

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共附生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测

戴亮亮¹, 徐宏根^{1*}, 巩浩¹, 彭志刚¹, 肖凯琦¹, 吴欢欢², 许青阳¹, 郭军¹, 汤媛媛¹, 张俊¹

(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 长沙 410600; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710000)

摘要: 碳酸盐岩风化形成的 Cd 自然高背景值区一直以来都备受关注, 但由于岩溶区不同母质土壤的理化性质、Cd 含量和生物有效性存在显著差异, 导致利用土壤 Cd 总量对耕地进行环境质量分类存在一定的局限性. 通过系统采集典型岩溶区残坡积母质和冲积母质表层土壤及玉米样品, 分析玉米 Cd、土壤 Cd、pH 和氧化物等指标, 揭示了不同母质土壤 Cd 地球化学特征及其生物有效性的影响因素, 并基于预测模型提出科学有效的耕地利用区划建议. 结果表明, 岩溶区不同母质土壤理化性质分异明显, 冲积母质土壤 Cd 含量较低, 但生物有效性高, 玉米籽实 Cd 超标率高. 玉米籽实 Cd 生物富集系数与土壤 CaO、pH、Mn 和 TC 呈极显著负相关关系, 相关系数分别 -0.385、-0.620、-0.484 和 -0.384. 与多元线性回归预测模型相比, 采用随机森林模型预测玉米 Cd 富集系数的准确度更高. 研究结果提出了一种基于土壤 Cd 和预测农作物籽实 Cd 含量的地块尺度耕地安全利用新方案, 充分利用耕地资源, 确保农作物安全.

关键词: 镉(Cd); 碳酸盐岩; 影响因素; 预测; 区划方法

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2243-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205248

Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize

DAI Liang-liang¹, XU Hong-gen^{1*}, GONG Hao¹, PENG Zhi-gang¹, XIAO Kai-qi¹, WU Huan-huan², XU Qing-yang¹, GUO Jun¹, TANG Yuan-yuan¹, ZHANG Jun¹

(1. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Changsha 410600, China; 2. Xi'an Mineral Resources Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710000, China)

Abstract: The naturally high background value region of Cd derived from the weathering of carbonate has received wide attention. Due to the significant difference in soil physicochemical properties, soil Cd content, and bioavailability of different parent materials in the karst area, there are certain limitations in using the total soil Cd content to classify the environmental quality of cultivated land. In this study, surface soil and maize samples of eluvium and alluvial parent material in typical karst areas were collected systematically; the contents of maize Cd, soil Cd, pH, and oxides were analyzed, the Cd geochemical characteristics of different parent soils and the influencing factors of their bioavailability were revealed, and scientific and effective arable land use zoning suggestions based on the prediction model were suggested. The results showed that the physicochemical properties of different parent material soils in the karst area were obviously different. The alluvial parent material soil had low Cd content but high bioavailability, and the maize Cd exceeding rate was high. The maize Cd bioaccumulation factor was significantly negatively correlated with soil CaO, pH, Mn, and TC, and the correlation coefficients were -0.385, -0.620, -0.484, and -0.384, respectively. Compared with the multiple linear regression prediction model, using the random forest model to predict the maize Cd enrichment coefficient had higher accuracy and precision. Furthermore, a new scheme for the safe utilization of cultivated land at the plot scale based on soil Cd and predicted crop Cd content was proposed in this study, making full use of arable land resources to ensure crop safety.

Key words: cadmium(Cd); carbonate rock; influencing factors; prediction; zoning method

镉(Cd)是一种对人体有毒的非必需元素,存在于大多数食物中,由于其较强的环境迁移性和生态毒理性,容易随着食物链危害人体健康安全,受到了人们的极大关注^[1]. 有关报道指出,土壤 Cd 不但会影响植物的生长和农作物的品质^[2],而且人类长期食用 Cd 超标的食物可造成肾脏、肝脏和骨骼等一系列疾病^[3]. 相对于其他重金属元素 Cd 的生物可利用度要高得多^[4,5],是影响农产品安全、危害人体健康的主要重金属元素之一. 因此,实现 Cd 污染土壤的安全利用是建设高质量耕地、保障粮食安全的重要措施之一.

土壤 Cd 等重金属主要有自然来源和人为来源两种来源,自然来源与岩石的风化成土作用密切相

关^[6],碳酸盐岩风化成土过程中会造成 Cd 的次生富集,这是我国西南地区碳酸盐岩发育土壤中 Cd 异常富集的主要原因^[7,8]. 近些年大量研究表明,碳酸盐岩发育的土壤 Cd 总量普遍较高,具有典型的高地质背景,相对于非岩溶区,岩溶区土壤中 Cd 有效态含量低,生物有效性较低,生态危害相对较小^[9~11].

目前岩溶区土壤 Cd 生物有效性及其影响因素的对比研究主要是针对不同成土母岩,如对比岩溶

收稿日期: 2022-05-23; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211576)

作者简介: 戴亮亮(1993~),男,硕士,工程师,主要研究方向为环境地球化学及土壤污染防治, E-mail: dailiangliang@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者, E-mail: honggen_xu@163.com

区与非岩溶区^[12~14],很少有针对岩溶区不同母质(残坡积母质和冲积母质)土壤 Cd 的地球化学特征及其生物有效性对比研究. 其次植物吸收土壤 Cd 是一个复杂的过程,除了与土壤 Cd 总量有关外,还受多种土壤理化性质影响,如 pH、TC 和 Fe/Mn 氧化物等^[15,16]. 新发布的土壤环境质量 GB 15618-2018 对我国土壤环境质量进行了分类,但其仅依照土壤 Cd 总量对耕地进行分类,由于不同地区土壤理化性质等方面的差异,可能造成岩溶区土壤分类的“误判”和“漏判”,使得该标准存在一定的局限性.

因此,本文以湖南省龙山县典型岩溶区为研究区,针对岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及其生物有效性进行系统研究. 主要目的:一是对比研究典型岩溶区不同母质土壤 Cd 的地球化学特征及其生物有效性;二是分析 Cd 生物有效性影响因素,建立玉米籽实 Cd 生物富集系数预测模型;三是根据土壤 Cd 和预测的玉米籽实 Cd 含量提出地块尺度耕地安全利用建议,实现土地资源的充分利用.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

研究区位于湖南省龙山县东北部茨岩塘镇,处于东经 109°35'53"~109°39'20",北纬 29°24'36"~29°26'25"之间,地势呈现四周高中间低,地层主要为寒武系高台组碳酸盐岩^[17]. 气候属亚热带湿润季风气候,四季分明,雨热同期,夏多暴雨,秋多连绵阴雨,冬多严寒冰冻,平均温度为 13.4℃.

根据《土地质量 地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016),在研究区系统采集了表层土壤 105 件,玉米籽实样品 44 件,残坡积母质土壤采样点主要位于坡腰及坡脚的坡耕地,冲积母质土壤采样点位于盆地低洼处的旱地(图 1). 土壤样品采集 0~20 cm 的耕层土壤,采集过程中避开了明显的人为污染源,土壤样品自然风干后,用 20 目尼龙网过滤,清除杂质后放入塑料瓶中待测. 玉米样品在无污染、无扬尘和通风的条件下自然风干后,送至实验室进一步处理.

1.2 样品分析方法

所有土壤和玉米样品均送湖北省地质实验测试中心进行分析测试. 土壤样品的 pH 值使用离子选择电极(ISE)方法,用土壤:水悬浮液为 1:25 (质量浓度)测定^[18]. 用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定土壤 SiO₂、Al₂O₃ 和 TFe₂O₃ 含量. 用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测试土壤 Mn、CaO、MgO 和 Na₂O 含量^[19]. 用高频燃烧红外吸收法(HFIR)测

定土壤 TC 含量^[20]. 用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试土壤 Cd 和玉米籽实 Cd 含量. 土壤样品分析时插入 12 个国家一级标准物质,玉米籽实分析插入 2 个国家一级标准物质和重复样品进行质量控制,所有标准物质测定值与标准物质推荐值的相对误差均小于 10%,重复样品的相对标准偏差值在 5% 以内,所有空白对照结果均小于元素检出限. 各分析方法的检出限、准确度和精密度均符合或优于《土地质量 地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)和《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0253-2014)要求.

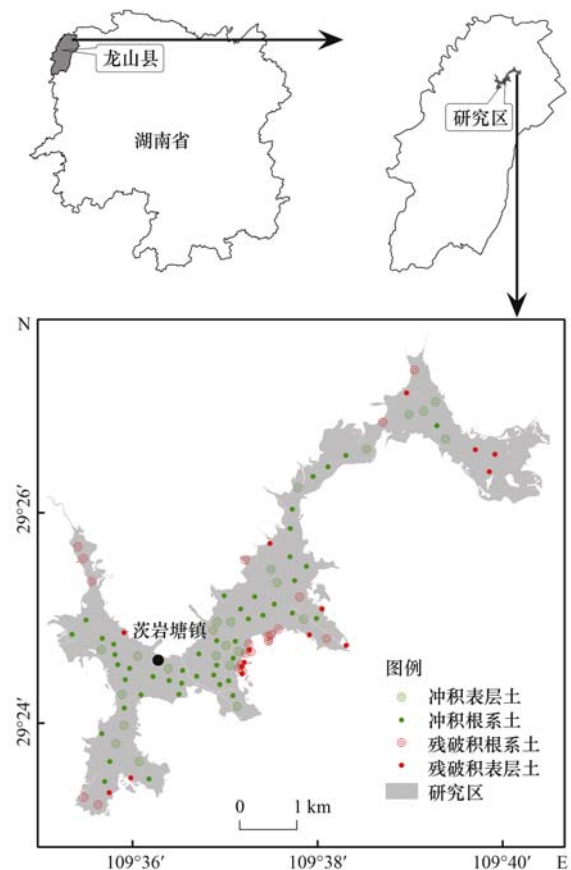


图 1 研究区地理位置及采样点示意

Fig. 1 Location and sampling sites of the study area

1.3 预测模型的建立

生物富集系数(BCF)是评价 Cd 从土壤到农作物的迁移和积累能力的重要指标,它在一定程度上反映着土壤-农作物系统中 Cd 元素迁移的难易程度^[21,22]. 已经有相关研究提出了基于 BCF 与土壤理化性质之间相关性的预测模型^[23,24]. BCF 的计算公式为:

$$BCF_i = C_{i\text{作物籽实}} / C_{i\text{根系土}} \quad (1)$$

式中,BCF_i 为元素 i 的生物富集系数, C_{i作物籽实} 为作物籽实中 i 元素的含量, C_{i根系土} 为根系土中 i 元素的含量.

1.3.1 随机森林模型

随机森林算法是一种用随机方式建立的,以决策树为基学习器构建的集成学习算法,每个决策树之间都是相互独立的^[25],善于捕捉多维数据间的非线性复杂关系,使得预测模型的结果具有较高的精确度和泛化性能,已经成功地应用到各领域的多种预测模型之中^[26].随机森林模型可以被视为一个黑盒模型,根据复杂多样的因素预测某个变量,本文中输入变量为土壤理化指标,输出的预测结果为玉米籽实 Cd 的 BCF.模型通过 n 轮训练,构建一个基学习器序列 $\{h_1(x), h_2(x), h_3(x), \dots, h_n(x)\}$,整体模型的预测结果为各基学习器预测结果的平均值^[27]:

$$H(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i(x) \tag{2}$$

式中, $H(x)$ 为模型最终的预测结果, $h_i(x)$ 为每一个基学习器的预测结果.

本文随机森林建模是通过 Python 语言中的 sklearn 工具包实现,建模过程中最主要的参数是基学习器的数量 $n_estimators$ 的设定,这个参数对模型的精确性影响是单调递增的, $n_estimators$ 越大,模型的效果往往越好,但任何模型都有决策边界, $n_estimators$ 达到一定的程度之后,随机森林的精确性往往不再上升或开始波动,并且 $n_estimators$ 越大,需要的计算量和内存也越大,训练的时间也会越来越长.因此为了在训练难度和模型效果之间取得平衡,本文的 $n_estimators$ 值采用随机森林预测模型常用值 100.

1.3.2 多元线性回归模型

之前的研究表明,多元线性回归模型可以根据土壤理化性质(如 pH、Mn 和 TC)来预测农作物中重金属的富集系数^[15],因此本文玉米 Cd 富集系数的多元线性回归模型是在前人研究的理论基础上,利用玉米籽实 Cd 含量与土壤理化性质之间的相关性建立的^[28].

$$\lg BCF_{Cd} = a + (b + \dots + n) \times \lg(\text{soil properties}) \tag{3}$$

式中, a 、 b 和 n 为各土壤理化性质的回归系数, soil properties 为土壤理化性质指标含量,根据土壤理化性质与玉米籽实 Cd 的相关性确定.

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2019、IBM SPSS 24.0 和 Origin 2019 等数据处理软件对样品数据进行基础的处理、统计分析和图件编制.

2 结果与讨论

2.1 表层土壤理化指标含量特征

研究区表层土壤主要理化性质指标含量见表 1.表层土壤中 TFe_2O_3 、Mn、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 TC 的平均含量与全国碳酸盐岩表层土壤呈现一致的特征,但明显高于全国表层土壤^[29],而 pH、CaO、 Na_2O 则呈现相反的趋势,这一结果反映了研究区土壤淋滤作用强烈,湿热的气候条件对土壤化学成分和 pH 值的显著影响^[30].其次研究区碳酸盐岩不同母质(残坡积母质和冲积母质)表层土壤中 CaO、Mn、TC 和 pH 等理化性质指标也呈现一定差异.

表 1 研究区表层土壤样品元素含量特征¹⁾

Table 1 Element content characteristics of surface soil samples in the study area											
项目	岩溶区残坡积母质($n=35$)				岩溶区冲积母质($n=70$)				总体 ($n=105$)	碳酸盐岩表层 土壤 ^[29]	全国表层 土壤 ^[29]
	最小值	平均值	中位数	最大值	最小值	平均值	中位数	最大值			
Cd	0.37	0.64	0.61	1.50	0.13	0.37	0.35	1.01	0.47	0.31	0.15
Mn	411	971	1 016	1 342	215	587	446	1 381	719	731	552
SiO_2	63.7	69.7	70.0	75.3	70.3	73.4	73.4	76.7	72.2	63.0	65.0
Al_2O_3	9.7	11.8	11.9	14.1	9.7	11.7	11.6	15.1	11.7	14.1	4.4
TFe_2O_3	3.85	4.85	4.78	5.71	3.42	4.46	4.48	5.41	4.59	5.79	4.35
MgO	0.97	2.40	2.21	4.88	1.00	1.76	1.73	2.90	1.98	1.30	1.46
CaO	0.38	1.38	1.18	4.23	0.20	0.38	0.33	1.63	0.72	0.92	2.79
Na_2O	0.21	0.29	0.28	0.47	0.17	0.28	0.27	0.45	0.28	0.50	1.27
TC	1.09	2.14	1.98	3.78	1.05	1.56	1.54	2.76	1.76	1.92	1.50
pH	5.62	7.34	7.49	8.25	4.40	5.48	5.34	7.16	6.12	7.06	7.67

1) Cd 和 Mn 单位为 $mg \cdot kg^{-1}$, SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、MgO、CaO、 Na_2O 、 Na_2O 和 TC 单位为%, pH 无量纲

结果表明,岩溶区残坡积母质土壤中 CaO 和 pH 要明显高于冲积母质土壤,这与之前的许多研究结果一致^[31,32],岩溶区残坡积母质土壤中 $\omega(CaO)$ 和 pH 平均值分别为 1.38% 和 7.34,而冲积母质土壤中 $\omega(CaO)$ 和 pH 平均值分别为 0.38% 和 5.48.有研究

表明, Ca^{2+} 是岩溶区土壤 pH 的重要控制因素之一,土壤 Ca^{2+} 含量与 pH 具有显著的正相关关系^[33~35],这也是大部分岩溶区土壤 pH 较高的原因.随着 Ca^{2+} 等盐基离子的持续淋失,土壤 pH 会逐渐降低,当 $\omega(CaO)$ 低于 1% 时,土壤会迅速酸化^[12],冲积母质土

壤一般农业活动频繁,对土壤的扰动进一步加速了土壤的酸化^[36].此外,有研究表明土壤 pH 是影响 Cd 迁移性和生物有效性的主要影响因素^[37,38],低 pH 条件下,土壤有效态镉含量迅速增加,Cd 生物有效性增强,造成一定的生态风险^[39].

表 1 结果显示,岩溶区残坡积母质土壤中 Mn 含量平均值也明显高于冲积母质土壤,前者约为后者的 2 倍.碳酸盐岩是典型的可溶性岩类,之前的研究表明,碳酸盐岩风化成土作用主要分为两个阶段^[40].第一阶段是方解石和白云石等可溶性矿物的快速淋溶阶段,大量可溶性元素(如 Ca、Mg 和 Na)被溶解而流失,而溶解度较低的元素(如 Fe 和 Mn)则在残留的不可溶性矿物中积累^[41,42];第二阶段为石英、长石和黏土等不可溶性矿物的深度风化阶段,上一阶段富集的铁锰元素在特定的成土条件下,经过一系列的溶解-沉淀反应,与土体中其他物质聚集而形成铁锰结核^[43].由此可见,低迁移性的铁锰元素更倾向于在原地富集,进而造成残坡积母质土壤中 Mn 元素含量高于冲积母质土壤.此外,岩溶区普遍发育的次生铁锰矿物能够稳定吸附和固定 Cd 等重金属元素,这可能是岩溶区土壤 Cd 富集的主要因素^[44,45].研究区残坡积母质土壤中 $\omega(\text{TC})$ 为 2.14%,高于冲积母质土壤,主要原因为残坡积母质土壤植被状况相对良好,有机质输入较多,受人为扰动相对较少^[46].

2.2 表层土壤 Cd、根系土和玉米籽粒中 Cd 含量

如表 1 所示,研究区表层土壤 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 0.13 ~ 1.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 0.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为全国表层土壤的 3.1 倍^[29],为碳酸盐岩区的 1.5 倍,

说明研究区表层土壤 Cd 相对富集,但低于广西岩溶区^[13].本研究区的残坡积母质和冲积母质中 Cd 含量分异明显,前者 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 0.37 ~ 1.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 0.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而后者 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 0.13 ~ 1.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 0.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明残坡积母质具有更高的 Cd 含量.

在玉米成熟的 8 月采集根系土和玉米籽实样品,并根据不同的土壤母质类型将根系土和玉米籽实中 Cd 含量分为两组(表 2),统计结果显示不同母质根系土 Cd 含量平均值与玉米籽实 Cd 含量平均值完全相反,碳酸盐岩冲积母质区根系土 Cd 平均含量较低,但玉米籽实 $\omega(\text{Cd})$ 平均值(0.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)明显高于残坡积母质区(0.068 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),依据《食品安全国家标准》(GB 2762-2017)中谷豆类 Cd 的限量值为 0.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,冲积母质土壤 63% 的玉米籽实 Cd 含量超标,远超残坡积母质土壤.上述结果表明玉米籽实 Cd 含量与根系土 Cd 含量并无明显的正相关关系,冲积母质土壤 Cd 具有更强的活性,更容易被农作物吸收.有研究表明,碳酸盐岩在风化成土过程中会导致残坡积母质土壤 Cd 的富集^[30,47],但以上 Cd 主要是以稳定态的形式被黏土矿物吸附或固定在铁锰结核中^[45],随着残坡积母质土壤 Ca 元素的不断淋失,残坡积母质土壤 pH 逐步下降,造成了铁锰结核和黏土矿物中固定的 Cd 的释放,该部分活性 Cd 随地表径流从高处残坡积母质向低处冲积母质迁移,并在相对低洼的岩溶区汇水盆地冲积母质土壤中积累,造成了低洼处冲积母质土壤 Cd 总量不高,但活性很高的现象^[48].

表 2 碳酸盐岩残坡积母质与冲积母质根系土壤和玉米籽实 Cd 含量

Table 2 Content of Cd in rhizosphere soil and maize in eluvium and alluvial of carbonate rock

母质类型	根系土		玉米		富集系数	与食品安全国家标准对比		
	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数		总样品数	超标数	超标率/%
岩溶区残坡积土壤	0.61	0.21	0.068	0.75	0.11	20	7	35
岩溶区冲积土壤	0.42	0.4	0.14	0.67	0.42	24	15	63

2.3 玉米吸收 Cd 影响因素

如表 2 所示,冲积母质土壤玉米 Cd 富集系数为 0.42,残坡积母质土壤玉米 Cd 富集系数为 0.11,前者约为后者的 3.8 倍,表明岩溶区冲积母质土壤 Cd 的生物有效性更高.影响玉米吸收土壤 Cd 的因素十分复杂,但土壤理化指标对 Cd 的生物富集系数影响最为密切^[49].

对研究区 Cd 的生物富集系数与土壤理化指标进行相关分析(表 3),结果显示,玉米 Cd 的生物富集系数仅与 pH、CaO、Mn 和 TC 呈 $P < 0.01$ 水平显著负相关.有研究表明,pH 是影响 Cd 生物有效性

最主要的因素,直接影响 Cd 元素的赋存状态、形态转化和吸附与解吸附^[50].首先,土壤 pH 的降低,会促使 Cd 从铁锰氧化物中释放和溶解以次生矿物 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 CdCO_3 沉淀形式存在的 Cd 至土壤溶液中,增加活动态 Cd 含量^[48,51].其次,土壤 pH 的降低会导致土壤溶液中的 H^+ 和 Fe^{2+} 浓度显著升高,进而导致 Cd^{2+} 在土壤中交换位的竞争吸附,更多 H^+ 离子可以替代黏土表面的 Cd^{2+} 离子,导致了土壤溶液中 Cd^{2+} 含量增加,并且该过程随着 pH 的降低愈加明显,进而增加了 Cd 元素的有效性^[52,53].如图 2(b) 所示,当 pH 低于 6.5 时,玉米籽实 Cd 含量

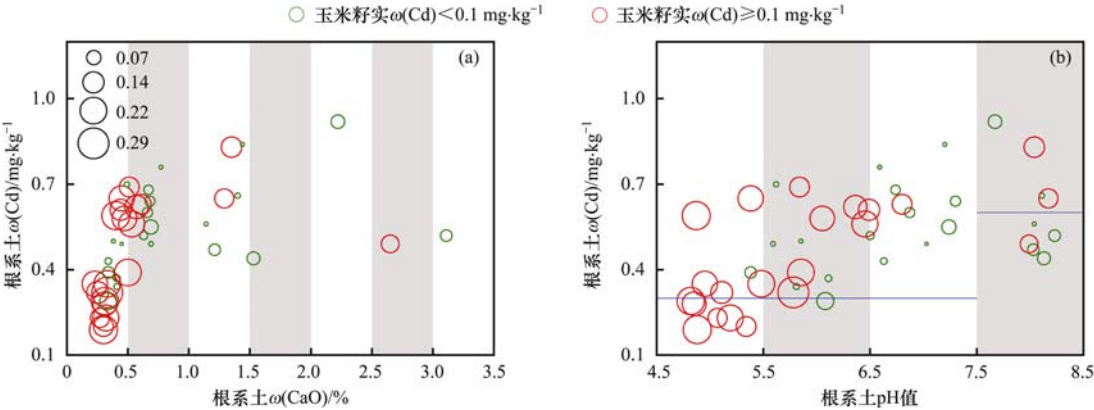
表 3 Cd 的生物富集系数与土壤理化指标相关系数¹⁾

Table 3 Correlation analysis of BCF _{Cd} with soil physicochemical properties										
	Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	TC	pH	BCF _{Cd}
Mn	1									
SiO ₂	-0.305 *	1								
Al ₂ O ₃	-0.052	-0.577 **	1							
TFe ₂ O ₃	0.592 **	-0.439 **	0.566 **	1						
MgO	0.001	-0.532 **	0.009	-0.349 *	1					
CaO	0.171	-0.753 **	0.033	-0.058	0.735 **	1				
Na ₂ O	0.015	0.092	-0.039	-0.165	0.161	0.104	1			
TC	0.273	-0.535 **	0.097	0.191	0.183	0.644 **	0.193	1		
pH	0.339 *	-0.725 **	0.185	0.062	0.734 **	0.771 **	0.039	0.441 **	1	
BCF _{Cd}	-0.484 **	0.343 *	-0.045	-0.070	-0.372 *	-0.385 **	-0.308 *	-0.384 **	-0.620 **	1

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

和超标率均显著上升,这与前人研究的结果一致^[54],因此在岩溶区进行土壤污染风险监测和评估时,应当重点关注土壤 pH 值小于 6.5 的地区.有研究表明,CaO 可以通过影响土壤 pH 来控制 Cd 的生物有效性^[33,55],其次由于 Ca^{2+} 和 Cd^{2+} 的离子半径

十分相近,容易发生类质同象,随着 CaO 含量的提高,更多的 Cd 以类质同象形式被固定,从而降低了 Cd 的生物有效性^[31].如图 2 (a) 所示,当土壤 $\omega(\text{CaO})$ 大于 0.6% 时,玉米籽实 Cd 超标率大幅下降.



蓝线表示土壤筛选值(GB 15618-2018),气泡大小表示玉米籽实中 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),灰色区域表示不同理化性质区间
图 2 研究区根系土理化性质、总 Cd 和玉米籽实 Cd 含量的关系

Fig. 2 Correlation diagram of rhizosphere soil physicochemical properties, soil total Cd, and Cd concentration in maize in the study area

本研究中玉米 Cd 的生物富集系数和 Mn 呈负相关,与之前的研究结果一致,Ji 等^[56]发现 Mn 的氧化物中 Cd 的浓度是表层土壤的 10 倍,且对 Cd 的二次富集和生物有效性钝化发挥了重要作用.首先,Mn 的氧化物具有较大的比表面积,往往呈现一种电荷不平衡状态,可通过物理吸附固定土壤中活性态 Cd^[57].其次,Mn 的氧化物含有大量的羟基,可通过键合作用“捕获”土壤溶液中活性态 Cd^[58],进而降低 Cd 的生物有效性.同时,玉米 Cd 还与 TC 呈显著负相关,王春香等^[59]发现土壤有机质可以通过吸附或形成难溶性的复合物来固定土壤中的重金属.

2.4 玉米籽实 Cd 富集系数预测模型的构建

如前文所述,选取 pH、Mn、CaO 和 TC 作为玉米籽实 Cd 富集系数预测模型的预测变量.利用研究区采集的 44 组玉米样品,随机选取 70% 的数据

进行建模,30% 的数据进行验证.分别使用相同的建模数据和验证数据构建随机森林模型和多元线性回归模型,玉米籽实 Cd 富集系数的多元回归模型为 $\lg\text{BCF}_{\text{Cd}} = -4.04 \lg\text{pH} - 0.39 \lg\text{Mn} + 0.09 \lg\text{CaO} - 0.07 \lg\text{TC} + 3.52$,分别计算随机森林模型和多元回归模型的评价指标并进行对比.如表 4 所示,随机森林模型中玉米 Cd 生物富集系数预测值与实际值 R^2 和 RMSE 分别为 0.73 和 0.3,而多元线性回归模型分别为 0.51 和 0.53,随机森林构建的预测模型具有更高的 R^2 和更低的 RMSE.由图 3 也可以看出,玉米籽实 Cd 的生物富集系数预测值与实际值更相近,拟合方程斜率更接近 1,特别是在玉米 Cd 生物富集系数较大时,随机森林预测模型预测效果较好.因此与多元回归模型相比,随机森林模型能更好地揭示玉米籽粒 Cd 富集系数与土壤理化性质之间的

表 4 多元线性回归及随机森林模型评价指标

Table 4 Evaluation indicators of MLR and RF

预测模型	拟合方程	R^2	RMSE
多元线性回归	$\lg BCF_{Cd} = -4.04 \lg pH - 0.39 \lg Mn + 0.09 \lg CaO - 0.07 \lg TC + 3.52$	0.51	0.53
随机森林	—	0.73	0.3

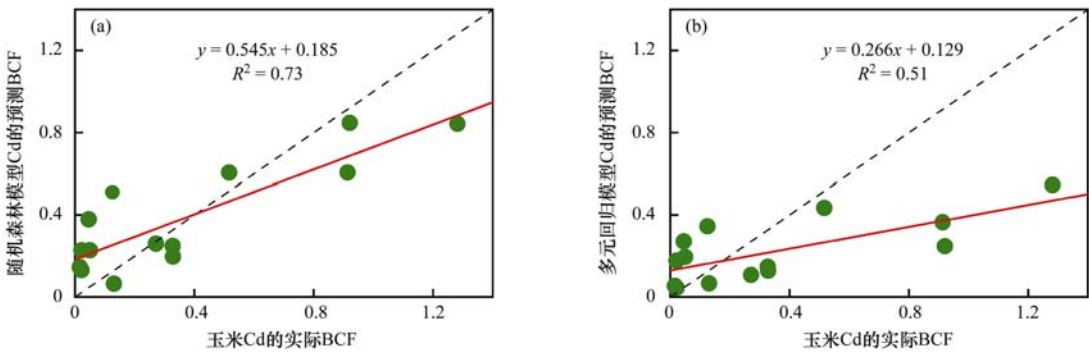


图 3 BCF_{Cd} 实测值与随机森林和多元回归模型预测值对比

Fig. 3 Comparison of BCF_{Cd} measured values with MLR and RF model predicted values

非线性关系.

2.5 地块尺度的土地安全利用区划

为了更准确和更安全地分类农业用地,本研究根据表层土壤中的 Cd 含量和随机森林模型预测的玉米籽实中的 Cd 含量提出了地块尺度耕地安全利用建议. 首先利用采集的表层土 Cd、pH、Mn、CaO 和 TC 数据,运用幂指数加权法进行地块插值,保证每一个地块内至少有一个实测点或插值点,再将每个地块的土壤 pH、Mn、CaO 和 TC 的值代入所建立的随机森林预测模型,得出研究区玉米籽实 Cd 富集系数,再结合地块中土壤 Cd 含量,计算出研究区玉米籽实 Cd 含量. 最后综合每个地块土壤 Cd 和玉米籽实 Cd 含量将地块划分为优先保护区(玉米籽实 Cd 不超标)、安全利用区 A(土壤 Cd 不超标、玉米籽实 Cd 超标)、安全利用区 B(土壤 Cd 超标、玉米籽实 Cd 超标)和严格管控区(土壤 Cd 超过管制值).

研究区地块尺度耕地安全利用区划结果如图 4 所示,其中优先保护区 5.42 km²,占比 56%,主要与残坡积母质土壤分布一致;安全利用区 A 面积为 1.16 km²,占比 12%;安全利用区 B 面积为 3.06 km²,占比 32%,研究区没有严格管控区. 对于优先保护区应加强土壤质量和农作物重金属监测,防止新的外源污染输入,对于安全利用区 A 应防止土壤酸化,建议进行土壤 pH 调控,降低土壤活性 Cd 占比,减少土壤 Cd 向农作物籽实转移^[60]. 对于安全利用区 B,建议通过施用土壤 Cd 钝化剂或喷洒 Cd 的叶面阻隔剂来降低农作物籽实 Cd 含量,另外也可以在该区域推广农作物 Cd 低积累品种,降低 Cd 的生态风险^[61].

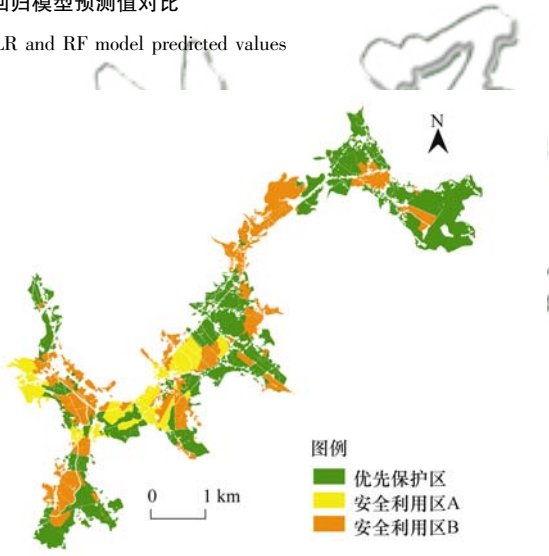


图 4 地块尺度耕地安全利用区划

Fig. 4 Zoning map of the safe use of cultivated land at block scale

3 结论

(1) 研究区土壤 $\omega(Cd)$ 平均值为 0.47 mg·kg⁻¹,为全国表层土壤的 3.1 倍,为碳酸盐岩区的 1.5 倍,说明研究区表层土壤 Cd 相对富集. 研究区残坡积母质和冲积母质土壤 $\omega(Cd)$ 平均值分别为 0.64 mg·kg⁻¹和 0.37 mg·kg⁻¹,玉米籽实 $\omega(Cd)$ 平均值分别为 0.068 mg·kg⁻¹和 0.14 mg·kg⁻¹,玉米籽实 Cd 超标率分别为 35% 和 63%,表明冲积母质土壤 Cd 虽然总量较低,但生物有效性高,玉米籽实 Cd 超标率高.

(2) 相关分析表明,玉米 Cd 富集系数与对应的土壤 CaO、pH、Mn 和 TC 呈极显著负相关关系,相关系数分别 - 0.385、- 0.620、- 0.484 和 -0.384.

(3) 与多元线性回归预测模型相比,采用随机

森林模型预测玉米 Cd 富集系数的准确度和精密度更高。

(4) 为了更准确、更安全地分类农业用地, 本文提出了一种基于土壤 Cd 和预测农作物籽实 Cd 含量的地块尺度耕地安全利用新方案, 结果显示, 研究区优先保护区、安全利用区 A 和安全利用区 B 面积分别占比 56%、12% 和 32%, 没有严格管控区。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Chai Y, Guo J, Chai S L, *et al.* Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng-Songyuan area, Jilin Province, Northeast China [J]. Chemosphere, 2015, **134**: 67-75.
- [3] Herath H M A S, Kawakami T, Nagasawa S, *et al.* Arsenic, cadmium, lead, and chromium in well water, rice, and human urine in Sri Lanka in relation to chronic kidney disease of unknown etiology [J]. Journal of Water & Health, 2018, **16**(2): 212-222.
- [4] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2031-2039.
Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- [5] Vromman D, Martínez J P, Kumar M, *et al.* Comparative effects of arsenite (As(III)) and arsenate (As(V)) on whole plants and cell lines of the arsenic-resistant halophyte plant species *Atriplex atacamensis* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(34): 34473-34486.
- [6] 王锐, 张风雷, 徐姝姝, 等. 土壤重金属污染风险筛选值划分方法: 以 Cd 为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5082-5089.
Wang R, Zhang F L, Xu S S, *et al.* Method of dividing the value of soil heavy metal pollution risk screening: using Cd as an example [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5082-5089.
- [7] 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.
- [8] 刘旭, 顾秋蓓, 杨琼, 等. 广西象州与横县碳酸盐岩分布区土壤中 Cd 形态分布特征及影响因素[J]. 现代地质, 2017, **31**(2): 374-385.
Liu X, Gu Q B, Yang Q, *et al.* Distribution and influencing factors of cadmium geochemical fractions of soils at carbonate covering area in Hengxian and Xiangzhou of Guangxi [J]. Geoscience, 2017, **31**(2): 374-385.
- [9] 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(自然科学版), 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.
- [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] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(1): 18-26.
Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, *et al.* Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(1): 18-26.
- [12] Li C, Yang Z F, Yu T, *et al.* Study on safe usage of agricultural land in karst and non-karst areas based on soil Cd and prediction of Cd in rice: a case study of Heng County, Guangxi [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111505.
- [13] Wen Y B, Li W, Yang Z F, *et al.* Evaluation of various approaches to predict cadmium bioavailability to rice grown in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China [J]. Environmental Pollution, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113645.
- [14] Liu X, Yu T, Yang Z F, *et al.* Transfer mechanism and bioaccumulation risk of potentially toxic elements in soil-rice systems comparing different soil parent materials [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **216**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112214.
- [15] Gu Q B, Yang Z F, Yu T, *et al.* Application of ecogeochemical prediction model to safely exploit seleniferous soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **177**: 133-139.
- [16] Gu Q B, Yu T, Yang Z F, *et al.* Prediction and risk assessment of five heavy metals in maize and peanut: a case study of Guangxi, China [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, **70**, doi: 10.1016/j.etap.2019.103199.
- [17] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [18] Dai Y C, Nasir M, Zhang Y L, *et al.* Comparison of DGT with traditional methods for assessing cadmium bioavailability to *Brassica chinensis* in different soils [J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-13820-3.
- [19] DZ/T 0279.2-2016, 区域地球化学样品分析方法第 2 部分: 氧化钙等 27 个成分量测定电感耦合等离子体原子发射光谱法[S].
- [20] 张明杰, 戴雪峰, 陆丁荣, 等. 高频燃烧-红外碳硫仪用于农用地土壤质量调查样品中碳硫的快速测定[J]. 岩矿测试, 2010, **29**(2): 139-142.
Zhang M J, Dai X F, Lu D R, *et al.* Rapid determination of carbon and sulfur in farmland soil samples by high frequency-infrared carbon-sulfur analyzer [J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, **29**(2): 139-142.
- [21] Yang Y Y, Li C, Yang Z F, *et al.* Application of cadmium prediction models for rice and maize in the safe utilization of farmland associated with tin mining in Hezhou, Guangxi, China [J]. Environmental Pollution, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117202.
- [22] Kumar V, Chopra A K, Srivastava S, *et al.* Accumulation of heavy metals in vegetables grown in wastewater irrigated soil in Haridwar (Uttarakhand), India [J]. Agricultural Science

- Research Journal, 2015, **5**(11): 146-152.
- [23] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 941-951.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Characteristics of cadmium enrichment and pollution evaluation of a soil-crop system in a typical Karst area[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 941-951.
- [24] 张加文, 田彪, 罗晶晶, 等. 土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3811-3824.
- Zhang J W, Tian B, Luo J J, *et al.* Effect factors and model prediction of soil heavy metal bioaccessibility[J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3811-3824.
- [25] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, **45**(1): 5-32.
- [26] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [27] 黄钦, 杨波, 徐新创, 等. 基于多源空间数据和随机森林模型的长沙市茶颜悦色门店选址与预测研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, **24**(4): 723-737.
- Huang Q, Yang B, Xu X C, *et al.* Location selection and prediction of sexytea store in Changsha city based on multi-source spatial data and random forest model[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, **24**(4): 723-737.
- [28] McBride M B. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH[J]. Soil Science, 2002, **167**(1): 62-67.
- [29] 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 等. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [30] Yang Q, Yang Z F, Filippelli G M, *et al.* Distribution and secondary enrichment of heavy metal elements in karstic soils with high geochemical background in Guangxi, China[J]. Chemical Geology, 2021, **567**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120081.
- [31] 邵玉祥, 杨忠芳, 王磊, 等. 广西南流江流域土壤-水稻系统 Cd 生物有效性及影响因素[J]. 现代地质, 2021, **35**(3): 625-636.
- Shao Y X, Yang Z F, Wang L, *et al.* Cadmium bioavailability and influencing factors of soil-rice system in Nanliujiang catchment of Guangxi[J]. Geoscience, 2021, **35**(3): 625-636.
- [32] 梁裕平, 陈彪, 郑国东, 等. 广西贵港市覃塘区碳酸盐岩区表层土壤 Cd 元素迁移转化与影响因素[J]. 矿产与地质, 2018, **32**(4): 767-773.
- Liang Y P, Chen B, Zheng G D, *et al.* Migration and transformation of Cd elements in surface soil of carbonate rock area in Qiangtang District, Guigang City, Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2018, **32**(4): 767-773.
- [33] Huang G X, Ding C F, Zhou Z G, *et al.* A tillering application of zinc fertilizer based on basal stabilization reduces Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **167**: 338-344.
- [34] Mahar A, Wang P, Ali A, *et al.* Impact of CaO, fly ash, sulfur and Na₂S on the (im) mobilization and phytoavailability of Cd, Cu and Pb in contaminated soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **134**: 116-123.
- [35] 赵凯丽, 王伯仁, 徐明岗, 等. 我国南方不同母质土壤 pH 剖面特征及酸化因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(8): 1308-1315.
- Zhao K L, Wang B R, Xu M G, *et al.* Changes in pH with depths of soils derived from different parent materials and analysis of acidification in Southern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(8): 1308-1315.
- [36] 孔德莉, 张海涛, 何迅, 等. 基于 PLSPM 模型的鄂西南部分区域耕地土壤 pH 影响因素研究[J]. 土壤, 2021, **53**(4): 809-816.
- Kong D L, Zhang H T, He X, *et al.* Influencing factors of farmland soil pH in southwest Hubei based on PLSPM model[J]. Soils, 2021, **53**(4): 809-816.
- [37] Wang J, Wang P M, Gu Y, *et al.* Iron-manganese (oxyhydro) oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(5): 2500-2508.
- [38] Yu H Y, Liu C P, Zhu J S, *et al.* Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: the effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. Environmental Pollution, 2016, **209**: 38-45.
- [39] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, **52**(3): 439-444.
- Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Advances in effects of soil pH on cadmium form[J]. Soils, 2020, **52**(3): 439-444.
- [40] 王秋艳, 文雪峰, 魏晓, 等. 碳酸盐岩风化和成土过程的重金属迁移富集机理初探及环境风险评价[J]. 地球与环境, 2022, **50**(1): 119-130.
- Wang Q Y, Wen X F, Wei X, *et al.* Heavy metal migration and enrichment mechanism and the environmental risks during the weathering and soil formation of carbonate rocks[J]. Earth and Environment, 2022, **50**(1): 119-130.
- [41] 季文兵, 杨忠芳, 尹爱经, 等. 地质高背景地区土壤中铁锰结核形成机理——以广西桂中地区为例[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(8): 2302-2314.
- Ji W B, Yang Z F, Yin A J, *et al.* Formation mechanisms of iron-manganese nodules in soils from high geological background area of Central Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(8): 2302-2314.
- [42] Liu W J, Liu C Q, Zhao Z Q, *et al.* Elemental and strontium isotopic geochemistry of the soil profiles developed on limestone and sandstone in karstic terrain on Yunnan-Guizhou Plateau, China: implications for chemical weathering and parent materials[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, **67-68**: 138-152.
- [43] 王祎, 黄来明. 土壤中铁锰结核微结构与组分研究进展[J]. 土壤学报, 2023, **60**(2): 317-331.
- Wang Y, Huang L M. Research progress on the microstructure and constituents of Fe-Mn nodules in soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, **60**(2): 317-331.
- [44] 范春辉, 郑金焕, 王宇飞, 等. 基于光谱识别技术的土壤铁锰结核对镉的吸附行为研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, **42**(2): 616-621.
- Fan C H, Zheng J H, Wang Y F, *et al.* Adsorption of cadmium on Fe-Mn nodules derived from soil by spectral methods[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2022, **42**(2): 616-621.
- [45] 杨琼, 杨忠芳, 季峻峰, 等. 广西贵港岩溶地质高背景区富含铁锰结核土壤的矿物学与重金属地球化学特征[J]. 现代地质, 2021, **35**(5): 1450-1458.
- Yang Q, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Characteristics of mineralogy and heavy metal geochemistry in ferromanganese nodule rich soils with high geochemical background from Guigang, Guangxi[J]. Geoscience, 2021, **35**(5): 1450-1458.
- [46] 李会. 喀斯特小流域土壤有机碳空间分布及影响因素研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- Li H. Study on the spatial distribution of Soil organic carbon and it's influencing factors in small watershed of karst landform[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.

- [47] 冯志刚, 刘威, 张兰英, 等. 贫 Cd 碳酸盐岩发育土壤 Cd 的富集与超常富集现象——以贵州岩溶区为例[J]. 地质通报, 2022, **41**(4): 533-544.
Feng Z G, Liu W, Zhang L Y, *et al.* Enrichment and supernormal enrichment phenomenon of Cd in soils developed on Cd-poor carbonate rocks; a case study of Karst areas in Guizhou, China[J]. Geological Bulletin of China, 2022, **41**(4): 533-544.
- [48] Xia X Q, Ji J F, Yang Z F, *et al.* Cadmium risk in the soil-plant system caused by weathering of carbonate bedrock [J]. Chemosphere, 2020, **254**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126799.
- [49] 马旭东, 余涛, 杨忠芳, 等. 四川省邻水县土壤镉地球化学特征及玉米水稻籽实镉含量预测[J]. 中国地质, 2022, **49**(1): 324-335.
Ma X D, Yu T, Yang Z F, *et al.* Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of zinc content in maize and rice grains in Linshui county, Sichuan province [J]. Geology in China, 2022, **49**(1): 324-335.
- [50] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1864-1870.
Wang R, Hu X L, Zhang Y W, *et al.* Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- [51] Khaokaew S, Chaney R L, Landrot G, *et al.* Speciation and release kinetics of cadmium in an alkaline paddy soil under various flooding periods and draining conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(10): 4249-4255.
- [52] 段燕, 汪丙国, 王慧敏, 等. 冲积和湖积成因土壤 Cd 的吸附特征: 以安徽省当涂县为例[J]. 地球科学, 2021, **46**(4): 1490-1504.
Duan Y, Wang B G, Wang H M, *et al.* Adsorption characteristics of Cd in alluvial and lacustrine soils: a case study in Dangtu county, Anhui province [J]. Earth Science, 2021, **46**(4): 1490-1504.
- [53] Inyang H I, Onwawoma A, Bae S. The Elovich equation as a predictor of lead and cadmium sorption rates on contaminant barrier minerals [J]. Soil and Tillage Research, 2016, **155**: 124-132.
- [54] 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.
- [55] Li X Y, Long J, Peng P Q, *et al.* Evaluation of calcium oxide of quicklime and Si-Ca-Mg fertilizer for remediation of Cd uptake in rice plants and Cd mobilization in two typical Cd-polluted paddy soils [J]. International Journal of Environmental Research, 2018, **12**(6): 877-885.
- [56] Ji W B, Yang Z F, Yu T, *et al.* Potential ecological risk assessment of heavy metals in the Fe-Mn nodules in the Karst area of Guangxi, southwest china [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, **106**(1): 51-56.
- [57] 季文兵, 杨忠芳, 尹爱经, 等. 地质高背景地区土壤中不同粒径铁锰结核地球化学特征[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(8): 2289-2301.
Ji W B, Yang Z F, Yin A J, *et al.* Geochemical characteristics of Fe-Mn nodules with different sizes in soils of high geological background areas [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(8): 2289-2301.
- [58] Gasparatos D. Sequestration of heavy metals from soil with Fe-Mn concretions and nodules [J]. Environmental Chemistry Letters, 2013, **11**(1): 1-9.
- [59] 王春香, 徐宸, 许安定, 等. 植烟土壤重金属的有效性及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(8): 1532-1537.
Wang C X, Xu C, Xu A D, *et al.* Availability of heavy metals and its influencing factors in tobacco grown soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(8): 1532-1537.
- [60] 王锐, 余京, 李瑜, 等. 地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4190-4198.
Wang R, Yu J, Li Y, *et al.* Zoning and safe utilization method of heavy metal contaminated cultivated land at block scale [J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4190-4198.
- [61] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4647-4653.
Chen X H, Shen G X, Bai Y J, *et al.* Accumulation of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4647-4653.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)