

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价

唐启琳^{1,2}, 刘秀明^{1,3*}, 刘方², 汪花^{1,2}, 王世杰^{1,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 普定 562100)

摘要: 贵州碳酸盐岩区镉(Cd)呈较高地球化学背景分布。为了解喀斯特地区耕地土壤Cd的含量特征,特选取小尺度区域——罗甸北部喀斯特地区土壤作为研究对象,以非喀斯特地区土壤作为对照组,运用地统计分析和GIS相结合的方法研究土壤Cd含量的空间分布特征,并采用潜在生态风险指数法和健康风险评价法对土壤Cd污染的潜在生态风险程度以及对成人和儿童的健康风险进行评价。结果表明,喀斯特区土壤Cd含量显著高于非喀斯特区($P < 0.05$),其中耕地土壤Cd几何平均值分别为 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,林地土壤Cd几何平均值分别为 $1.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以GB 15618-2018中Cd的风险筛选值和风险管控值为限定值,喀斯特区耕地土壤Cd样点超标率分别为90%和22%,非喀斯特区耕地土壤Cd样点超标率分别为30%和12%,表现出不同程度的Cd富集。从空间分布来看,耕地土壤Cd含量中值风险区和高值风险区主要分布在喀斯特地区,分别呈现中-强程度的潜在生态风险和极强潜在生态风险;低值风险区分布在交砚乡等部分非喀斯特地区,呈低潜在生态风险;健康风险评价表明耕地土壤Cd虽尚未对人体产生非致癌健康风险和致癌健康风险,但喀斯特区成人和儿童3种暴露途径的非致癌风险值和致癌风险值均高于非喀斯特区。综上,贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤Cd污染风险问题突出,应进一步加强土壤-植物-人体体系Cd风险评估研究,并针对不同耕地土壤Cd污染风险区采取合理的方案措施加以防控和治理。

关键词: 镉; 土壤; 污染; 风险评价; 罗甸县; 喀斯特

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4628-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812197

Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou

TANG Qi-lin^{1,2}, LIU Xiu-ming^{1,3*}, LIU Fang², WANG Hua^{1,2}, WANG Shi-jie^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China)

Abstract: Background levels of cadmium (Cd) in carbonate rock areas of Guizhou Province are high. In order to understand the characteristics of Cd in arable soils in these karst areas, the soils in the northern county of Luodian were selected as the study object. By comparing soils in non-karst areas, the distribution characteristics of soil Cd were studied by combining geostatistical analysis and GIS, and the potential ecological risk index and health risk were used to evaluate the potential level of risk to adults and children. The results show that the arable soil Cd content in this karst area is significantly higher than that in non-karst areas ($P < 0.05$), with a geometric mean of $1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. In comparison, the geometric mean of soil Cd content in forested land in the same areas is $1.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Based on "soil pollution risk control standards", the Cd content of 90% and 22% of arable soil samples was higher than the risk screening value and the risk control value for karst and non-karst areas, respectively. The areas with medium and high Cd values were mainly distributed in the karst areas, presenting medium to strong ecological risks and extremely strong ecological risks, respectively. In contrast, the areas with the lowest Cd concentrations were distributed in the non-karst areas of Jiaoyan, presenting low potential ecological risk. The health risk assessment showed that the non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of the three exposure pathways for adults and children in the karst areas are significantly higher than those in the non-karst areas, but the Cd content in the soil does not present non-carcinogenic and carcinogenic risks to local residents. Overall, the problem of Cd pollution in arable soils in the karst area of northern Luodian, Guizhou, is prominent. Therefore, the study of the risks posed by Cd pollution to the soil-plant-human system should be strengthened, and appropriate measures should be taken to prevent and control Cd pollution in the areas at risk.

Key words: cadmium; soil; pollution; risk assessment; Luodian County; karst

收稿日期: 2018-12-25; 修订日期: 2019-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800602); 贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5648)

作者简介: 唐启琳(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境地球化学,E-mail: tangqilin0620@163.com

* 通信作者, E-mail: liuxiuming@vip.skleg.cn

土壤是人类生活和农业生产不可或缺的重要资源^[1]。如今,我国有 1/5 的耕地受重金属污染,其中 Cd 污染耕地涉及 11 省的 25 个地区。文献[2]显示,土壤 Cd 是点位超标率最高的重金属,达到 7%。Cd 是一种难降解、易积累、毒性大的重金属元素^[3],同时也是人类和植物的非必需元素^[4]。土壤 Cd 污染将影响农产品质量和食品安全,可通过土壤→农作物→人体的途径迁移,最终危害人类健康^[5,6]。目前,土壤 Cd 已是全球性污染物质之一,土壤 Cd 的污染问题已成为国内外学者研究的热点之一^[7,8]。贵州是我国典型的喀斯特地区,碳酸盐岩出露面积达到 73%,土壤 Cd 背景值可达 $0.659 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中石灰岩(土)背景值高达 $1.115 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[9]。贵州省 1:20 万地球化学图集显示,地表土壤中 Cd 呈较高地球化学背景的地区主要分布在黔南、黔西南台地边缘生物礁滩相碳酸盐岩区。目前,土壤 Cd 的相关研究多集中于矿区^[10,11]、冶炼厂^[12,13]等人为因素导致的污染,关于高地背景区土壤 Cd 累积污染特征的研究尚少。在地统计学相关分析中多侧重于大中尺度的研究区,对于需要进行管理和利用的土地资源,小尺度空间变异和评价更能反映污染的真实情况,而且空间变异在小尺度上通常与土地利用类型以及精准农业生产措施密切相关^[14]。因此,小尺度的土壤研究可以提供更加细致的基础调查数据,真正地指导耕地土壤 Cd 的防治工作以及合理的农业活动,这使得在喀斯特地区开展以乡镇为单位的小尺度耕地土壤 Cd 污染研究显得极为重要。综上所述,本文选取小尺度区域——贵州罗甸县北部地区作为研究对象,了解不同地貌分区下土壤 Cd 含量特征,利用半变异函数对土壤 Cd 含量进行空间相关性分析,采用普通克里格插值法揭示喀斯特地区土壤 Cd 的空间变异结构和分布规律,并利用潜在生态风险指数法和健康风险法对研究区土壤 Cd 含量进行评价,以期为喀斯特区土壤 Cd 的污染防治和健康风险防范提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省罗甸县北部,包括边阳镇、木引镇和沫阳镇等 10 个乡镇,土地面积约为 $1\,106.46 \text{ km}^2$,地势较高,海拔介于 $800 \sim 1\,000 \text{ m}$ 之间,气候属于中亚热带湿润季风型,气温平均值 $16.5 \sim 20.5^\circ\text{C}$,年均降雨量为 $1\,200 \text{ mm}$,为当地多种经济作物提供了极有利的气候条件。境内出露的地层以三叠系最为发育,约占研究区面积的一半以

上,二叠系次之,石炭系和泥盆系分布面积不大。除三叠纪拉丁期外,广泛分布华力西-印支构造阶段拉张裂隙环境的浅水碳酸盐岩组合,小部分的碎屑岩沉积组合。根据出露的岩层,可以将本文研究区分为以下 4 个地貌组合:①平岩-董架峰丛、洼地、低中山地貌,以出露大面积纯质石灰岩为主,为典型的岩溶地貌;②栗木和罗沙-边阳东部属于岩溶残岩、盆地、低中山地貌,以燧石灰岩、硅质岩为主;③交砚-董王-木引和罗沙-边阳西部中切割灰岩、砂质页岩低中山地貌,主要出露灰岩和砂质岩两大类。其中交砚南部、董王-木引西部出露灰岩面积较大,交砚北部、董王-木引东部和罗沙-边阳西部地区主要以砂页岩为主,因断层作用形成面积不等的槽谷坝子,植被生长较好,是罗甸县北部农田的主要分布地区;④沫阳-董当属于中部低山河谷盆地,主要以砂岩为主。本文根据不同岩性将研究区分为喀斯特区和非喀斯特区^[15]。喀斯特区主要包括纯碳酸盐岩、不纯碳酸盐岩、碳酸盐岩与非碳酸盐岩夹层三大类,非喀斯特区包括非碳酸盐岩(碎屑岩等)。其中喀斯特区岩石裸露较多,土壤较贫瘠,且含砾石较多,发育的土壤主要为石灰土,在非喀斯特区分布主要以碎屑岩沉积,形成的土层较厚,砾石较少,易发育成黄壤。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 土壤样品采集

为对比不同地貌类型(喀斯特区和非喀斯特区)和不同土地利用类型(林地和耕地)土壤 Cd 含量特征,以罗甸县 1:5 万地质图、土地利用现状图、土壤类型图等为底图,利用 Arcgis10.2 将其进行数字化,并在研究区的乡镇行政区划图上进行网格布点,将研究区划分为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的采样单元,每个采样单元随机设置 1~2 个采样点,样点的布设遵循“随机”和“等量”的原则,布点尽量远离村庄、河流和道路等。在实际采样中,根据预设的采样点进行野外采样,考虑到土地利用的变化和地形因素,采样点可在附近 500 m 内进行调整,并根据前期调研情况,对喀斯特区域加密采样点的布设,使用 GPS 确定中心采样点的地理位置,记录采样点相关信息,最后共采集 207 个样本。具体采样点位分布见图 1。

其中,采集喀斯特区耕地土壤 128 件,林地土壤 37 件,非喀斯特区耕地土壤 34 件,林地土壤样品 8 件。每个耕地采样点范围控制在 100 m^2 以内,采用梅花 5 点采样法,用竹削木刀各取表层($0 \sim 20 \text{ cm}$)土壤约 1 kg ,均匀混合后用四分法从中选取 1 kg 土样作为代表该点的混合样品。并选择地势相对较高,远离人类工农业活动,没有或人为影响小的范围采

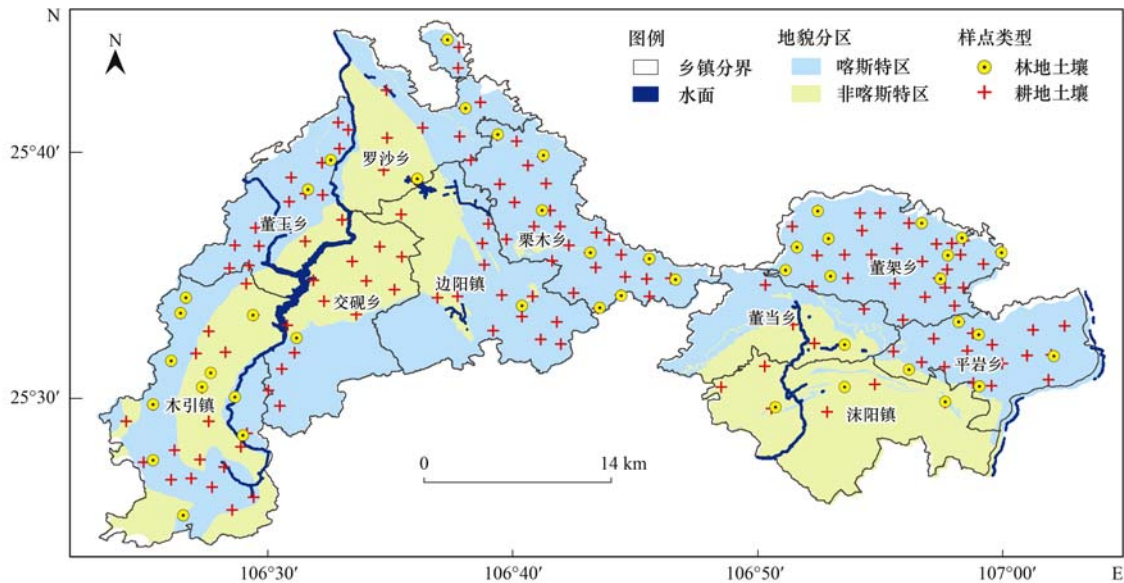


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

集林地土壤样本 45 个, 林地土壤采用单点采集, 除去表层枯枝落叶和腐殖质, 取 5 ~ 10 cm 的土层。

1.2.2 样品处理与测试

土壤样品摊放在洁净牛皮纸上于室内自然风干, 除去石块、植物根系和凋落物等杂物, 均匀混合后取适量土壤进行研磨, 全部通过 200 目尼龙筛, 将研磨好的土壤样品密封干燥备用, 用于测量土壤 Cd 全量, 样品在采集、混合、研磨等处理过程中均使用木头、塑料或玛瑙等工具。称取 50 mg 过 200 目尼龙筛的土壤样品于聚四氟乙烯内胆中, 分别加入适量 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$, 置于钢套中高温高压密闭消解, 并使用 ICP-MS (NexION 300X, 美国 PE 公司) 测定土壤 Cd 含量。Cd 检出限为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 样品分析过程中加入国家土壤标准物质 (GBM908-10、MRGeo08 和 OGGeo08)、空白样品和平行样进行质量控制, 实验空白均在仪器检测限以下, 标准物质回收率在 95% ~ 110% 之间, 平行样相对偏差均小于 10%。土壤 pH 采用 1:2.5 土液比浸提法, pH 计测定。

1.3 数据处理与图形制作

本文采用 $\bar{X} \pm 3S$ 方法 ($\bar{X}$ 为算术平均值, S 为算术标准差) 对异常数据进行处理^[16], 运用 Spass 17.0 和 Excel 2013 进行实验数据的统计和分析处理, 利用 GS + 9.0 软件进行半变异函数的拟合和参数的确定, 应用 ArcGIS 10.2 中普通 Kriging 插值法完成空间分布图的制作。

1.4 研究方法

1.4.1 地统计分析方法

重金属空间分布是由结构性和随机性因素

共同作用的结果, 在地统计分析中, 块金系数、基台值、变程均是半方差模型的重要参数, 用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度。块金值 (C_0) 代表人为因素引起误差值和变异值, 偏基台值 (C) 代表成土母质等非人为因素引起的变异, 块金效应等于 $[C_0 / (C_0 + C)]$, 其用于表示土壤的相关性, 代表测定误差或者土壤性质的局部变化所造成的随机变异^[17], 当块金系数小于 25% 时, 表示变量以结构性变异 (自然因素) 为主; 当块金系数大于 75% 时, 表示样本间的变异主要由随机因素 (人为因素) 引起; 当块金值在 25% ~ 75% 之间, 表示变量具有中等程度的空间相关性, 受自然因素和人为因素的共同影响。

1.4.2 评价方法

本文采用潜在生态风险指数法对土壤 Cd 含量进行生态风险评价, 其中土壤 Cd 的毒性响应系数为 30^[18,19], 由于本研究区土壤背景值较高, 不能较好反映耕地土壤 Cd 污染情况, 为保证评价结果的准确性和科学性, 以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618-2018) 中 Cd 的风险筛选值 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $5.5 < \text{pH} \leq 7.5$) 作为土壤 Cd 潜在生态风险指数法中的参比值^[20]。并利用健康风险评价方法估算研究区不同地貌分区下耕地土壤 Cd 含量对成人和儿童健康所产生风险的概率^[21], 健康风险评估分为暴露剂量计算和暴露风险评估两个过程^[22,23]。本文暴露模型参数的选择参考文献^[24], 并结合相关学者的研究成果及相关的技术指导规范进行计算^[25,26]。

2 结果与讨论

2.1 土壤 Cd 含量描述性统计分析

依据统计学方法, 对 207 个表层土壤采样点

Cd 含量数据进行描述性统计分析. 由于土壤样品 Cd 含量变化幅度较大, 均呈偏态分布, 经过对数转换后均呈正态分布(图 2 和图 3), 因此, 土壤 Cd 含量用几何平均值来表示.

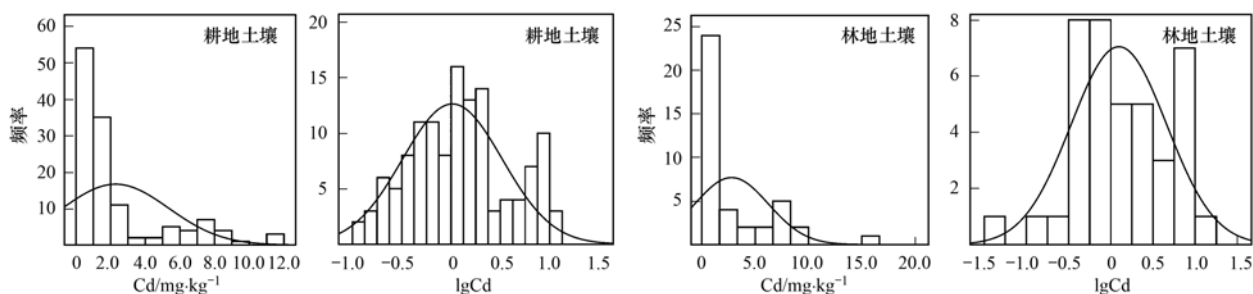


图 2 喀斯特区土壤 Cd 含量对数正态分布转换前后分布直方图

Fig. 2 Histogram of Cd concentrations in different types of soils in karst areas before and after logarithmic transformation

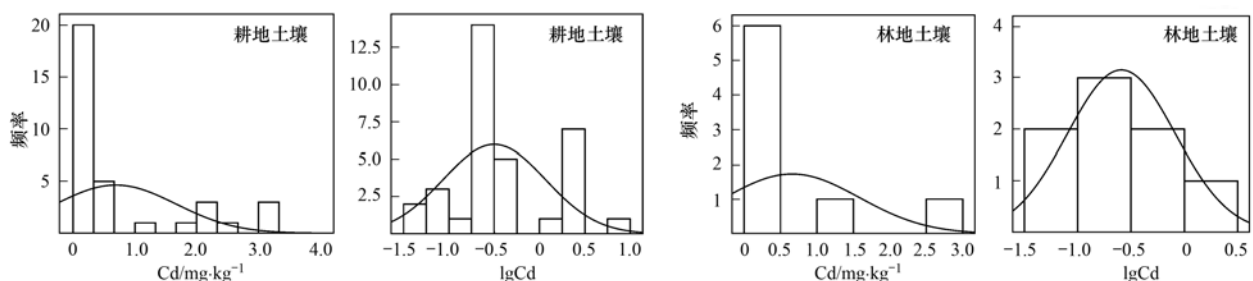


图 3 非喀斯特区不同类型土壤 Cd 含量对数正态分布转换前后分布直方图

Fig. 3 Histogram of Cd concentration in different types of soils in non-karst areas before and after logarithmic transformation

研究区土壤 Cd 含量描述性统计结果见表 1, 喀斯特区耕地土壤 Cd 几何平均值为 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 含量范围为 $0.12 \sim 11.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其 Cd 含量范围最大值是风险筛选值 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$) 的 37.7 倍, 林地土壤 Cd 几何平均值为 $1.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 范围为 $0.16 \sim 15.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其含量最大值是风险筛选值的 52 倍, 其中有 90% 的耕地土壤样点 Cd 含量高于风险筛选值, 22% 的耕地土壤样品 Cd 含量高于风险管控值 ($3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 非喀斯特区耕地土壤和林地土壤 Cd 含量几何平均值分别为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其范围分别为 $0.04 \sim 3.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.04 \sim 2.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其含量范围最大值分别是风险筛选值的 10 倍和 9 倍 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$), 其中有 30% 耕地土壤样点 Cd 含量高于风险筛选值, 12% 的耕地土壤样品 Cd 含量高于风险管控值 ($2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 说明研究区土壤 Cd 存在不同程度的累积, 可能是受地形和成土母质等自然因素的影响^[27,28], 且研究区变异系数均大于 1, 属于强变异, 可能存在外界干扰引起的点源污染, 如农药化肥施用、污水灌溉等人为因素的影响^[29,30]. 总体而言, 研究区耕地土壤 Cd 含量特征为: 喀斯特区 > 非喀斯特区, 根据独立样本 *T* 检验, 两者含量呈显著

性差异 ($P < 0.05$), 罗甸北部喀斯特区耕地土壤 Cd 污染风险远高于非喀斯特区, 结合罗慧等^[31]的研究结果, 说明人为活动虽然会对研究区土壤 Cd 含量产生一定影响, 但并不是造成喀斯特区耕地土壤样本普遍存在高 Cd 风险的主要原因. 本次研究中采样点的布设避开了矿山开采和城镇建设区域所带来的人为污染影响^[32,33], 且我国化肥、农药中的重金属 Cd 含量少, 利用率仅为 30%, 对土壤 Cd 的贡献率相对较低^[34~36]. 由于地形的影响, 喀斯特地区多为坡耕地, 易受到雨水的冲刷, 化肥的使用率也低于全国水平^[37]. 前人研究表明, 碳酸盐岩地区土壤 Cd 的本底值高, 以石灰岩最为明显^[38,39]. 也有研究认为碳酸盐岩地区上覆石灰土与下伏的碳酸盐岩具有明显的物源继承关系, 石灰土即是碳酸盐岩风化作用残积的产物, 会呈现不同程度的 Cd 富集特征^[40,41]. 综上所述, 笔者认为研究区碳酸盐岩风化成土是该地区土壤 Cd 的主要来源, 而耕地土壤 Cd 含量高可能是由于喀斯特地区土壤 Cd 的高背景值导致的. 在此次研究数据中发现喀斯特区林地土壤 Cd 含量高于耕地土壤, 根据独立样本 *T* 检验, 两者差异并不显著 ($P > 0.05$). 可能是秸秆还田、深翻土壤等措施降低耕地土壤 Cd 的含量^[42], 也可能是土壤长期耕作栽培过程中, 农作物根系对 Cd 的吸收富集作

表 1 研究区土壤 Cd 含量描述统计

Table 1 Summary statistics for soil Cd concentrations in the study area							
地貌类型	土壤类型	分布类型	样本数目	Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			变异系数
				算术均值 $\pm$ 标准差	几何均值 $\pm$ 标准差	范围	
喀斯特区	耕地土壤	对数正态	128	2.40 ± 2.74	1.33 ± 0.49	0.12 ~ 11.30	1.14
	自然土壤	对数正态	37	3.12 ± 3.57	1.57 ± 0.54	0.16 ~ 15.61	1.14
非喀斯特区	耕地土壤	对数正态	34	0.51 ± 0.76	0.27 ± 0.45	0.04 ~ 3.05	1.49
	自然土壤	对数正态	8	0.58 ± 0.92	0.22 ± 0.63	0.04 ~ 2.70	1.58
总体		对数正态	207	2.15 ± 2.78	0.98 ± 0.57	0.04 ~ 15.61	1.29

用^[43],在此基础上,后期将展开对土壤-农作物体系中 Cd 含量迁移转化的研究.

2.2 土壤 Cd 的空间分布特征

在 GS + 9.0 软件下通过反复实验,获得各模型的拟合函数及参数值,见表 2. 其中 R^2 代表决定系数, RSS 表示残差值. 当 R^2 越接近 1, RSS 越小时,

表示拟合的模型效果越好^[44]. 根据表 2, 本研究最终选择指数模型作为最优拟合模型. 其 R^2 达到 0.802, RSS 为 0.012, 块金系数为 0.24, 说明变量具有较强程度空间相关性, 并且结构性因素(自然因素)影响较大, 即受地形、气候和土壤母质等自然条件影响显著.

表 2 土壤 Cd 含量半变异函数拟合模型及参数值

Table 2 Semi-variogram fitting model and parameter values of soil Cd content						
理论模型	变程 (A)	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金系数 [$C_0/(C_0 + C)$]	决定系数 (R^2)	残差值 (RSS)
指数模型	14640	0.100	0.410	0.24	0.802	0.012
球状模型	16890	0.161	0.360	0.44	0.792	0.013
高斯模型	13717	0.180	0.361	0.50	0.771	0.014
线性模型	30752	0.246	0.391	0.63	0.465	0.032

根据半变异函数得到参数和最优插值模型, 绘制出研究区土壤 Cd 含量空间分布(图 4), 在喀斯特地貌形成过程中, 由于碳酸盐岩在成土过程中发生淋溶, 使土壤中 Cd 发生不同程度的累积, 也使土壤中 Cd 的分布存在空间差异性. 根据 GB 15618-2018 中 Cd 风险筛选值和风险管控值, 将研究区土壤 Cd 含量低于 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域定义为 Cd 低值

风险区, 将含量在 $0.3 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间的区域定义为 Cd 中值风险区, 含量大于 $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域定义为 Cd 高值风险区. 罗甸县北部土壤 Cd 含量的高值风险区和低值风险区有较强的地带性, 其中, Cd 低值风险区零星分布在沫阳镇和交砚乡等地区; 中值区分布面积较广, 主要集中于平岩乡、董架乡和边阳镇等地区; Cd 高值风险区则主要分布在木引镇

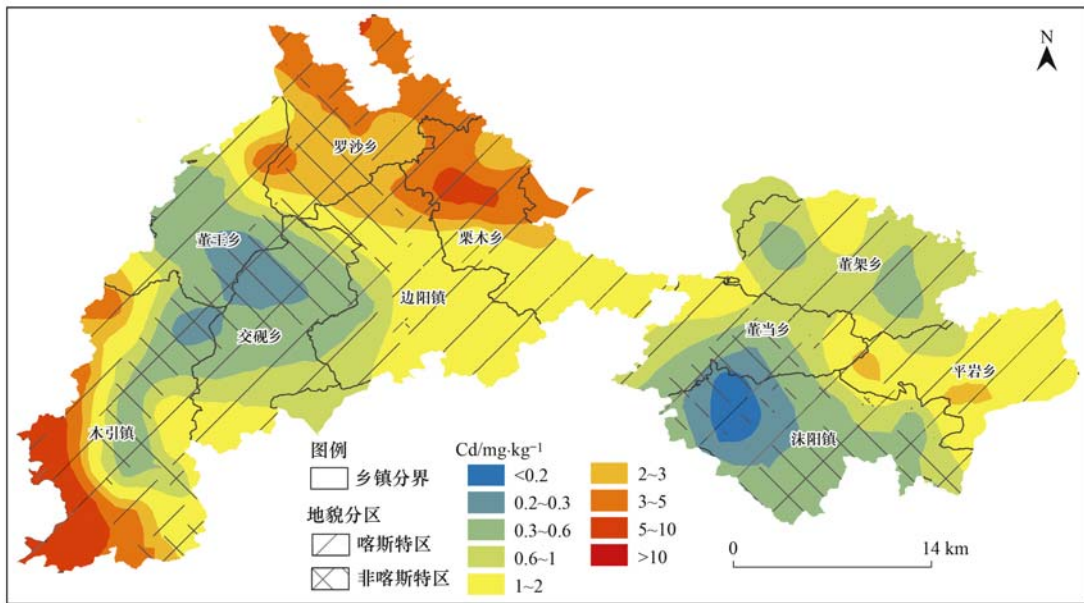


图 4 研究区耕地土壤 Cd 含量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil Cd content in the study area

西部、罗沙乡北部和栗木乡北部地区。将土壤 Cd 含量空间分布图和地貌类型分布图进行叠加分析,发现研究区土壤 Cd 的中值风险区和高值风险区在空间上与喀斯特地区具有较好地耦合关系,低值区则与部分非碳酸岩出露的非喀斯特地区吻合。由于非喀斯特地区出露地层岩性比较复杂,地形复杂,多为山坡地形,母岩风化后在雨水冲刷、地表径流等常年影响作用下,容易堆积形成碳酸盐岩和碎屑岩相混合的多种岩性发育的残坡积土,从而使沫阳镇东部和罗沙乡西部等部分非喀斯特地区在空间上 Cd 的富集程度较高。

2.3 土壤 Cd 的生态风险评价

根据潜在生态风险系数(E_n)表达式计算出研究区土壤 Cd 的潜在生态风险系数,基于 GIS 工具

绘制出其空间分布(图 5),并对林地土壤和耕地土壤的潜在生态风险状况进行分析(表 3)。可知,研究区林地土壤和耕地土壤处于低潜在生态风险的样本比例分别为 17.78% 和 25.93%,处于极强潜在生态风险的样本比例分别为 26.67% 和 18.52%,其余样本均处于中等-很强潜在生态风险之间。总体上,低潜在生态风险样点比例为 24.64%,中等、强、很强潜在生态风险程度的样本比例分别为 20.77%、19.32% 和 14.98%,达到极强潜在生态风险的土壤样本比例为 20.29%。结合地貌分区来看,除交砚乡和董王乡等部分非喀斯特地区处于低潜在生态风险以外,其余地区均处于中等-极强潜在生态风险,尤其是罗沙乡、栗木乡北部和木引村西部处于极强潜在生态风险。

表 3 土壤 Cd 潜在生态风险评价结果/%
Table 3 Evaluation results of potential ecological risks for soil Cd/%

项目	$E_n < 40$	$40 \leq E_n < 80$	$80 \leq E_n < 160$	$160 \leq E_n < 320$	$E_n \geq 320$
风险程度	低	中等	强	很强	极强
林地土壤	17.78	24.44	17.78	13.33	26.67
耕地土壤	25.93	19.75	20.37	15.43	18.52
总体	24.64	20.77	19.32	14.98	20.29

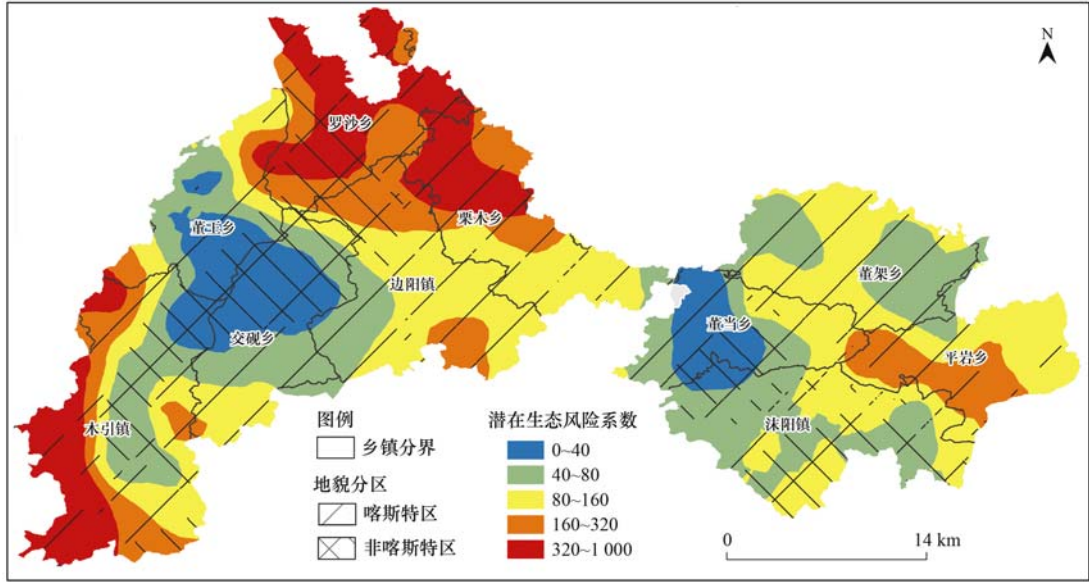


图 5 研究区土壤 Cd 潜在生态风险系数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the potential ecological risk coefficient for soil Cd in the study area

2.4 土壤 Cd 健康风险评价

根据世界卫生组织(WHO)和美国 EPA 综合风险信息数据库(IRIS)数据资料显示,Cd 具有非致癌风险(HQ)和致癌风险(R),本次评价的暴露介质主要为土壤,暴露途径为手口摄入、皮肤接触和呼吸接触,土壤中 Cd 元素会通过这 3 种暴露途径在人体体内富集,危害人体健康。根据评价方法的步骤、公式和参考值分别计算出不同地貌分区耕地

土壤 Cd 对成人和儿童造成的致癌风险值和非致癌风险值(表 4)。喀斯特区和非喀斯特区土壤 Cd 的 HQ 值均低于 1, R 值均低于 10^{-6} ,表明土壤 Cd 并没有对当地暴露人群产生非致癌风险和致癌风险^[45]。由于儿童体重较轻,导致儿童的 HQ 值和 R 值均高于成人,这和前人的研究结果一致^[46]。通过对比发现,喀斯特区成人和儿童在 3 种暴露途径的 HQ 值和 R 值均高于非喀斯特区,且无论是成人还

是儿童,手口摄入 Cd 的风险值最高.在本次健康风险评价中,由于本研究模型只考虑了土壤 Cd 一种介质对人体造成的风险,并未考虑农产品 Cd 等的摄入风险,所以可能低估了 Cd 暴露的风险水平,使评价存在着不确定性和局限性.但本研究依据不

同地貌分区进行风险评估在一定程度上仍可以为研究区 Cd 含量的污染防治和治理提供科学依据.总体来看,土壤 Cd 虽尚未对人体产生非致癌健康风险和致癌健康风险,但喀斯特区土壤 Cd 导致的风险不容忽视.

表 4 不同地貌分区和不同暴露途径下成人与儿童人体健康风险指数

Table 4 Human health risk indices for adults and children in different landscapes and for different exposure pathways						
项目	分区	人群	手口摄入	皮肤接触	呼吸接触	合计
HQ	喀斯特区	成人	1.90×10^{-3}	1.65×10^{-5}	7.73×10^{-6}	1.92×10^{-3}
		儿童	1.66×10^{-2}	7.98×10^{-5}	5.25×10^{-5}	1.67×10^{-2}
	非喀斯特区	成人	3.86×10^{-4}	3.36×10^{-6}	1.57×10^{-6}	3.91×10^{-4}
		儿童	3.38×10^{-3}	1.62×10^{-5}	1.06×10^{-5}	3.41×10^{-3}
	合计		2.23×10^{-2}	1.16×10^{-4}	7.24×10^{-5}	2.25×10^{-2}
R	喀斯特区	成人	3.26×10^{-7}	1.16×10^{-9}	1.32×10^{-9}	3.28×10^{-7}
		儿童	9.50×10^{-7}	1.87×10^{-9}	3.00×10^{-9}	9.55×10^{-7}
	非喀斯特区	成人	6.61×10^{-8}	2.36×10^{-10}	2.69×10^{-10}	6.66×10^{-8}
		儿童	1.93×10^{-7}	3.79×10^{-10}	6.09×10^{-10}	1.94×10^{-7}
	合计		1.54×10^{-6}	3.65×10^{-9}	5.20×10^{-9}	1.54×10^{-6}

罗甸县北部喀斯特区耕地土壤呈不同程度的 Cd 潜在生态风险和健康风险,可能会对当地的农产品质量和人体健康构成威胁,根据 GB 15618-2018 中农用地土壤污染风险值的使用,当地应重视喀斯特地区耕地土壤 Cd 含量风险问题,采取适当的方案措施加以防控和治理.针对研究区土壤 Cd 中值风险区,应加强土壤和农产品 Cd 含量的监测,对种植食用农产品不符合安全标准的土壤,应采取农艺调控、替代种植等措施;对于 Cd 高值风险区的土壤,应避免种植食用农产品、采取退耕还林等措施,并通过化学、物理和生物等方法对区域土壤 Cd 污染进行修复,从而降低土壤 Cd 污染的潜在风险.

3 结论

(1)罗甸县北部喀斯特区耕地土壤 Cd 含量显著高于非喀斯特区耕地土壤 ($P < 0.05$),以 GB 15618-2018 中 Cd 的风险筛选值和风险管控值为限定值,喀斯特区耕地土壤 Cd 样点超标率分别为 90% 和 22%,非喀斯特区耕地土壤 Cd 样点超标率分别为 30% 和 12%.

(2)土壤 Cd 含量具有较强空间自相关性,主要以结构性变异为主,受成土母质等自然条件影响显著.土壤 Cd 含量中值风险区和高值风险区在空间上主要分布在喀斯特地区,分别呈中等-很强潜在生态风险和极强潜在生态风险,低值区则分布在交砚乡等部分非喀斯特地区,呈低潜在生态风险.

(3)耕地土壤 Cd 虽未对人体产生非致癌风险和致癌风险.但喀斯特区成人和儿童 3 种暴露途径

的非致癌风险和致癌风险均明显高于非喀斯特区,且儿童的非致癌风险和致癌风险均高于成人,罗甸县北部喀斯特区耕地土壤 Cd 的健康风险不容忽视.

参考文献:

[1] 何林华,高小红.三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评价——以青海省玉树县为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1071-1080.
He L H, Gao X H. Assessment of potential ecological risk for soil heavy metals in Sanjiang Source Region: A case study of Yushu County, Qinghai Province [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(6): 1071-1080.

[2] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J]. 资源与人居环境, 2014, (4): 26-27.

[3] Suthar S, Nema A K, Chabukdhara M, et al. Assessment of metals in water and sediments of Hindon River, India: Impact of industrial and urban discharges [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1-3): 1088-1095.

[4] 苗亚琼,林清. 广西土壤重金属镉污染及对人体健康的危害[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 171-173.
Miao Y Q, Lin Q. Pollution caused by heavy metal cadmium to the soil in Guangxi and its harm to human health [J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(5): 171-173.

[5] 邱孟龙,李芳柏,王琦,等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 298-305.
Qiu M L, Li F B, Wang Q, et al. Spatio-temporal variation and source changes of heavy metals in cultivated soils in industrial developed urban areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 298-305.

[6] Hu Y N, Liu X P, Bai J M, et al. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(9): 6150-6159.

- [7] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1888-1900.
Song B, Yang Z J, Zhang Y X, *et al.* Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River drainage basin in Guangxi[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1888-1900.
- [8] 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 等. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2391-2398.
Liu Y Z, Xiao T F, Ning Z P, *et al.* Cadmium and selected heavy metals in soils of Jianping area in Wushan County, the Three Gorges region: Distribution and source recognition[J]. Environmental Science, 2013, **34**(14): 2391-2398.
- [9] 何邵麟, 龙超林, 刘应忠, 等. 贵州地表土壤及沉积物中镉的地球化学与环境问题[J]. 贵州地质, 2004, **21**(4): 245-250.
He S L, Long C L, Liu Y Z, *et al.* Geochemistry and environment of the cadmium in the soil and sediments at the surface of Guizhou Province[J]. Guizhou Geology, 2004, **21**(4): 245-250.
- [10] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(5): 879-885.
Hu G C, Zhang L J, Qi J Y, *et al.* Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(5): 879-885.
- [11] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(10): 1992-1998.
Wu D, Yang X Z, Li C X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(10): 1992-1998.
- [12] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(11): 1832-1838.
Lu S J, Wang Y Y, He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb-Zn mine in Huize Country[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(11): 1832-1838.
- [13] 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.
- [14] 金修齐. 小尺度农田土壤重金属空间分布、来源解析及污染评价[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [15] 许璟, 安裕伦, 胡锋, 等. 基于植被覆盖与生产力视角的亚喀斯特区域生态环境特征研究——以黔中部分地区为例[J]. 2015, **34**(4): 644-654.
Xu J, An Y L, Hu F, *et al.* Research on characteristics of ecological environment in a semi-karst region based on vegetation cover and NPP: A case study in central Guizhou Province[J]. Geographical Research, 2015, **34**(4): 644-654.
- [16] 张金兰, 欧阳婷萍, 黄铁兰, 等. 农田表层土壤镉的典型空间插值方法对比研究[J]. 生态科学, 2017, **36**(6): 130-136.
Zhang J L, Ouyang T P, Huang T L, *et al.* Comparison of typical interpolation methods for spatial distribution of Cd in soil[J]. Ecological Science, 2017, **36**(6): 130-136.
- [17] 黄维恒, 包立, 林健, 等. 沱江流域耕地土壤重金属分布及生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2017, **34**(5): 456-465.
Huang W H, Bao L, Lin J, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in arable soils in Bijiang watershed, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, **34**(5): 456-465.
- [18] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.
Dai B, Lü J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong province, Eastern China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 507-515.
- [19] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2322-2328.
Liu Y N, Zhu S F, Wei X F, *et al.* Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2322-2328.
- [20] 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].
- [21] 王铁军, 查学芳, 熊威娜, 等. 贵州遵义高坪水源地岩溶地下水重金属污染健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 46-50.
Wang T J, Zha X F, Xiong W N, *et al.* Primary study of health risk assessment of heavy metals in karst groundwater in Gaoping area in Zunyi City, Guizhou Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, **21**(1): 46-50.
- [22] 常仕镭, 叶芝祥. 成都市地表灰尘重金属污染分布特征及健康风险评价[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(2): 70-75.
Chang S L, Ye Z X. The pollution state and health risk assessment of heavy metals in road dust of Chengdu[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, **30**(2): 70-75.
- [23] 谷蕾, 仝致琦, 宋博, 等. 基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险: 以连霍高速郑州-商丘段为例[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3577-3584.
Gu L, Tong Z Q, Song B, *et al.* Health assessment of heavy metals in roadside soils at different operation time: A case study of Zhengzhou-Shangqiu section along the Lianyungang-Horgas highway[J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3577-3584.
- [24] US EPA. Risk assessment guidance for superfund, volume I: Human health evaluation manual[R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 1989.
- [25] 杨淑颐, 阳锋, 张程, 等. 成都市文娱区表层土壤重金属健康风险评价[J]. 地球与环境, 2018, **46**(5): 490-497.
Yang S Y, Yang F, Zhang C, *et al.* Health risk assessment of topsoil heavy metals in entertainment areas of Chengdu[J]. Earth and Environment, 2018, **46**(5): 490-497.
- [26] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [27] 石占飞, 王力. 神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(6): 1150-1158.
Shi Z F, Wang L. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(6): 1150-1158.
- [28] 苏春田, 唐健生, 潘晓东, 等. 不同地质条件下土壤重金属质量评价比较[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(4): 25-28.

- Su C T, Tang J S, Pan X D, *et al.* Evaluation comparison of heavy metals quality in soil in difference geological condtions [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, **28**(4): 25-28.
- [29] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(10): 1727-1736.
- Fan T, Ye W L, Chen H Y, *et al.* Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(10): 1727-1736.
- [30] 王金霞, 罗乐, 陈玉成, 等. 三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(12): 2711-2717.
- Wang J X, Luo L, Chen Y C, *et al.* The characteristics and potential risk of heavy metals pollution in farmland soil of an agricultural land in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(12): 2711-2717.
- [31] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤Cd污染特征及来源[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- Luo H, Liu X M, Wang S J, *et al.* Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in South China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(5): 1538-1544.
- [32] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [33] 刘芳, 兰翠玲, 黄科瑞, 等. 广西百色不同功能区土壤重金属污染与来源[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(2): 232-237.
- Liu F, Lan C L, Huang K R, *et al.* Contamination and source identification of soil heavy metals in different functional zones at Baise, Guangxi[J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(2): 232-237.
- [34] Yu C X, Peng B, Peltola P, *et al.* Effect of weathering on abundance and release of potentially toxic elements in soils developed on Lower Cambrian black shales, P. R. China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2012, **34**(3): 375-390.
- [35] Lin W, Cui X F, Cheng H G, *et al.* A review of soil cadmium contamination in China including a health risk assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(21): 16441-16452.
- [36] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(2): 466-480.
- Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(2): 466-480.
- [37] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(1): 92-97.
- Ruan Y L, Li X D, Li T Y, *et al.* Heavy metal pollution in agricultural soils of the karst areas and its harm to human health [J]. *Earth and Environment*, 2015, **43**(1): 92-97.
- [38] 何腾兵, 董玲玲, 李广枝, 等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要重金属含量差异性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **27**(1): 188-193.
- He T B, Dong L L, Li G Z, *et al.* Differences of heavy metal contents in soils derived from different parent materials/rocks in Karst mountain area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **27**(1): 188-193.
- [39] 朱礼学. 成都平原西部土壤中镉的分布与镉污染[J]. *四川环境*, 2001, **20**(2): 41-43, 47.
- Zhu L X. Distribution and pollution of cadmium in soils of west Chengdu Plain[J]. *Sichuan Environment*, 2001, **20**(2): 41-43, 47.
- [40] 刘秀明, 王世杰, 冯志刚, 等. 石灰土物质来源的判别——以黔北、黔中几个剖面为例[J]. *土壤*, 2004, **36**(1): 30-36.
- Liu X M, Wang S J, Feng Z G, *et al.* Identification of origin of limestone soil-case study of profiles in central and north Guizhou [J]. *Soils*, 2004, **36**(1): 30-36.
- [41] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, **29**(5): 441-450.
- Wang S J, Ji H B, Ou Y Z Y, *et al.* Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1999, **42**(6): 572-581.
- [42] 张燕, 铁柏清, 刘孝利, 等. 玉米秸秆生物炭对水稻不同生育期吸收积累As、Cd的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(3): 500-505.
- Zhang Y, Tie B Q, Liu X L, *et al.* Effects of corn stalk biochar on absorption and accumulation of arsenic and cadmium in rice at different growth stages[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(3): 500-505.
- [43] 秦鱼生, 詹绍军, 喻华, 等. 镉在不同质地水稻土剖面中的分布特征及与作物吸收的关系[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(2): 476-480.
- Qin Y S, Zhan S J, Yu H, *et al.* Distribution characteristics of soil cadmium in different textured paddy soil profiles and its relevance with cadmium uptake by crops[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(2): 476-480.
- [44] 钟雪梅, 于洋, 陆素芬, 等. 金属矿业密集区广西南丹土壤重金属含量特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(9): 1694-1702.
- Zhong X M, Yu Y, Lu S F, *et al.* Evaluation of heavy metal contamination in soils in mining-intensive areas of Nandan, Guangxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(9): 1694-1702.
- [45] Si W T, Ji W H, Feng Y, *et al.* The function of constructed wetland in reducing the risk of heavy metals on human health [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **181**(1-4): 531-537.
- [46] 陈星, 马建华, 李新宁, 等. 基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1068-1074.
- Cheng X, Ma J H, Li X N, *et al.* Health risk assessment of soil heavy metals in residential communities built on brownfields[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1068-1074.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)