

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

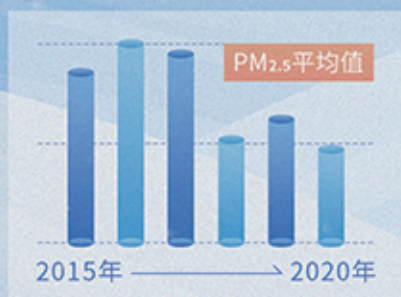
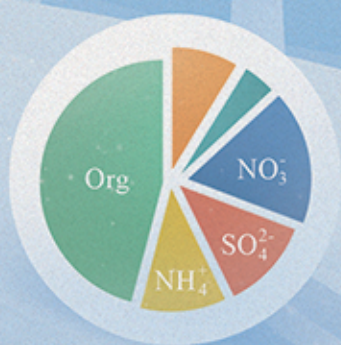
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法

王锐^{1,2}, 余京¹, 李瑜^{1,2*}, 周皎^{1,2}, 贾中民¹, 余飞^{1,2}, 张云逸^{1,2}, 蒋玉莲^{1,2}

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038; 2. 重庆市土地质量地质调查重点实验室, 重庆 400038)

摘要: 耕地安全利用是保证粮食安全, 实现生态文明建设的重要举措之一。为解决污染风险耕地安全利用与修复治理过程中技术措施选择盲目的问题, 在重庆市黔江区鹅池镇采集表层土壤样品 244 件和水稻-根系土样品 100 套, 在分析土壤和水稻中 Cd、Hg、Pb、As 和 Cr 这 5 种重金属含量及土壤中氧化物、有机质和 pH 等指标的基础上, 利用多元回归和地统计分析法建立预测模型, 并为地块赋值, 结合地块中土壤和水稻中重金属全量、土壤重金属有效态及土壤 pH, 给出相应的地块尺度耕地安全利用建议。结果表明, 研究区土壤以酸性和强酸性为主, Cd 超过土壤污染风险筛选值和管制值的比例分别为 33.61% 和 2.05%, Cd 有效态占比为 60%, 水稻 Cd 超标率为 28%, 研究区存在明显 Cd 的生态风险。土壤 Cd 有效态主要受到土壤 Cd 全量和 pH 的影响, 水稻中 Cd 的富集主要受到土壤有机质、Mn 和 CaO 含量的影响。区划结果显示, 研究区土壤以优先保护类为主, 占比为 59.30%; 安全利用类占比为 40.44%, 其中安全利用 (IAa)、安全利用 (IAb)、安全利用 (IBa)、安全利用 (IIAa)、安全利用 (IIAb)、安全利用 (IIBa) 占比分别为 19.49%、8.01%、1.43%、7.04%、1.41% 和 3.06%; 严格管控类占比为 0.26%。该方法将土壤及农产品安全风险相结合, 并针对性给出安全利用建议, 为因地制宜地开展受污染耕地安全利用工作提供了方法参考。

关键词: 土壤-水稻; 重金属污染; 耕地安全利用; 预测模型; 区划方法

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4190-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202111163

Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale

WANG Rui^{1,2}, YU Jing¹, LI Yu^{1,2*}, ZHOU Jiao^{1,2}, JIA Zhong-min¹, YU Fei^{1,2}, ZHANG Yun-yi^{1,2}, JIANG Yu-lian^{1,2}

(1. Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China)

Abstract: The safe use of arable land is one of the important measures to ensure food security and to realize the construction of ecological civilization. In order to solve the problem of blindly selecting technical measures in the process of safe use and restoration of pollution-risk cultivated land, 244 surface soil samples and 100 sets of rice-root soil samples were collected in Echi Town, Qianjiang District, Chongqing. Based on the contents of five heavy metals of Cd, Hg, Pb, As, and Cr, as well as soil oxides, organic matter, and pH and other indicators, a prediction model was established using multiple regression and geostatistical analyses, and the plots were assigned values, combined with the soil and soil in the plots. The total amount of heavy metals in the rice, the available content of heavy metals in the soil, and the pH of the soil guided suggestions for the safe use of cultivated land at the corresponding plot scale. The results showed that the soil in the study area was mainly and strongly acidic. The percentages of Cd exceeding the soil pollution risk screening value and control value were 33.61% and 2.05%, respectively. The effective content of Cd accounted for 60%, and the Cd exceeding rate of rice was 28%. There was an obvious ecological risk of Cd in the study area. The available Cd content of the soil was mainly affected by the total amount of soil Cd and pH. The enrichment of Cd in rice was mainly affected by the content of soil organic matter, Mn, and CaO. The zoning results showed that the priority protection category of the soil in the study area accounted for 59.30%; the safe use category accounted for 40.44%, of which safe use (IAa), safe use (IAb), safe use (IBa), safe use (IIAa), safe use (IIAb), and safe use (IIBa) accounted for 19.49%, 8.01%, 1.43%, 7.04%, 1.41%, and 3.06%, respectively; and strict control accounted for 0.26%. This method combined the safety risks of soil and agricultural products and aided formation of specific recommendations for safe use, which provided a method of reference for the safe use of contaminated farmland in accordance with local conditions.

Key words: soil-rice; heavy metal pollution; safe use of cultivated land; prediction model; zoning method

高速发展的社会经济,不断加快的城市化进程,使得工农业活动对其所在生态系统的影响不断加剧,其中重金属污染成为影响人类健康和经济发展的主要限制因素^[1,2]。重金属元素不仅会通过影响植物体内正常的代谢功能,限制植物正常发育和生长,也会通过土壤-农作物的系统进入食物链中不断积累,进而影响人类健康^[3~5]。从文献[6,7]可知, Cd 是影响我国西南和中南地区耕地环境质量的主要因子之一。Cd 在土壤-植物系统中迁移能力较强,易对植物产生毒害,影响农产品质量和安全,进而可能对人体健康产生影响,因此 Cd 是影响农产品安

全及人居环境质量的主要重金属元素^[8]。一方面, Cd 进入人体后会与含羟基和氨基的蛋白质分子结合,影响人体内多种酶的系统功能,进而影响肝脏、肾脏的正常功能;另一方面, Cd 会置换骨骼中的钙,而镉导致的肾功能不全又会影影响维生素 D₃ 的活性,使得骨骼的生长受到影响,进而引发“痛痛

收稿日期: 2021-11-16; 修订日期: 2021-12-29

基金项目: 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队 2021 年自立科研项目 (CDNKY-2021005)

作者简介: 王锐(1994~),男,硕士,主要研究方向为生态地球化学及受污染耕地安全利用, E-mail: 1372661182@qq.com

* 通信作者, E-mail: 395904623@qq.com

病”^[9~11]. 因此, 实现 Cd 污染耕地安全利用, 是提高耕地利用效率、保障粮食安全和提高人居环境的重要举措之一.

土壤中 Cd 等重金属一般受到人为活动和自然因素两方面的影响, 而区域性耕地 Cd 含量异常被认为主要与成土母质有关^[12,13], 修复该类污染土壤在技术上存在较大困难, 可通过农艺调控和土壤调理等措施保障农产品的安全, 实现受污染耕地的安全利用^[14]. 截至 2019 年底, 我国多个省市均完成了耕地土壤环境质量类别划分工作, 将耕地土壤划分为优先保护、安全利用和严格管控, 并针对受污染耕地进行分类管理, 是保证国家粮食安全的重要举措. 但该工作开展过程中, 土壤和农作物样品数量远远低于地块数量, 使得对耕地类别的划分只能停留在区域尺度, 而不能达到地块尺度, 另一方面, 目前开展的相关工作, 安全利用措施的实施主要参照土壤中重金属的全量, 存在明显的盲目性, 进而影响最终效果, 造成投入成本的浪费. 本文通过元素空间插值的方法, 利用有限的土壤样品, 为所有耕地地块赋值, 并建立水稻 Cd 含量及土壤 Cd 有效态预测模型, 根据土壤 Cd 全量、水稻 Cd 含量、土壤 Cd 有效态和土壤 pH, 将耕地地块 (图斑) 划分成不同环境质量类别, 并针对性给出安全利用建议, 以期实现针对耕地地块“一张图管理, 一张图治理”的目标.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鹅池镇位于重庆市黔江区西南, 东临水市乡、两河镇, 南连酉阳县浪坪乡、苍岭镇, 西接彭水县梅子垭乡, 北接石家镇. 面积 73.2 km², 地势北高南低, 山岭纵横, 溪沟交错, 间有小块丘陵. 鹅池镇是黔江区重要的农副土特产品集散地之一, 主要种植农作物为水稻和烤烟等.

1.2 样品采集与分析

采用网格化布点的方式进行表层土壤样点的布设, 样品密度为 4~6 点·km⁻², 采样深度为 0~20 cm, 共采集 244 件表层土壤样品. 根据研究区水稻种植情况, 共采集 100 件水稻籽实样品及对应的根系土样品. 样点分布情况见图 1.

土壤样品在自然条件下风干, 干燥过程中及时揉搓或用木棒敲打防止结块, 干燥后用 20 目尼龙筛过筛, 样品过筛重不低于 500 g, 每件样品重新过筛后剩余部分不超过 1 g. 每加工完一个样品均对加工工具进行全面清扫, 防止发生人为污染. 样品初步加工后装于干净无污染的塑料瓶中, 送至实验室进一步加工并分析.

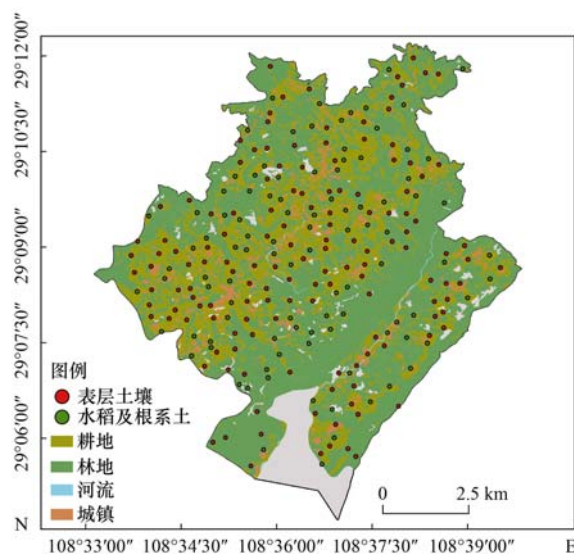


图 1 土地利用类型与土壤和作物采样点分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of land use types and the distribution of soil and crop sampling sites

根据《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T 0279-2016)^[15]要求, 土壤 pH 采用 1:2.5 (质量比) 的土壤-水悬浮液, 用 pH 计直接测定; 土壤 Cd 和 Pb 含量测定时, 用 HNO₃、HF 和 HClO₄ 分解样品, 用稀 HNO₃ 溶解并定容, 最后用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行检测; 土壤 Cr 含量测定时, 用 HCl、HF、HNO₃ 和 HClO₄ 溶样, 用 HCl 提取, 并用电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-AES) 进行检测; 土壤 As 含量测定时, 用王水溶解样品, 盐酸提取, 并用原子荧光光谱法 (AFS) 进行含量测定; 土壤 Hg 含量测定时, 用王水溶解样品, 并用原子荧光光谱法 (AFS) 进行含量测定. 采用改进的 Tessier 序列提取法对重金属有效态进行检测^[16], 包括离子交换态、水溶态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、强有机结合态、残渣态和铁锰氧化物结合^[17]. 土壤中 SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、Mn、MgO、CaO 和 K₂O 的含量采用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测定. 土壤样品分析的准确性主要由土壤样品标准物质控制 (GSS-7、GSS-9、GSS-12、GSS-17、GSS-21、GSS-25、GSS-26 和 GSS-27). 水稻样品在 HNO₃ 和 H₂O₂ 中分解, 用电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-MS) 测定 Cd、Hg、Pb、As 和 Cr 含量, 样品测试方法符合《生态地球化学评价样品分析技术要求 (试行)》(DD 2005-03)^[18]的要求.

1.3 技术路线

地块尺度耕地安全利用方法所需资料包括表层土壤样品或面积性土壤样品、根系土样品和农作物样品的点位信息和测试数据, 以及工作区土地利用现状图 (图斑). 主要做法如下 (图 2).

(1)基于多元回归的方法,利用农作物及根系土数据,建立农作物吸收土壤重金属的预测模型[式(1)],其中BAF为生物富集系数,代表农作物与根系土中某重金属含量的比值; a 为方程的常数项; b 、 c 、 d 和 e 为系数; B 、 C 和 D 为根系土中其余指标的含量; pH 为根系土的 pH .

$$\lg(\text{BAF}) = a + b\lg B + c\lg C + d\lg D + epH \quad (1)$$

(2)建立元素有效态(水溶态+离子交换态+碳酸盐态)拟合方程[式(2)],表示土壤重金属有效态与土壤其余组分的相关关系. M_m 为水溶态+离子交换态+碳酸盐态重金属含量; pH 为土壤的 pH 值; M 为土壤重金属元素含量; H 为根系土中其余指标的含量; f 为方程的常数项, g 、 h 和 i 为系数.

$$\lg(M_m) = f + g\lg M + h\lg H + ipH \quad (2)$$

(3)利用面积性土壤数据和地统计法,为每一个图斑赋上土壤各指标的含量.根据赋值结果,利用回归方程计算每个地块内农作物重金属含量及土壤重金属有效态.

至此,每个地块内均拥有了土壤重金属全量、农作物重金属含量、土壤 pH 和土壤重金属有效态,其中土壤和农作物含量是区划的主要因子,而土壤 pH 和有效态是安全利用措施选用的参考因素,划分方法如下.

根据每一个图斑中土壤重金属的全量,将图斑划分为优先保护、安全利用和严格管控这3个类别,再将安全利用类耕地类别划分为Ⅰ类和Ⅱ类(Ⅰ为水稻重金属不超标,Ⅱ为水稻重金属超标).在进行分类管理时,参考图斑中重金属有效态占重金属全量的比例和土壤 pH 进行.整个过程首先进行重金属单因子划分,再根据“最差因子法”,确定综合类别.

1.4 数据处理

数据整理利用Excel 2010完成,农作物元素吸收模型及土壤元素有效态预测模型利用SPSS 20.0完成,图斑插值利用ArcGIS 10.0完成,图件绘制利用Excel 2010和ArcGIS 10.0完成.

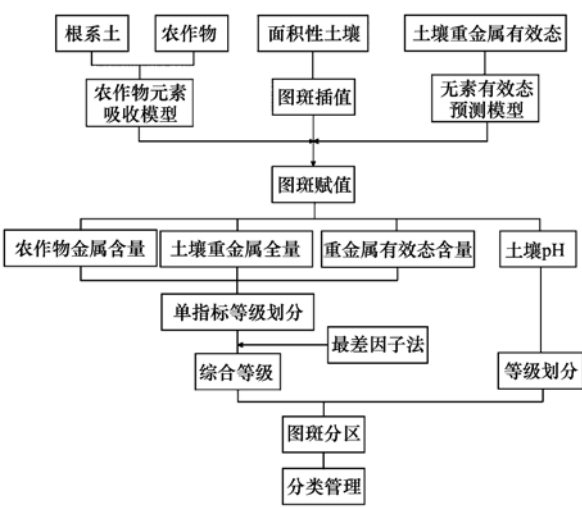


图2 技术路线
Fig. 2 Technical route

2 结果与讨论

2.1 土壤组分含量

统计研究区244件表层土壤中重金属元素的含量,结果见表1.土壤Cd、Hg、Pb、As和Cr的变异系数分别为1.04、0.20、0.21、0.59和0.16,土壤Cd和As表现出强变异特征^[19].与全国土壤元素背景值对比发现,研究区土壤重金属元素含量的平均值均高于全国背景值^[20],尤其是Cd,其平均含量是全国背景值的3.43倍.

依据文献[21],土壤中Cd超过风险筛选值和管制值的比例分别为33.61%和2.05%,说明土壤Cd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,应当加强土壤环境监测和农产品协同监测,采取安全利用措施,部分区域甚至应当采取严格管控措施.其余土壤重金属不存在超标现象.

表2为研究区表层土壤氧化物和有机质含量的统计结果.土壤 $\omega(\text{SiO}_2)$ 平均值为41.55%,与全国土壤背景值(66.7%)的比值为0.62,土壤 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $\omega(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 和 $\omega(\text{Mn})$ 平均值分别为18.10%、5.69%和931.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是全国土壤背景值(三者的背景值分别为11.9%、2.8%和569 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的1.52、2.03和1.64倍,出现了明显的

表1 研究区土壤中重金属的含量特征

Table 1 Content characteristics of heavy metals in the soil of the study area

元素	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 (无量纲)	轻度超标率 /%	重度超标率 /%	与全国背景值的 比值(无量纲)
Cd	0.06	3.80	0.47	1.04	33.61	2.05	3.43
Hg	0.001	0.15	0.031	0.20	0	0	1.19
Pb	15.60	95.80	37.98	0.21	0	0	1.73
As	2.13	32.22	10.55	0.59	0	0	1.17
Cr	38.60	133.10	80.01	0.16	0	0	1.51

“脱硅富铝铁”特征. 土壤 $\omega(\text{MgO})$ 、 $\omega(\text{CaO})$ 和 $\omega(\text{K}_2\text{O})$ 的平均值分别为 0.61%、1.43% 和 0.34%，是全国土壤背景值的 0.42、0.52 和 0.14 倍，说明研究区盐基离子亏损. 研究区广泛分布二叠系和三叠系灰岩，而灰岩风化成土过程分为 3 个阶段，第一个阶段为富钙阶段，表现为 Ca 、 Mg 、 Na 和 K 等盐基离子的流失和 CaCO_3 的原地沉淀；第二个阶段为脱硅阶段，表现为硅铝盐的分解和蒙脱石、高岭石等黏土矿物的富集；第三个阶段为铝铁富集阶段，表现为 H_2SiO_3 淋失和铁铝氧化物的形成^[22~26]. 因此，研究区土壤表现为盐基离子亏损而铁铝氧化物富集的特征.

不同的成土阶段对重金属的富集程度也存在明显差异. 在早期的富钙阶段，由于 Cd^{2+} 和 Ca^{2+}

半径相似，二者易发生类质同象作用，导致 Cd 进入碳酸岩矿物中，在原地不断积累；另一方面，碳酸岩风化早期，其上覆土壤主要是碳酸盐岩酸不溶物原地风化残积的产物，该物质对 Cd 有着明显的固定作用^[27,28]. 因此，在灰岩成土过程中， Cd 是最先富集的重金属元素，而随着土壤不断发育，黏土矿物和铁铝氧化物生成，重金属有较强的吸附固定作用，其余重金属元素陆续出现富集的现象. 因此，研究区土壤重金属均出现富集现象，而以 Cd 最为明显. 此外，研究区土壤有机质的含量明显高于全国背景值，说明该区域土壤有机质含量丰富，而土壤有机质对重金属具有较强的吸附作用^[29,30]，可能是造成研究区土壤重金属富集的另一原因.

表 2 土壤中其他组分含量特征
Table 2 Content characteristics of other components in soil

指标	最小值	最大值	平均值	变异系数 (无量纲)	与全国背景值的 比值(无量纲)
$\omega(\text{SiO}_2)/\%$	29.51	64.99	41.55	0.34	0.62
$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	13.11	28.15	18.10	0.14	1.52
$\omega(\text{TFe}_2\text{O}_3)/\%$	1.53	9.01	5.69	0.16	2.03
$\omega(\text{Mn})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	51.40	3 308.70	931.98	0.75	1.64
$\omega(\text{有机质})/\%$	0.32	4.28	1.40	0.35	2.34
$\omega(\text{MgO})/\%$	0.12	6.01	0.61	1.09	0.42
$\omega(\text{CaO})/\%$	0.66	7.57	1.43	0.45	0.52
$\omega(\text{K}_2\text{O})/\%$	0.11	0.86	0.34	0.40	0.14

参照文献[31]给出的土壤 pH 分级标准，将研究区土壤分类为强酸性($\text{pH} < 5.5$)、酸性($5.5 \leq \text{pH} < 6.5$)、中性($6.5 \leq \text{pH} < 7.5$)和碱性($7.5 \leq \text{pH} < 8.5$)，其所占比例分别为 16.39%、51.24%、15.98% 和 16.39% (图 3)，土壤以强酸性和酸性为主. 一般认为， CaO 是土壤 pH 的主要缓冲剂^[32]，而研究区土壤 CaO 表现出明显的亏损，可能是研究区土壤整体呈酸性的主要原因.

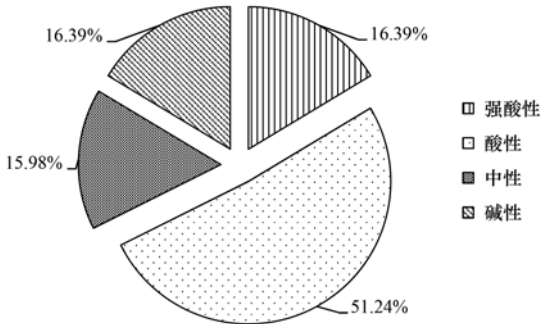


图 3 研究区不同土壤 pH 等级占比
Fig. 3 Proportion of different soil pH levels in the study area

2.2 土壤重金属有效态及农作物安全性评价

根据 Cappuyns 等^[33]提出的元素有效态的风险评价方法，将碳酸盐结合态、离子交换态和水溶态

称为元素有效态，当有效态占比低于 20% 时，风险较低，当有效态占比高于 20% 时，风险较高. 从图 4 可以看出，土壤 Cd 的碳酸盐结合态、离子交换态和水溶态占比分别为 42.22%、15.56% 和 2.22%，有效态占比 60%，说明研究区土壤中 Cd 的有效性较高，存在明显的生态风险. 土壤 Hg 、 Pb 、 As 和 Cr 主要以残渣态或铁锰氧化物结合态为主，有效态占比分别为 1.74%、9.62%、16.27% 和 0.82%，生物有效性较低.

研究区 100 件水稻样品重金属含量统计结果见

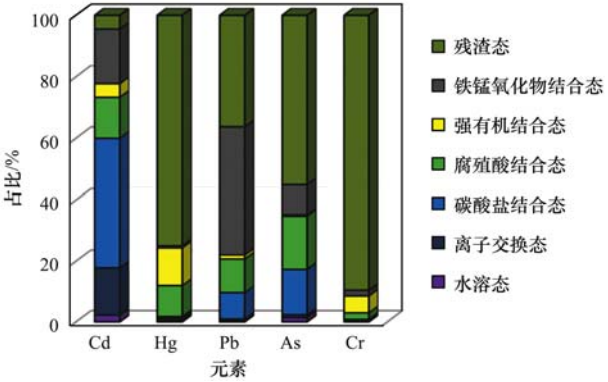


图 4 研究区土壤重金属的赋存状态
Fig. 4 Occurrence of heavy metals in the soil in the study area

表 3. 根据文献[34]给出的农产品安全限值,研究区水稻存在明显的 Cd 超标,超标率为 28%,其余重金属均未超标,该结果与土壤重金属有效态的评价结果相对应.

2.3 土壤 Cd 有效态及农作物 Cd 含量预测模型

研究区主要的污染风险元素为 Cd,因此,本文选择以 Cd 为研究对象,进行预测模型的建立,并基于该预测模型进行耕地安全利用区划.

表 4 为土壤 Cd 有效态、水稻 Cd 生物富集系数 (BAF) 与土壤各组分间的相关关系,可以看出, Cd

表 3 水稻中重金属的含量及超标率

Table 3 Heavy metal content and over-standard rate in rice

元素	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	超标率/%
Cd	0.004	1.58	0.27	28
Hg	0.001	0.015	0.003	0
Pb	0.03	0.12	0.05	0
As	0.03	0.22	0.10	0
Cr	0.08	0.22	0.11	0

的有效态与水稻对 Cd 的吸收受到多种因素的影响,说明 Cd 有效态 (Mm) 和 水稻 Cd 富集系数 (BAF) 具有较好的可预测性^[35].

表 4 土壤 Cd 有效态(Mm)、水稻 Cd 生物富集系数(BAF)与土壤组分的相关性¹⁾

Table 4 Correlation between soil Cd available state (Mm), rice Cd bioconcentration factor (BAF), and soil components

	lg(CaO)	lg(Cd)	lg(有机质)	lg(K ₂ O)	lg(MgO)	lg(Mn)	lg(SiO ₂)	lg(TFe ₂ O ₃)	pH
lg(Mm)	0.116	0.235 *	-0.275 *	-0.480 **	0.041	0.009	-0.293	0.264	-0.149 *
lg(BAF)	-0.642 **	—	-0.406 **	-0.238 *	-0.478 *	-0.512 **	0.460 *	0.105	-0.594 *

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著, * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著

利用 SPSS 20.0 软件,对数据进行逐步回归分析,剔除相关性较低的因子,最终形成预测土壤 Cd 有效态(Mm)与水稻 Cd 生物富集系数(BAF)的预测模型,具体形式如下:

$$\lg(\text{Mm}) = -0.295 + 0.746 \lg(\text{Cd}) - 0.081 \text{pH}$$
(3)

$$\lg(\text{BAF}) = 3.130 - 0.970 \lg(\text{CaO}) - 1.324 \lg(\text{Mn}) - 1.219 \lg(\text{有机质})$$
(4)

式中,Mm 为土壤中 Cd 的有效态,BAF 为水稻 Cd 的富集系数,有机质、Cd、CaO 和 Mn 为根系土中各指标的含 量,pH 为根系土的 pH 值. 式(3)和式(4)的决定系数 R 分别为 0.834 和 0.791. 对式(3)和式

(4)进行 F 检验, $F_{\text{式}(3)} = 32.13 > F_{0.01, 3, 96} = 4.04$, $F_{\text{式}(4)} = 10.072 > F_{0.05, 4, 29} = 2.70$. 说明式(3)在 0.01 水平上具有较高的显著性,式(4)在 0.05 水平上显著性较高^[35].

为了进一步验证预测模型的预测效果,利用土壤中的相关参数,得到 Cd 有效态和 水稻 Cd 含量的预测值,并与实测值进行对比,结果见图 5. 可以看出,预测模型所得的预测值与实测值之间存在很好的相关性,当趋势拟合函数的截距取 0 时,自变量的系数分别为 0.878 和 0.926,说明预测模型所得的预测值总体上低于实测值,出现了 对实测值的低估,但二者相差较小,预测模型的预测值较准确.

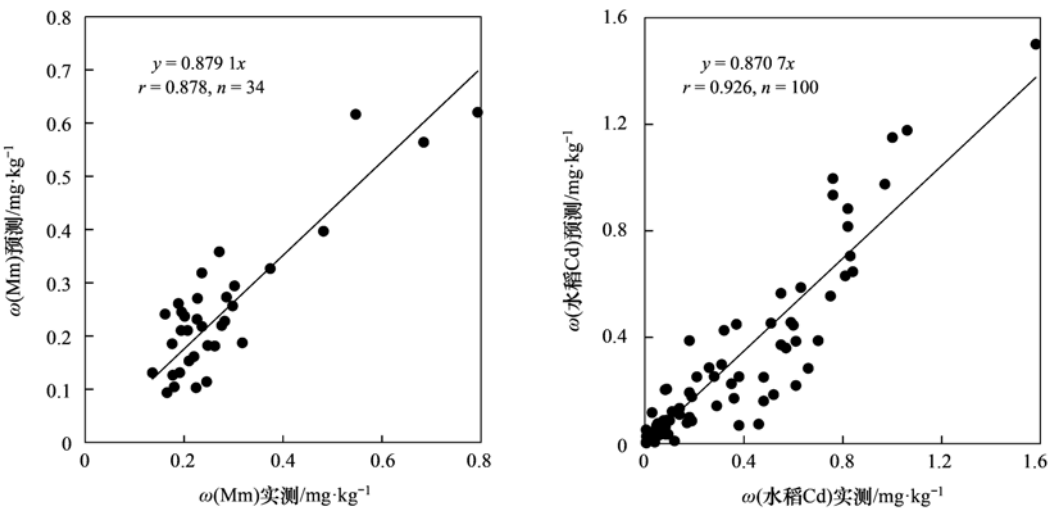


图 5 土壤 Cd 有效态 (Mm) 与水稻 Cd 含量的预测值和实测值

Fig. 5 Predicted and measured values of soil Cd available and rice Cd content

2.4 图斑赋值

本研究所采集的表层土壤、有效态和水稻(根系土)分别为 244、34 和 100 件,而研究区水田图斑

(地块)2 100个,样品数量与图斑数量不对应,导致大量图斑出现无数据的情况,通过对每一地块逐一采样的方式大面积开展地块尺度地球化学调查工作

需要耗费巨大的人力、财力和时间,这在现有的财力条件下既不现实,也无必要. 图斑具有形状、大小和位置等空间分布属性,与用数学模型获取元素含量连续变化在空间上具有重叠性,这就为用插值法获取各图斑的元素含量信息奠定了方法学基础^[36]. 借助地统计学的空间插值方法来建立重金属元素含量的连续性曲面,再将曲面的栅格文件转成点文件,这样便可以实现样品数量的扩大,保障所有图斑内至少一个实测点位或预测点位^[37]. 当单一图斑内有 1 个实测数据时,该实测数据即为该图斑的数据;当单一图斑内有 2 个以上的实测数据时,用实测数据的平均值对地块进行赋值;当单一图斑内中没有实测数据时,用插值数据的平均值对该地块进行赋值^[31,36].

以表层土壤 Cd 为例,利用反距离权重法(IDW)进行空间插值,得到土壤 Cd 含量的空间分布情况[图 6(a)],可以看出,研究区土壤 Cd 表现为北部含量低,南部含量高,Cd 的高含量区呈条带状分布. 王锐等^[38]对重庆市东南地区土壤重金属的来源进行了研究,结果显示,土壤 Cd 的来源主要与二叠系灰岩有关,而二叠系地层在渝东南地区多呈条带状分布,因此该地区土壤 Cd 含量的空间分布特征可能和成土母质有关. 将土壤 Cd 含量的连续曲面转换成点文件,共获得 27 780 个插值点位[图 6(b)]. 将实测点位和插值点位与图斑进行空间叠加发现,通过插值获得的点位完全可以满足研究区图斑赋值的要求[图 6(c)].

同样的方法,将土壤有机质、CaO 和 Mn 含量及土壤 pH 的实测数据进行空间插值,得到预测点位,并进行图斑赋值. 利用土壤 Cd 有效态(Mm)与水稻 Cd 生物富集系数(BAF)的预测模型,计算每个图斑中土壤 Cd 的有效态及水稻 Cd 含量. 至此,每个图斑中均包含了土壤 Cd 全量、有效态和 pH,以及水稻 Cd 含量.

2.5 耕地安全利用区划及建议

研究区地块尺度受污染耕地安全利用区划结果见图 7. 其中优先保护类耕地面积为 11.32 km²,占比为 59.30%,主要分布于研究区的北部地区. 安全利用(IAa)、安全利用(IAb)、安全利用(IBa)、安全利用(IIAa)、安全利用(IIAb)和安全利用(IIBa)面积分别为 3.72、1.53、0.27、1.34、0.27 和 0.58 km²,占比分别为 19.49%、8.01%、1.43%、7.04%、1.41% 和 3.06%,主要分布于研究区西南部、中部和南部地区. 严格管控面积为 0.05 km²,占比为 0.26%,位于研究区东部. 总体来看,研究区土壤以优先保护类为主,但西南及南部地区,存在一定程度

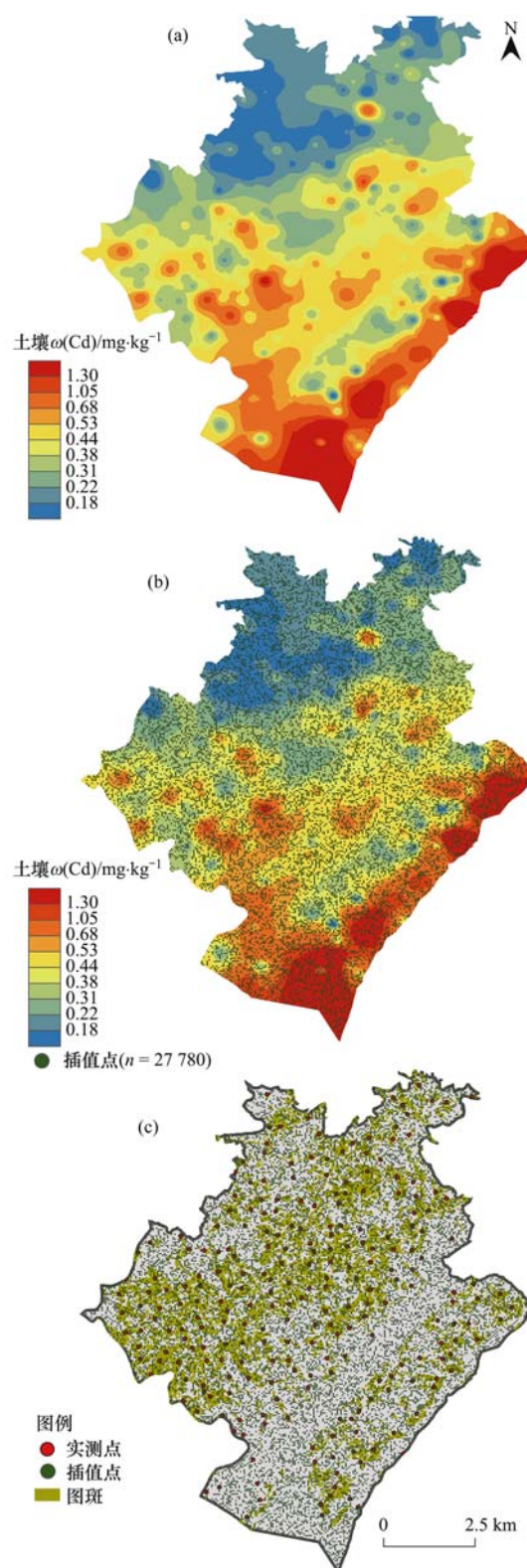


图 6 土壤 Cd 图斑赋值过程示意
Fig. 6 Schematic diagram of the process of soil Cd map spot assignment

的重金属污染风险.

优先保护类,表示土壤中及农作物中 Cd 的含量均未超标,土壤及水稻安全. 该类地块应加强农业投入品的监测,防止新增污染.

安全利用(IAa),表示土壤 Cd 含量超筛选值,

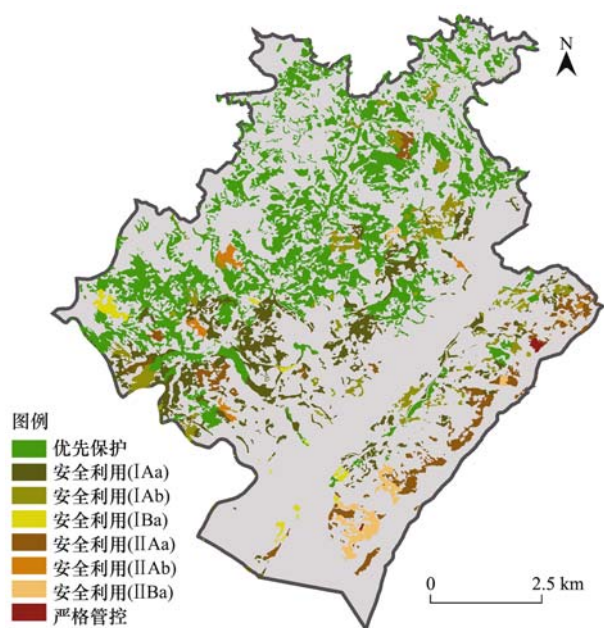


图7 受污染耕地安全利用区划

Fig. 7 Zoning map of the safe use of contaminated farmland

水稻不超标,土壤 pH 小于 6.5, Cd 有效态占比小于 20%. 对于该类地块,建议首选种植水稻重金属低累积品种,确保农产品安全. 由于土壤为酸性,土壤中 Cd 仍然具有被活化的风险,建议通过施用钙镁磷肥,改善土壤 pH^[39].

安全利用(IAb),表示土壤中 Cd 的含量超过筛选值,水稻不超标,土壤 pH 小于 6.5, Cd 有效态占比大于 20%. 对于该类地块,建议通过水分调控措施,降低 Cd 的活性. 研究表明,土壤淹水条件可以有效降低稻米 Cd 含量,主要原因为: ①土壤淹水处于还原状态,消耗土壤中 H^+ , 同时 Fe 和 Mn 被还原形成 $Fe(OH)_2$ 和 $Mn(OH)_2$, 导致土壤 pH 升高,有利于 Cd 的沉淀; ②土壤淹水可以显著增加水稻根表 Fe(II) 含量,增加水稻根表铁膜厚度,阻碍 Cd 向水稻地上部分转移; ③淹水后形成的还原性环境,导致土壤中的 SO_4^{2-} 被还原成 S^{2-} 和 Cd^{2+} 生成难溶性 CdS 沉淀,也是显著影响水稻吸收积累 Cd 的一个重要因素. 在不同生育期水分管理对水稻吸收积累 Cd 有显著影响,其中全生育期淹水降 Cd 效果最明显^[40].

安全利用(IIAa),表示土壤中 Cd 的含量超过筛选值,水稻不超标,土壤 pH 大于 6.5, Cd 的有效态占比小于 20%. 对于该类土壤,应注重农业投入品的监测,防止土壤酸化,并定期对土壤及农产品的安全性进行监测,若发现农作物超标或土壤重金属活化的现象,应及时采取安全措施,保障农产品安全.

安全利用(IIBa),表示土壤 Cd 超过筛选值,水稻超标,土壤 pH 小于 6.5, Cd 的有效态占比小于

20%. 对于该类土壤,建议通过叶面喷施含硅、硒、锌等营养阻隔剂,提高作物抗逆性,抑制作物根系重金属向可食部位转运,降低可食部位重金属含量^[41]. 另外,可在该区域推广种植水稻 Cd 低累积品种,降低农作物可食用部分 Cd 的含量^[42].

安全利用(IIBb),表示土壤 Cd 超过筛选值,水稻超标,土壤 pH 小于 6.5, Cd 的有效态占比大于 20%. 建议通过水分调控改善土壤酸化现象,此外,可向土壤中添加钝化材料,在充分混合的基础上,使其与土壤重金属 Cd 发生物理和化学作用,将重金属 Cd 离子转化为化学性质不活泼形态,降低 Cd 在土壤环境中的迁移和生物有效性,阻断土壤中重金属 Cd 进入作物可食用部分,例如海泡石、蒙脱石和沸石等黏土矿物,秸秆炭等碳材料以及氧化钙、氢氧化钙、硅酸钠和硅酸钙等硅钙材料^[43].

安全利用(IIBa),表示土壤 Cd 超过筛选值,水稻超标,土壤 pH 大于 6.5, Cd 的有效态占比小于 20%. 对于该类土壤,建议通过水稻地低累积品种与超累积作物套种的方法,一方面可减少水稻可食用部分 Cd 的含量,另一方面可减少土壤中 Cd 的全量. 此外,建议通过喷施叶面营养阻隔剂,增强水稻的抗逆性.

严格管控类,表示土壤超过管制值,说明该类耕地已不适合种植可食用农产品,建议调整种植结构,例如种植桑树发展养殖业.

3 结论

(1) 研究区土壤 Cd、Hg、Pb、As 和 Cr 含量的平均值均高于全国背景值, Cd 超过风险筛选值和管制值的比例分别为 33.61% 和 2.05%, 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. 研究区土壤重金属的富集受到灰岩成土过程及土壤有机质含量的影响. 土壤以强酸性和酸性为主所占比例分别为 16.39% 和 51.24%.

(2) 土壤 Cd 生物有效态占比 60%, 生物活性较高, 存在明显的生态风险, 土壤 Hg、Pb、As 和 Cr 主要以残渣态或铁锰氧化物结合态为主. 水稻存在明显的 Cd 超标, 超标率为 28%, 其余重金属不超标.

(3) 土壤 Cd 有效态主要受到土壤 Cd 全量和 pH 的影响, 水稻对 Cd 的富集主要受到土壤有机质、Mn 和 CaO 含量的影响. 土壤 Cd 有效态及农作物 Cd 含量预测值与实测值的相关系数分别为 0.878 和 0.926, 拟合效果较好.

(4) 区划结果显示, 研究区土壤以优先保护类为主, 占比 59.30%, 主要分布于研究区的北部地区. 安全利用(IAa)、安全利用(IAb)、安全利用(IIAa)、安全利用(IIBa)、安全利用(IIBb) 和严格管控类.

安全利用 (IIAa)、安全利用 (IIAb) 和安全利用 (IIBa) 占比分别为 19.49%、8.01%、1.43%、7.04%、1.41% 和 3.06%, 主要分布于研究区西南部、中部及南部地区。严格管控类占比为 0.26%。

参考文献:

- [1] Nriagu J O. A history of global metal pollution [J]. *Science*, 1996, **272** (5259): 223, doi: 10.1126/science.272.5259.223.
- [2] 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.
- [3] Wang F, Zhao W J, Chen Y Y. Spatial variations of soil heavy metal potential ecological risks in typical moso bamboo forests of Southeast China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, **102**(2): 224-230.
- [4] Wang G Y, Zhang S R, Xiao L Y, *et al.* Heavy metals in soils from a typical industrial area in Sichuan, China: spatial distribution, source identification, and ecological risk assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24** (20): 16618-16630.
- [5] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 兰州城市土壤磁性特征及其对环境污染的指示 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (6): 1033-1044.
- [6] 宋波, 王佛鹏, 周浪, 等. 广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (5): 2443-2452.
- [7] Song B, Wang F P, Zhou L, *et al.* Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (5): 2443-2452.
- [8] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36** (9): 1689-1692.
- [9] Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36** (9): 1689-1692.
- [10] Zhao F J, McGrath S P, Meharg A A. Arsenic as a food chain contaminant: mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, **61**: 535-559.
- [11] Tian H Z, Cheng K, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of atmospheric emissions of Cd, Cr, and Pb from coal in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 157-163.
- [12] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90** (8): 2524-2530.
- [13] 于洋, 宋波, 陈同斌, 等. 西江流域土壤镍含量特征及风险评估 [J]. *环境污染与防治*, 2018, **40** (6): 698-703, 709.
- [14] Yu Y, Song B, Chen T B, *et al.* Content characteristics and risk assessment of Ni in soils of Xijiang River Basin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, **40** (6): 698-703, 709.
- [15] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (2): 886-894.
- [16] Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (2): 886-894.
- [17] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (5): 854-860.
- [18] Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33** (5): 854-860.
- [19] 辛翔飞, 王秀东, 王济民. 新时代下的中国粮食安全: 意义、挑战和对策 [J]. *中国农业资源与区划*, 2021, **42** (3): 76-84.
- [20] Xin X F, Wang X D, Wang J M. China's grain security in the new era: significance, challenges and countermeasures [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, **42** (3): 76-84.
- [21] DZ/T 0279-2016, 区域地球化学样品分析方法 [S].
- [22] Tessier A, Campbell P G C, Bisson B. Evaluation of the APDC-MIBK extraction method for the atomic absorption analysis of trace metals in river water [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1979, **7** (1): 41-54.
- [23] 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.
- [24] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求 (试行) [S].
- [25] 廖书林, 郎印海, 王延松, 等. 辽河口湿地表层土壤中 PAHs 的源解析研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31** (3): 490-497.
- [26] Liao S L, Lang Y H, Wang Y S, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the topsoil of Liaohe estuarine wetlands [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31** (3): 490-497.
- [27] 王学求, 周建, 徐善法, 等. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征 [J]. *中国地质*, 2016, **43** (5): 1469-1480.
- [28] Wang X Q, Zhou J, Xu S F, *et al.* China soil geochemical baselines networks: data characteristics [J]. *Geology in China*, 2016, **43** (5): 1469-1480.
- [29] 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].
- [30] 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.2019.126799.
- [31] 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.
- [32] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, *et al.* Soil acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China [J]. *Pedosphere*, 2010, **20** (3): 399-408.
- [33] Krug E C, Frink C R. Acid rain on acid soil: a new perspective [J]. *Science*, 1983, **221** (4610): 520-525.
- [34] Li J Y, Xu R K, Zhang H. Iron oxides serve as natural anti-acidification agents in highly weathered soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, **12** (6): 876-887.
- [35] 唐世琪, 杨峥, 马宏宏, 等. 岩溶区土壤镉生物有效性影响因素研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39** (6): 1221-

- 1229.
- Tang S Q, Yang Z, Ma H H, *et al.* Study on factors affecting soil cadmium bioavailability in soil in karst area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(6): 1221-1229.
- [28] 田恒川, 徐国志. 镉地球化学行为与我国西南地区镉污染[J]. *现代矿业*, 2014, **30**(11): 134-136.
- [29] 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.
- [30] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River draining of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [31] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [32] 邓小华, 蔡兴, 张明发, 等. 喀斯特地区湘西州植烟土壤 pH 分布特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(6): 308-313.
- Deng X H, Cai X, Zhang M F, *et al.* Distribution characteristics of tobacco-growing soil pH and its influencing factors in karst region of Xiangxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(6): 308-313.
- [33] Cappuyns V, Swennen R, Verhulst J. Assessment of heavy metal mobility in dredged sediments: porewater analysis, single and sequential extractions[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2006, **15**(2): 169-186.
- [34] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [35] Yu T, Hou W L, Hou Q Y, *et al.* Safe utilization and zoning on natural selenium-rich land resources: a case study of the typical area in Enshi County, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(9): 2803-2818.
- [36] 苏晓燕, 赵永存, 杨浩, 等. 不同采样点数量下土壤有机质含量空间预测方法对比[J]. *地学前缘*, 2011, **18**(6): 34-40.
- Su X Y, Zhao Y C, Yang H, *et al.* A comparison of predictive methods for mapping the spatial distribution of soil organic matter content with different sampling densities[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, **18**(6): 34-40.
- [37] 王锐, 邓海, 梁绍标, 等. 重庆市两不同地貌及地质背景区土壤 Cd、Se 元素含量空间插值方法研究[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(6): 1332-1341.
- Wang R, Deng H, Liang S B, *et al.* Spatial interpolation method of soil Cd and Se element contents in two different landforms and geological background areas in Chongqing City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(6): 1332-1341.
- [38] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- Wang R, Deng H, Yan M S, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in southern Youyang County, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- [39] 区惠平, 刘昔辉, 黄金生, 等. 广西典型红壤旱地施用钙镁磷肥对玉米产量及其镉累积的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(18): 5300-5305.
- Qu H P, Liu X H, Huang J S, *et al.* Effect of calcium-magnesium phosphate fertilizer on maize yield and its cadmium accumulation in upland red soil in Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(18): 5300-5305.
- [40] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 水分调控和钝化剂处理对水稻土镉的钝化效应及其机理[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(7): 1316-1321.
- Li J R, Xu Y M, Lin D S, *et al.* Immobilization of cadmium in a paddy soil using moisture management and amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(7): 1316-1321.
- [41] 谭骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, **37**(6): 981-987.
- Tan J, Pan L P, Huang Y F, *et al.* Effects of foliar fertilizer and passivator application on cadmium accumulation and transport in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(6): 981-987.
- [42] 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.
- [43] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(3): 438-448.
- Yin F, Wang H J, Li Y Y, *et al.* Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(3): 438-448.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shay County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)