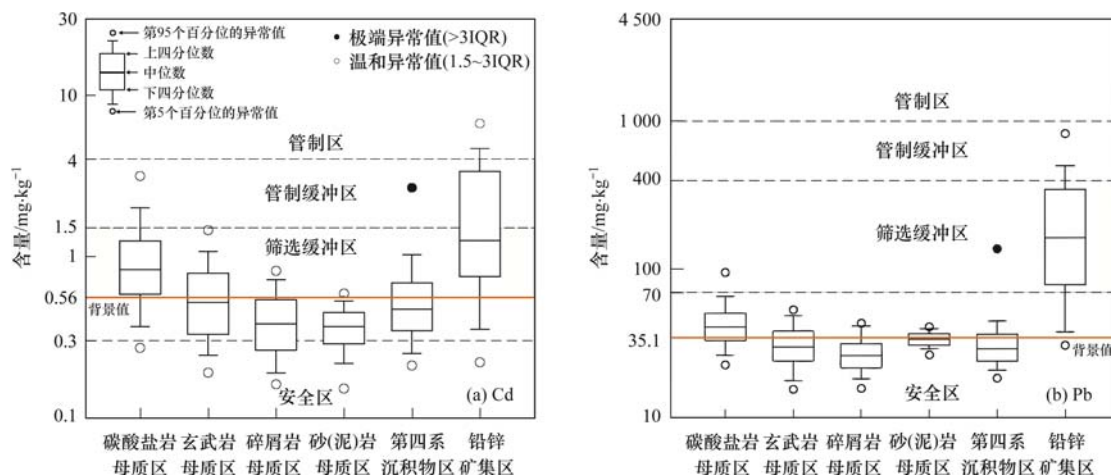


图 2 研究区根系土壤重金属污染风险分布箱式图

Fig. 2 Box diagram of heavy metal risk in root soil contamination distribution of study area

研究区农产品主要超标重金属元素 Cd 和 Pb 开展元素赋存形态提取,对不同成土母质区 132 件根系土样品进行连续七步顺序提取法分析获取元素 7 种赋存形态特征,结果显示不同母质区土壤重金属地球化学赋存形态具有较大差异(图 3). 镉元素主要以离子交换态、铁锰氧化结合态和碳酸盐结合态存在,其中离子交换态所占比例最大,以第四系沉积物区最高($54.7\% \pm 2.86\%$),其次为碎屑岩母质区和铅锌矿集区,分别为 $47.1\% \pm 2.69\%$ 和 $45.1\% \pm 3.21\%$,碳酸盐岩母质区相对较低($37.3\% \pm 2.89\%$),而碳酸盐岩母质区和铅锌矿集区 Cd 的碳酸盐结合态显示最高,分别为 $15.5\% \pm 1.40\%$ 和 $15.5\% \pm 1.60\%$,显示两个区镉元素具有较大的潜在活动变化范围. 当土壤理化性质发生改变,如土壤 pH 值降低(<6.5)或 CaO 淋溶时,Cd 碳酸盐结合态向“可活动态”转变^[4,13,34],生物有效性进一步增

强,其安全性可能发生改变.

铅元素主要以铁锰氧化结合态和残渣态为主,分别为 $35.6\% \sim 52.5\%$ 和 $28.7\% \sim 52.3\%$. 其中,玄武岩、碎屑岩和碳酸盐岩母质区残渣态均超过 35%,说明其土壤 Pb 大部分来自成土母岩的自然风化过程^[35~37],而第四系沉积物区和铅锌矿集区残渣态比例明显偏低,分别为 $28.7\% \pm 2.93\%$ 和 $34.7\% \pm 2.41\%$,其土壤铅组成除成土母岩风化来源外,还有相当部分非自然源的贡献. 铅元素中水溶态和离子交换态比例均低于 2.0%,碳酸盐结合态则显示两个区间分布:碎屑岩和玄武岩母质区分别为 $1.98\% \pm 0.40\%$ 和 $2.72\% \pm 1.06\%$;第四系沉积物区、铅锌矿集区和碳酸盐岩母质区则显示较高的碳酸盐结合态,分别为 $8.95\% \pm 0.96\%$ 、 $7.53\% \pm 0.77\%$ 和 $6.09\% \pm 0.89\%$,具有较大的铅元素潜在活动变化范围.

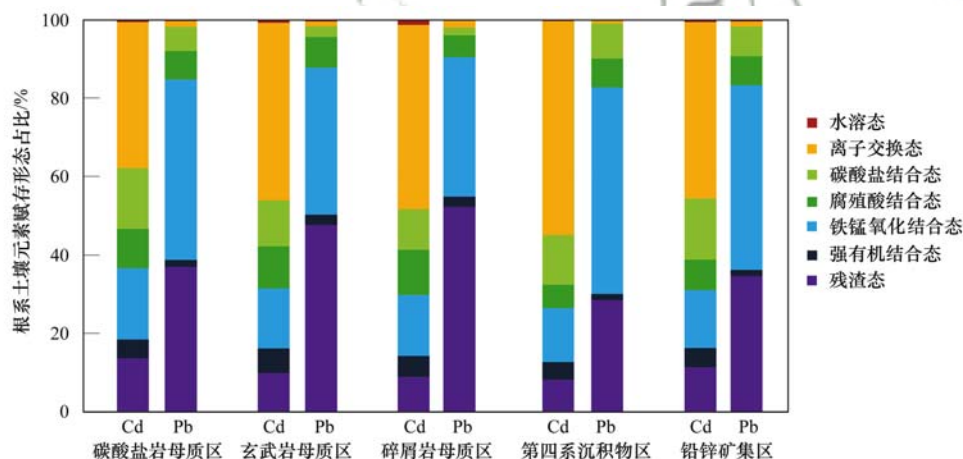


图 3 研究区根系土壤重金属 Cd 和 Pb 赋存形态分布特征

Fig. 3 Chemical fractions of heavy metals Cd and Pb in root soil of study area

3.3 土壤-作物系统重金属累积影响因素

本文采集和收集的农作物样品包含区内主要大宗农作物和经济作物共 12 个作物种类^[9,11,12,24],分布于不同成土母质区(图 1). 参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)、《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》(NY 861-2004)、《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY 659-2003)、《花椒》(GBT 30391-2013)和《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》(WM-T2-2004)^[38~42],对农作物重金属安全限量进行统计评价,结果见图 4. 从中可知,大部分农作物重金属含量普遍低于食品限量标准,属于安全范围,黄豆、土豆、玉米、水稻、苦荞和苹果出现重金属 Cd 超标现象. 其中,黄豆样本 Cd 含量平均值超过限量值($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)2 倍以上,土豆和水稻样本平均值分别低于限量值

$0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但上限值内部分样品仍显示 Cd 超标. 区内农作物 Cd 元素超标率分别为黄豆(61.5%)、土豆(38.5%)、水稻(15.7%)、苦荞(10.0%)、玉米(3.51%)和苹果(2.42%). 苦荞、核桃、黄豆、土豆、玉米、苹果和水稻显示 Pb 超标,其中,苦荞样本平均值超过其限量标准 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,大部分核桃样本同时显示 Pb 超过食品限量值. Pb 元素超标率分别为苦荞(60.0%)、核桃(30%)、苹果(8.06%)、黄豆(7.69%)、土豆(5.38%)、玉米(3.51%)和水稻(0.93%). 综上,根类作物(如土豆和天麻)对土壤 Cd 富集程度较高,作物超标情况显著,籽实类作物(如黄豆、水稻和苦荞)次之,这与刘意章等^[36]的研究结果一致,是由于土壤 Cd 主要呈离子交换态赋存于土壤溶液中,与根系内部呈现重金属动态平衡、吸收和富集引起;而土壤 Pb 主要在籽实类(如黄豆和苦荞)和

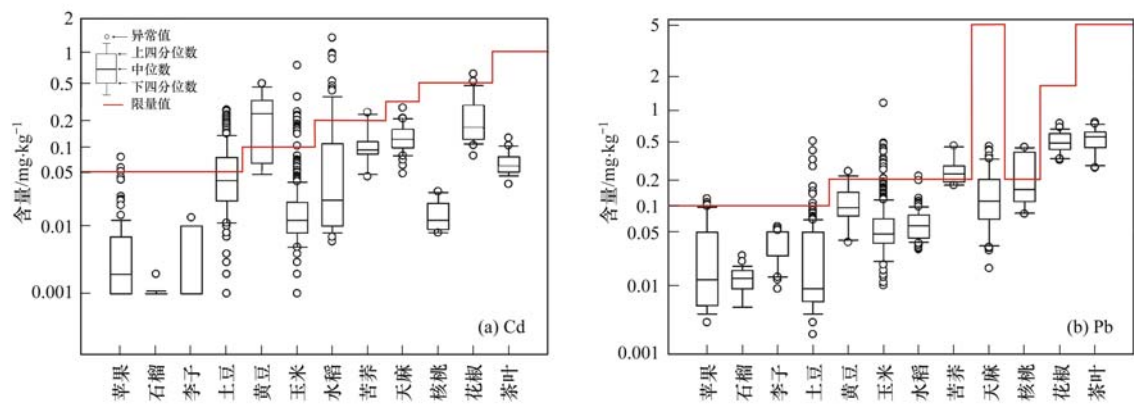


图 4 研究区农作物重金属超标情况箱式图

Fig. 4 Box diagram of heavy metals exceeding the standards in crops of study area

坚果类(如核桃)农作物中显示相对较高的富集程度.除土壤重金属赋存形式外,作物选择性吸收重金属的差异也应作为农作物安全性评价的考虑因素.

通过对不同成土母质区农作物超标样本统计结果可知,研究区内主要重金属富集地层中农作物普遍出现 Cd 和 Pb 重金属超标现象.玄武岩、碎屑岩风化物区和铅锌矿集区农作物重金属 Cd 超标率均大于 15%,以碎屑岩风化物区最高(>20%,图 5);而重金属 Pb 除铅锌矿集区外,在碳酸盐岩区亦显示大于 5.0%的超标比例.根系土中重金属相对于全区土壤背景值而言,富集系数最高的母质区依次为:铅锌矿集区>碳酸盐岩区>第四系沉积物区>玄武岩区>碎屑岩区>砂(泥)岩区.

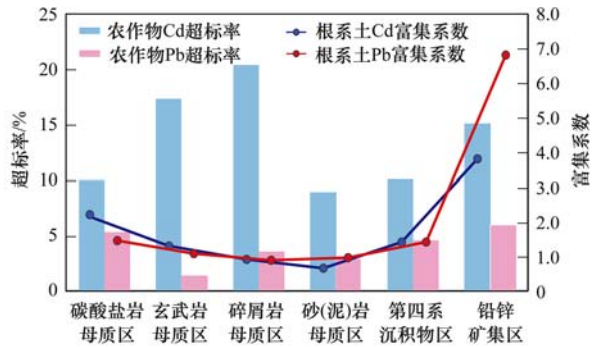


图 5 研究区农作物重金属含量特征统计

Fig. 5 Diagram of heavy metal content in crops of study area

镉元素在土壤中的地球化学赋存状态显示可活动态(水溶态+离子交换态+碳酸盐结合态)占比较高,在土壤溶液中迁移性强^[36,43],易于被作物根系吸收从而在作物中累积,导致铅锌矿集区、碎屑岩和玄武岩风化物区农作物具有较高的超标率,显示较高的污染风险.铅元素在铅锌矿集区根系土壤中富集 6.8 倍,但其农作物超标率仅 6.1%,碳酸盐岩和第四系沉积物区根系土壤铅富集程度仅为 1.5 倍,其农作物超标率却和铅锌矿集区相当(5.4%).该结果与铅元素碳酸盐结合态的含量特征相吻合,

说明碳酸盐岩和第四系沉积物区 Pb 在土壤迁移和农作物迁移累积过程中,主控因素为碳酸盐结合态比例.农作物中 Pb 超标率与土壤 Pb 富集程度解耦合,除受土壤 Pb 总量影响外,土壤理化性质的变化对其生物安全性具有主要控制作用,这与杨琼等^[13]对土壤重金属生物有效性控制因素的研究结果一致.

3.4 农作物安全风险评价

成年人在生活环境中主要受食用农产品、无意吸食和皮肤接触等方式暴露于环境重金属中^[19,44,45],其中,人体通过食用农产品摄入是重金属通过食物链在人体累积最直接的暴露方式.本文通过对研究区 12 种农作物开展重金属 Cd 和 Pb 人体食用农产品暴露途径慢性风险计算,对典型地质高背景区农产品安全性开展评价.依据文献^[46]的人体摄入食品类别划分标准,将研究区主要农产品划分为三类:谷薯类主食(包含玉米、水稻、土豆和苦荞);水果类(包含苹果、石榴和李子);大豆及坚果类(包含黄豆和核桃).天麻和花椒属于中药材和辛香料,人体摄入量少,茶叶样本数较少,此三类农产品未进行风险评价.成年人对三类农产品的消费量分别为谷薯类主食 $400\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 、水果类 $350\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 和大豆及坚果类 $35\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[46].针对三类主要农产品大类中的各个农作物种类进行消费权重计算^[18],计算获得成年人通过饮食摄入暴露途径重金属慢性摄入量(HM),并计算以饮食摄入为暴露途径的健康慢性病风险(HQ),通过饮食摄入农产品暴露途径下人体摄入重金属量与重金属指定的摄入参考计量(RfD)的比值来表征^[19],参考计量分别取值 RfD_{Cd} 为 $1.00\text{E}-03$ ^[22] 和 RfD_{Pb} 为 $3.50\text{E}-03$ ^[23].

根据美国环保署对重金属慢性风险的分级: $\text{HQ} < 0.1$ 为无风险; $0.1 \leq \text{HQ} \leq 1$ 为低风险; $1 \leq \text{HQ} \leq 1.5$ 为中度风险,表示慢性风险危害可能发生; $\text{HQ} \geq 1.5$ 为高风险^[19].表 4 列出了不同成土母质区农

产品人体饮食摄入 Cd 和 Pb 的慢性健康风险计算结果,由结果可知,谷薯类主食重金属 Cd 摄入风险均大于 0.1,显示低风险^[19],重金属 Pb 摄入风险除玄武岩区外,其余母质区均显示低慢性风险.其中,谷薯类主食重金属 Cd 慢性健康风险最高母质区为

砂(泥)岩区,风险值由大到小依次为:砂(泥)岩区>铅锌矿集区>碎屑岩区>碳酸盐岩区≈玄武岩区>第四系沉积物区;水果类重金属 Cd 慢性健康风险最高母质区亦为砂(泥)岩区,其次为碎屑岩区;大豆及坚果类显示无慢性风险.

表 4 研究区农作物人体饮食摄入 Cd 和 Pb 健康风险

Table 4 Health risks of human dietary intake of Cd and Pb in agricultural products from study area

重金属	成土母质区	谷薯类主食		水果		大豆及坚果	
		HM/mg·d ⁻¹	HQ	HM/mg·d ⁻¹	HQ	HM/mg·d ⁻¹	HQ
Cd	碳酸盐岩母质区	0.011	0.172	0.002	0.027	0.005	0.074
	玄武岩母质区	0.011	0.170	0.001	0.015		
	碎屑岩母质区	0.018	0.278	0.003	0.040	0.005	0.080
	砂(泥)岩母质区	0.051	0.791	0.004	0.054		
	第四系沉积物区	0.011	0.163	0.002	0.032		
	铅锌矿集区	0.029	0.447				
Pb	碳酸盐岩母质区	0.025	0.111	0.009	0.038	0.006	0.025
	玄武岩母质区	0.019	0.083	0.006	0.029		
	碎屑岩母质区	0.026	0.114	0.010	0.046	0.003	0.013
	砂(泥)岩母质区	0.029	0.129	0.018	0.077		
	第四系沉积物区	0.029	0.128	0.015	0.066		
	铅锌矿集区	0.033	0.146				

谷薯类主食重金属 Pb 慢性健康风险最高母质区为铅锌矿集区,其风险值由大到小依次为:铅锌矿集区>砂(泥)岩区≈第四系沉积物区>碎屑岩区>碳酸盐岩区>玄武岩区;水果类重金属 Pb 慢性健康风险最高母质区为砂(泥)岩区,其次为第四系沉积物区;大豆及坚果类显示碳酸盐岩区和碎屑岩区无慢性风险,但风险值碳酸盐岩区略高.

综合区内不同农产品在不同成土母质区的重金属风险情况可知,砂(泥)岩区、碎屑岩区和铅锌矿集区均显示出较高的重金属 Cd 摄入风险,而铅锌矿集区、砂(泥)岩区和第四系沉积物区则显示较高的重金属 Pb 摄入风险,该 4 类成土母质区内土壤重金属慢性健康风险应引起重视.重金属慢性风险主要在谷薯类主食中显示低风险,在水果、大豆及坚果类中显示无风险.由于研究区内主要农作物种植空间分布不均,所收集的农作物数据存在空间和时间范围上的局限性,加之本文主要针对超出农产品限量值^[38]的重金属元素 Cd 和 Pb 开展研究,虽然部分农产品显示无慢性健康风险(HQ<0.1),但若存在多项重金属多种暴露途径同时累积,区内重金属将不可避免地对人体健康产生影响.由此可见,进一步开展重金属高背景区土壤重金属生物有效性研究,加强区内农作物的动态监测与风险实时评估并及时向生态环境和农业部门作出预警势在必行.

4 结论

(1)研究区内铅锌矿集区土壤镉和铅重金属均高于土壤污染管制值,具有较高土壤污染风险,其余

各成土母质区土壤 Cd 介于筛选-管制缓冲区内,Pb 属于安全范围.

(2)土壤 Cd 主要以离子交换态形式存在,以第四系沉积物区比例最高,其次为碎屑岩母质区和铅锌矿集区.土壤 Pb 主要以铁锰氧化结合态和残渣态为主,其主要来自成土母岩的自然风化,第四系沉积物区和铅锌矿集区主要为自然与非自然源 Pb 混合.

(3)土豆和黄豆中重金属镉超标严重,苦荞和核桃中重金属铅超过限量值,农作物重金属镉超标率为:碎屑岩区>玄武岩区>铅锌矿集区>碳酸盐岩区≈第四系沉积物区>砂(泥)岩区.

(4)谷薯类主食存在农作物单类摄入健康低风险,镉摄入风险由大到小依次为:砂(泥)岩区>铅锌矿集区>碎屑岩区>碳酸盐岩区≈玄武岩区>第四系沉积物区,铅摄入风险由大到小依次为:铅锌矿集区>砂(泥)岩区≈第四系沉积物区>碎屑岩区>碳酸盐岩区>玄武岩区,水果类、大豆及坚果类未显示单类农作物摄入风险.

(5)砂(泥)岩、碎屑岩、第四系沉积物母质区和铅锌矿集区农作物存在饮食摄入慢性健康低风险.其中砂(泥)岩区和铅锌矿集区农作物重金属 Cd 摄入风险最高,碎屑岩区与第四系沉积物区农作物分别显示 Cd 和 Pb 摄入风险,建议加强该 4 类成土母质区内农作物的动态监测与风险实时评估.

参考文献:

[1] 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.
[2] Hseu Z Y, Lai Y J. Nickel accumulation in paddy rice on

- serpentine soils containing high geogenic nickel contents in Taiwan[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, **39** (6): 1325-1334.
- [3] Liu Y Z, Xiao T F, Perkins R B, *et al.* Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **176**: 42-49.
- [4] Wen Y B, Li W, Yang Z F, *et al.* Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China [J]. *Chemosphere*, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125620.
- [5] Wang H X, Li X M, Chen Y, *et al.* Geochemical behavior and potential health risk of heavy metals in basalt-derived agricultural soil and crops: a case study from Xuyi County, Eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139058.
- [6] Zeng G, Chen L H, Hu S L, *et al.* Genesis of Cenozoic low-Ca alkaline basalts in the Nanjing basaltic field, Eastern China: the case for mantle xenolith-magma interaction [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, **14**(5): 1660-1677.
- [7] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, **4**: 1-51.
- [8] 成杭新, 彭敏, 赵传冬, 等. 表生地球化学动力学与中国西南土壤中化学元素分布模式的驱动机制 [J]. *地学前缘*, 2019, **26**(6): 159-191.
- Cheng H X, Peng M, Zhao C D, *et al.* Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of distribution patterns of chemical elements in soil, Southwest China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 159-191.
- [9] 周亚龙, 郭志娟, 王成文, 等. 云南省镇雄县土壤重金属污染及潜在生态风险评估 [J]. *物探与化探*, 2019, **43**(6): 1358-1366.
- Zhou Y L, Guo Z J, Wang C W, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in Zhenxiang County, Yunnan Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, **43**(6): 1358-1366.
- [10] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [11] 彭敏. 西南典型地质高背景区土壤-作物系统重金属迁移富集特征与控制因素 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Peng M. Heavy metals in soil-crop system from typical high geological background areas, Southwest China: transfer characteristics and controlling factors [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [12] 肖高强, 陈杰, 白兵, 等. 云南典型地质高背景区土壤重金属含量特征及污染风险评估 [J]. *地质与勘探*, 2020, **57**(5): 1077-1086.
- Xiao G Q, Chen J, Bai B, *et al.* Content characteristics and risk assessment of heavy metals in soil of typical high geological background areas, Yunnan Province [J]. *Geology and Exploration*, 2021, **57**(5): 1077-1086.
- [13] 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 等. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统 Cd 等重金属生态风险评估 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2021, **51**(8): 1317-1331.
- Yang Q, Yang Z F, Zhang Q Z, *et al.* Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(7): 1126-1139.
- [14] DD 2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求 [S].
- [15] DZ/T 0289-2015, 区域生态地球化学评价规范 [S].
- [16] DZ/T 0258-2014, 多目标区域地球化学调查规范(1:250000) [S].
- [17] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范 [S].
- [18] 陈同斌. 区域土壤环境质量 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [19] USEPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [M]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2002.
- [20] 国家卫生计生委. 中国居民营养与慢性病状况报告(2015年) [R]. 北京: 人民卫生出版社, 2015.
- [21] USEPA. Exposure factors handbook [M]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2011.
- [22] USEPA. Regional screening levels (RSLs)-generic tables [EB/OL]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>, 2021-11-17.
- [23] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [24] 宋云涛, 吕许朋, 杨志斌, 等. 云南省盐津县峨眉山玄武岩区土壤铜元素地球化学特征及环境风险评价 [J]. *物探化探计算技术*, 2021, **43**(4): 501-512.
- Song Y T, Lv X P, Yang Z B, *et al.* Study on geochemical characteristics and environmental risk assessment of copper in soil upon Emeishan basalt in Yanjin, Yunnan Province, China [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, **43**(4): 501-512.
- [25] 宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 等. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因 [J]. *矿物岩石*, 2002, **22**(4): 27-32.
- Song X Y, Hou Z Q, Wang Y L, *et al.* The mantle plume features of Emeishan basalts [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, **22**(4): 27-32.
- [26] 龚闻敏. 云南会泽峨眉山玄武岩特征及成因 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2017.
- Gong W M. Research of characteristics and petrogenesis of Emeishan basalt in Huize area of Yunnan [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2017.
- [27] 魏杰. 峨眉山玄武岩岩石学、岩石地球化学及其地球动力学意义 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Wei J. The petrology and litho-geochemistry and geo-dynamic significance of Emishan basalt in Mts Emei of Sichuan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [28] 刘洪涛, 陈启良, 程胜辉, 等. 中国矿产地质志·云南卷·铅锌矿产 [M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [29] 张倩, 韩贵琳. 贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评估 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3269-3277.
- Zhang Q, Han G L. Speciation characteristics and risk assessment of soil heavy metals from Puding karst critical zone, Guizhou Province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3269-3277.
- [30] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- [31] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析 [J]. *土壤学报*, 2003, **40**(6): 921-928.
- Wu X M, Pan G X. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soils in Nanjing City [J]. *Acta Pedologica*

- Sinica, 2003, **40**(6): 921-928.
- [32] Jayarathne A, Egodawatta P, Ayoko G A, *et al.* Assessment of ecological and human health risks of metals in urban road dust based on geochemical fractionation and potential bioavailability [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 1609-1619.
- [33] Hu B, Guo P Y, Su H T, *et al.* Fraction distribution and bioavailability of soil heavy metals under different planting patterns in mangrove restoration wetlands in Jinjiang, Fujian, China[J]. *Ecological Engineering*, 2021, **166**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106242.
- [34] 郭超, 文字博, 杨忠芳, 等. 典型岩溶地质高背景土壤镉生物有效性及其控制因素研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2019, **55**(4): 678-687.
- Guo C, Wen Y B, Yang Z F, *et al.* Factors controlling the bioavailability of soil cadmium in typical karst areas with high geogenic background[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2019, **55**(4): 678-687.
- [35] Liu G N, Wang J, Liu X, *et al.* Partitioning and geochemical fractions of heavy metals from geogenic and anthropogenic sources in various soil particle size fractions[J]. *Geoderma*, 2018, **312**: 104-113.
- [36] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, Southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [37] 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 等. 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3913-3923.
- Tang S Q, Liu X J, Yang K, *et al.* Migration, transformation characteristics, and ecological risk evaluation of heavy metal fractions in cultivated soil profiles in a typical carbonate-covered area[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3913-3923.
- [38] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [39] NY 861-2004, 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量[S].
- [40] NY 659-2003, 茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量[S].
- [41] GB/T 30391-2013, 花椒[S].
- [42] WM T2-2004, 药用植物及制剂外经贸绿色行业标准[S].
- [43] Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, *et al.* Cadmium sorption and desorption in soils: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, **42**(5): 489-533.
- [44] USEPA. Guidelines for the health risk assessment of chemical mixtures [M]. Washington: US Environmental Protection Agency, 1986.
- [45] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (part A) [M]. Washington: US Environmental Protection Agency, 1989.
- [46] 中国营养学会. 中国居民膳食指南科学研究报告[R]. 北京: 中国营养学会, 2021.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} -O ₃ 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 _x -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-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)