

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祺, 胡建林 (635)
2006~2021 年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面 O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季 VOCs 特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气 VOCs 污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晚, 张瑞芹 (689)
郑州市 PM _{2.5} 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晚, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群 PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于 LEAP 模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州河水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市 2015~2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中 Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca 改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)
基于 Monte-Carlo 模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd 复合污染土壤中 Cd 释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晚晓, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果

王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家珑, 代允超*

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为研究酸性镉(Cd)污染土壤安全利用问题, 以陕西商洛轻中度Cd污染农田为研究对象, 分别施加生石灰、生物炭和钙镁磷肥, 通过小麦-玉米轮作试验, 探究不同用量钝化剂对Cd污染土壤的安全利用效果, 筛选出最佳的钝化剂配比。结果表明: ①通过钝化剂的施加, 能不同程度地改善土壤质量。②施用钝化剂后, 小麦和玉米的籽粒产量均有不同程度地提高。③3种钝化剂可有效地提升土壤pH值和降低土壤有效态Cd含量, 生石灰 $2\ 340\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C3)处理效果最佳, 分别增加小麦和玉米土壤pH 1.453和1.717单位, 减少有效态Cd含量34.38%和30.20%。④施加生物炭 $1\ 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B2)处理对降低小麦根系、秸秆和籽粒Cd含量效果最好, 较CK分别显著降低了53.60%、38.86%和52.96%, 其小麦籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 降低至 $0.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的小麦Cd限量值($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 施加生物炭 $1\ 260\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B1)处理对降低玉米根系、秸秆和籽粒Cd含量综合效果最佳, 较CK分别显著降低43.74%、53.20%和94.57%, 其玉米籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 降低至 $0.0019\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的玉米Cd限量值($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。因此, 在田间试验条件下, 综合考虑各项指标的影响, 生物炭在轻中度Cd污染的小麦-玉米轮作区农田土壤效果最好。

关键词: 轻中度镉污染; 农田; 小麦玉米轮作; 钝化剂; 安全利用

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1098-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303151

Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland

WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, LÜ Jia-long, DAI Yun-chao*

(Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to study the safe utilization of acid cadmium (Cd) contaminated soil, light and moderate Cd-contaminated farmland in Shangluo, Shaanxi Province was taken as the research object, and lime, biochar, and calcium magnesium phosphate fertilizer were applied. Through the wheat-maize rotation experiment, the safe utilization effect of different amounts of passivator on Cd-contaminated soil was explored, and the best ratio of passivator was selected. The results showed that: ① the soil quality could be improved to varying degrees by applying the passivator. ② After the application of amendments, the grain yield of wheat and maize increased to different degrees. ③ The lime $2\ 340\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (C3) treatment had the best effect, which increased the soil pH of wheat and corn by 1.453 and 1.717 units, respectively, and reduced the available Cd content by 34.38% and 30.20%, respectively. ④ The application of biochar $1\ 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B2) treatment had the best effect on reducing the Cd contents in wheat roots, straws, and grains, which were significantly reduced by 53.60%, 38.86%, and 52.96%, respectively, compared with that in CK. The Cd content in wheat grains was reduced to $0.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was lower than the limit value of wheat Cd ($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) specified in the "National food safety standard food pollutant limit" (GB 2762-2017). The application of the biochar $1\ 260\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B1) treatment had the best comprehensive effect on reducing the Cd contents of maize roots, straws, and grains, which were significantly reduced by 43.74%, 53.20%, and 94.57%, respectively, compared with that in CK. The Cd content of maize grains was reduced to $0.0019\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was far lower than the limit value of maize Cd ($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) specified in the "National food safety standard food pollutant limit" (GB 2762-2017). Therefore, under the conditions of the field experiment, considering the influence of various indexes, biochar had the best effect on farmland soil in the wheat-maize rotation area with mild to moderate Cd pollution.

Key words: mild to moderate cadmium pollution; farmland; wheat and corn rotation; passivator; safe utilization

镉(Cd)是自然界存在的一种微量元素,是毒性最强的重金属元素之一,在土壤-植物系统中有极强的迁移和累积能力^[1]。2021年生态环境部发布的中国生态环境状况公报显示,影响农用地土壤环境质量的主要重金属污染物是Cd^[2]。据统计,我国Cd污染土壤面积高达20万 km^2 ^[3]。有研究表明,土壤中Cd的含量远超标准值,全国大约有1 300万 hm^2 的耕地被Cd污染^[4]。由此说明我国的土壤受到了重金属的严重污染,其中Cd为首要污染物。根据《2021年国民经济和社会发展统计公报》显示,小麦和玉米粮食产量总和占到中国粮食产量的59.9%。因此小麦

和玉米的产量与品质对中国粮食安全和国民健康具有重要意义。但是部分小麦种植区存在着严重的Cd污染问题,如华北某灌溉区麦田、河南新乡和济源市东部平原等^[5-7]。部分地区的玉米受到了轻微的Cd污染,如石家庄市栾城区和贵州省西北部某地区等^[8,9]。鉴于以上原因,寻找成本低廉、经济高效且

收稿日期: 2023-03-17; 修订日期: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007303); 陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2022-YL(XN)39); 陕西省农业协同创新与推广联盟重大科技项目(LMZD202106)

作者简介: 王晓晶(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为受污染耕地治理与安全利用, E-mail: 2493441377@qq.com

* 通信作者, E-mail: daiyc2018@163.com

适合开展大面积应用的土壤污染修复方法,对解决受污染耕地土壤修复治理问题,确保国家粮食安全,实现土壤的可持续利用与农产品的安全生产具有重要意义。

与其他重金属修复技术相比,土壤钝化修复方法具有成本低廉、可推广性强、效果优且持久的优点^[10,11]。钝化剂有钙镁磷肥、生石灰和生物炭等,钙镁磷肥可与土壤重金属发生络合作用,来降低重金属活性^[12,13];生石灰通过调节土壤 pH,加强土壤负电荷对重金属的亲合力,进而降低重金属的生物有效性^[14,15];而生物炭主要通过表面吸附,共同沉淀实现对重金属的钝化^[16]。有田间和盆栽试验研究表明^[17-20],石灰、生物炭和钙镁磷肥等无机钝化剂可以显著提升土壤 pH,并显著降低土壤有效态 Cd 含量和作物籽粒 Cd 含量。虽然前人利用钝化剂对 Cd 污染土壤修复做了大量研究,但对利用生石灰、生物炭和钙镁磷肥这 3 种钝化剂对小麦和玉米在商洛市 Cd 污染农田土壤的最适施用量和对钝化效果进行的比较还缺乏系统的探讨。

本研究选取生物炭、生石灰和钙镁磷肥为钝化材料,通过大田试验研究不同钝化材料对土壤和不同农作物 Cd 含量的影响,找出最优的钝化材料和最适添加量,以期为陕西省轻中度 Cd 污染耕地土壤安全利用和可持续利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本试验地位于陕西东南部商洛市某污染酸性农田,耕作制度为小麦玉米两熟,试验田基本理化性质如表 1 所示。试验土壤 $\omega(\text{TCd})$ 为 $2.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018),高于农用地土壤污染风险筛选值,但低于农用地土壤污染风险管制值,属于轻中度污染土壤。

1.2 供试材料

供试小麦和玉米品种:商麦 1619 和纪元 1 号,购买于陕西省商洛市农资市场。

供试土壤钝化剂详见表 2。

表 1 试验田土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested field										
项目	pH	$\omega(\text{OM})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TCd})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{ACd})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AP})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{ACu})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AZn})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AMn})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AFe})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AK})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
数值	6.54	23.62	2.81	0.39	16.89	2.45	1.72	37.67	12.95	76.43

1)OM:有机质;TCd:总镉;ACd:有效镉;AP:速效磷;ACu:有效铜;AZn:有效锌;AMn:有效锰;AFe:有效铁;AK:速效钾

表 2 供试材料基本信息¹⁾

Table 2 Basic information of test materials				
编号	名称	缩写	来源	pH
1	生物炭	B	新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所	8.76
2	钙镁磷肥	P	广东大众农业科技股份有限公司	10.15
3	生石灰	C	新余市亮亮贸易有限公司	9.57

1)供试材料中未检出 Cd

1.3 试验设计与处理

本试验共设置 10 个处理(表 3)。每个处理重复 3 次,共计 30 个小区,每个小区面积为 $15.75 \text{ m}^2(4.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m})$,分别于 2021 年 10 月和 2022 年 7 月种植小麦与玉米。同时按照农户习惯施用基肥,施用量约为氮肥 $12 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (以 N 计),磷肥 $8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (以 P 计),分别为尿素和磷酸二铵。两季农作物的水肥管理都根据试验区的农户日常标准进行。种植小麦和玉米时石灰提前 1 周施入试验田,其他钝化剂按以上用量随肥料一起施入试验小区,然后用旋耕机混匀。在不同试验地块分别进行,施入上述钝化剂后均不再施用任何钝化剂。

1.4 样品的采集与处理

待小麦和玉米成熟后,同步采集土壤样品、小麦

表 3 试验处理及其用量

Table 3 Test treatment and dosage	
处理	钝化材料用量
CK	小麦和玉米常规种植
C1	生石灰 $1\ 260 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
C2	生石灰 $1\ 800 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
C3	生石灰 $2\ 340 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
B1	生物炭 $1\ 260 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
B2	生物炭 $1\ 800 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
B3	生物炭 $2\ 340 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
P1	钙镁磷肥 $420 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
P2	钙镁磷肥 $600 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
P3	钙镁磷肥 $780 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

和玉米植株,并对小麦和玉米进行测产。用不锈钢土钻取 4 钻作为一个混合土样,每个小区共采集 3 个混合土样、多株小麦和玉米植株混合样。收集到的土

壤样品经过风干磨细过筛备用;采集的植株样品用去离子水洗涤后,在 105℃烘箱烘 30 min 杀青,然后 70℃烘干至恒重,将小麦和玉米植株根部、秸秆和籽粒研磨粉碎过 100 目筛保存待测。

1.5 测定项目与方法

土壤 pH:使用超纯水浸提,水土比为 2.5:1,pH 计测定。土壤有机质含量:采用重铬酸钾(外加热法)测定。速效磷和速效钾:分别采用钼锑抗比色法和火焰光度法测定。有效铁、有效锌、有效锰和有效铜:采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)和三乙醇胺(TEA)提取。土壤有效态 Cd 含量:采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)提取。籽粒、秸秆和根系中 Cd 含量:采用 HNO₃-HClO₄ 消解。上述提取液和消解液均使用原子吸收光谱仪(AAS)测定(PE 900T)。采用国家标准物质(土壤:GBW07407,小麦:GBW08503c,玉米:GBW10012)进行质量控制,土壤样品和植物样品回收率分别为 95%~103%和 92%~102%。

1.6 数据统计与分析

转运系数(transfer factor,TF)是植物后一部位某元素含量与植物前一部位某元素含量之比,常用来评价植物各部位对重金属的运输能力。

$$TF_{\text{秸秆到籽粒}} = C_{\text{grain}} / C_{\text{straw}}$$

式中, C_{grain} 为籽粒 Cd 含量(mg·kg⁻¹), C_{straw} 为秸秆 Cd 含量(mg·kg⁻¹)。

表 4 小麦试验后土壤理化性质¹⁾

Table 4 Soil physicochemical properties of the wheat test field

处理	$\omega(\text{OM})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{AP})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{ACu})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{AZn})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{AMn})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{AFe})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{AK})$ /mg·kg ⁻¹
CK	20.17±0.00f	13.89±1.45g	1.45±0.09f	0.81±0.04f	31.78±0.98b	9.95±0.63d	81.88±2.31f
C1	26.48±0.74cde	30.43±2.65bcd	2.70±0.04a	1.29±0.06d	30.95±0.85b	15.83±0.50a	93.69±1.66d
C2	28.42±2.04bc	29.65±1.20cde	2.23±0.05bc	1.33±0.02d	17.03±0.71e	7.20±0.20e	130.46±1.45b
C3	27.12±0.02cd	15.88±0.39fg	1.44±0.02f	0.80±0.01f	14.69±1.08f	4.52±0.21f	80.56±1.04f
B1	25.86±0.71cde	24.06±5.04def	1.50±0.02f	0.83±0.03f	19.18±0.93d	6.90±0.76e	129.79±1.32b
B2	33.61±0.76a	41.80±0.98a	2.17±0.18cd	2.11±0.13a	15.03±1.12f	7.35±0.57e	147.70±3.89a
B3	35.45±0.71a	34.85±1.30abc	2.01±0.10e	1.51±0.10c	28.62±1.21c	11.48±0.46c	146.70±3.49a
P1	30.22±2.69b	38.52±8.77ab	2.28±0.06bc	1.87±0.07b	31.54±1.52b	13.55±0.41b	94.71±4.07d
P2	23.88±0.69e	21.98±0.98efg	2.04±0.04de	1.25±0.05de	17.80±0.92e	6.85±0.26e	113.15±2.06c
P3	24.43±0.13de	19.69±2.44fg	2.34±0.15b	1.17±0.05e	45.15±1.97a	16.05±0.84a	89.24±1.70e

1) OM:有机质,AP:速效磷,ACu:有效铜,AZn:有效锌,AMn:有效锰,AFe:有效铁,AK:速效钾;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同

2.2 不同钝化剂对小麦和玉米籽粒产量的影响

如图 1(a)所示,与 CK 相比,不同钝化处理的小麦籽粒产量均达到显著性差异($P < 0.05$),施用钝化剂后,小麦籽粒产量均有不同程度的提高,增幅在 46%~126%。其中 C2 处理增加小麦籽粒产量最多,较对照组增产 126%。如图 1(b)所示,第二季耕种玉米时,钝化剂对玉米籽粒产量的影响没有小麦明显。与 CK 相比,大部分钝化处理的玉米籽粒产量达到显

著差异($P < 0.05$),增幅在 0.36%~46.26%。其中 C3 处理增加玉米籽粒产量最多,较对照组增产 46.26%。综上所述,生石灰增加小麦和玉米籽粒产量效果最佳。

2 结果与分析

2.1 不同钝化剂对土壤理化性质的影响

种植小麦后土壤基本理化性质如表 4 所示,不同钝化剂处理对土壤理化性质有着显著影响。相比于 CK,不同理化性质指标总体呈上升趋势。C1、B3、P1 及 P3 处理相比于 CK,有机质、速效磷、有效铜、有效锌、有效铁和速效钾含量均有不同程度的增加。从综合效果来看,P1 处理效果最佳,经 P1 处理后有机质含量提升了 49.83%、有效磷含量增幅为 177.32%、有效铜含量增幅为 57.24%、有效锌含量增幅为 130.86%、有效铁含量提升了 36.18%、速效钾含量提升了 15.67%。根据表 5 可知,其他钝化处理也能不同程度地升高玉米季土壤理化性质指标含量,但综合效果略低于 P1 处理。经 P1 处理后,玉米季土壤有机质、速效磷、有效铜和有效锌含量与 CK 相比有所升高,提升幅度分别为 109.49%、144.07%、38.55% 和 260.00%。

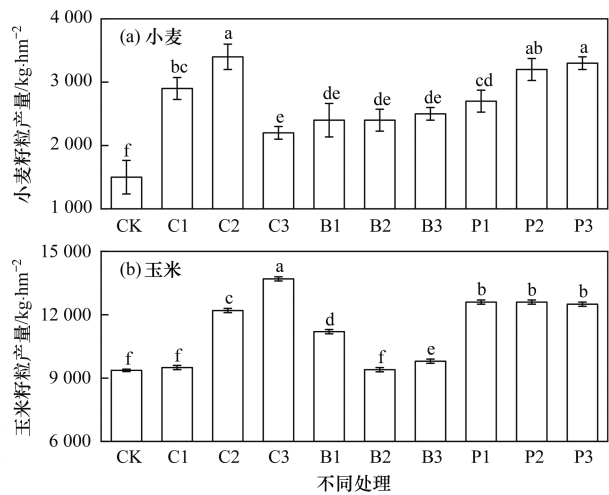
著差异($P < 0.05$),增幅在 0.36%~46.26%。其中 C3 处理增加玉米籽粒产量最多,较对照组增产 46.26%。综上所述,生石灰增加小麦和玉米籽粒产量效果最佳。

2.3 不同钝化剂对小麦和玉米土壤 pH 及有效态 Cd 含量的影响

土壤 pH 值是影响土壤重金属吸收转运的重要因素之一。不同钝化剂对小麦季土壤 pH 值的影响如

表 5 玉米试验后土壤理化性质
Table 5 Soil physicochemical properties of the corn test field

处理	$\omega(\text{OM})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AP})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{ACu})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AZn})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AMn})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AFe})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AK})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	16.54±0.01g	8.85±0.53e	0.83±0.05d	0.20±0.01g	9.88±0.52a	9.75±0.05a	94.92±7.28d
C1	32.42±2.59cd	14.32±0.21c	1.06±0.09ab	0.44±0.05cd	2.10±0.23de	5.78±0.52c	94.70±3.98d
C2	28.94±0.92de	14.65±0.22c	0.87±0.02cd	0.48±0.01c	1.74±0.03ef	3.94±0.11de	118.09±4.84c
C3	27.68±0.95e	7.45±0.43e	0.53±0.11e	0.17±0.04g	1.73±0.01ef	2.97±0.54f	66.74±0.94f
B1	23.62±1.15f	11.69±1.19d	0.94±0.05cd	0.38±0.02e	4.69±0.26b	3.37±0.44ef	86.71±2.47e
B2	37.82±3.47ab	19.68±1.59ab	0.85±0.07d	0.70±0.04a	1.26±0.18f	3.81±0.28de	152.35±2.11a
B3	38.92±0.03a	17.93±0.94b	1.12±0.04a	0.53±0.03b	2.53±0.28d	7.94±0.58b	124.07±0.89b
P1	34.65±0.72bc	21.60±2.87a	1.15±0.01a	0.72±0.02a	3.60±0.19c	9.67±0.14a	93.44±1.93d
P2	28.32±1.75e	13.19±0.58cd	0.88±0.02cd	0.41±0.01de	1.81±0.05e	4.33±0.07d	98.66±3.93d
P3	25.59±1.92ef	7.04±0.82e	0.97±0.04bc	0.33±0.01f	3.14±0.16c	7.43±0.07b	86.85±0.90e



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),不同
图 1 不同钝化剂对小麦和玉米籽粒产量的影响
Fig. 1 Effects of different passivators on grain yield of wheat and maize

图 2(a)所示. 在不同钝化处理下小麦季土壤 pH 值相较于 CK(6.64)均显著提高 0.37 ~ 1.45 个单位. C3 处理增加土壤 pH 效果最好, 其次为 C2 处理, P1 处理增加土壤 pH 效果最差. 但与 CK 相比, P1 处理仍达到显著差异($P < 0.05$). 由图 2(b)可知, 与 CK(6.68)相比, 添加钝化剂均显著提高玉米季土壤的 pH 值 0.45 ~ 1.72 个单位. 与小麦季土壤相同, C3 处理提升玉米季土壤 pH 效果最好.

如图 3(a)所示, 与 CK 相比, 小麦季土壤有效 Cd 含量均显著下降了 5.94% ~ 34.38%. 在所有钝化处理中, 与 CK 相比, C3 处理对降低小麦季土壤有效态 Cd 含量效果最显著, 较 CK 显著降低 34.38%, 说明施加 2 340 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生石灰对降低小麦季土壤的有效态 Cd 含量效果最佳. 玉米季土壤有效态 Cd 含量如图 3(b)所示, 部分钝化处理间的差异达到了显著水平($P < 0.05$). 与 CK 相比, 有效态 Cd 含量下降了 5.91% ~ 30.20%. C3 处理降低玉米季土壤有效态 Cd 含量效果最佳, 较 CK 显著降低 30.20%. 两季土壤均在

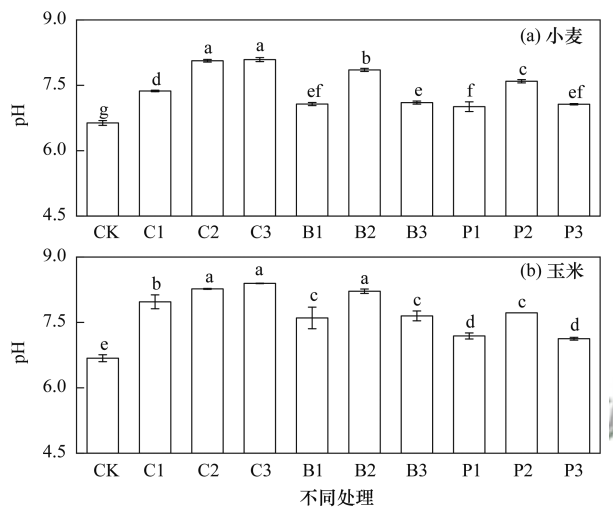


图 2 不同钝化剂对小麦和玉米土壤 pH 值的影响
Fig. 2 Effects of different passivators on soil pH of wheat and maize

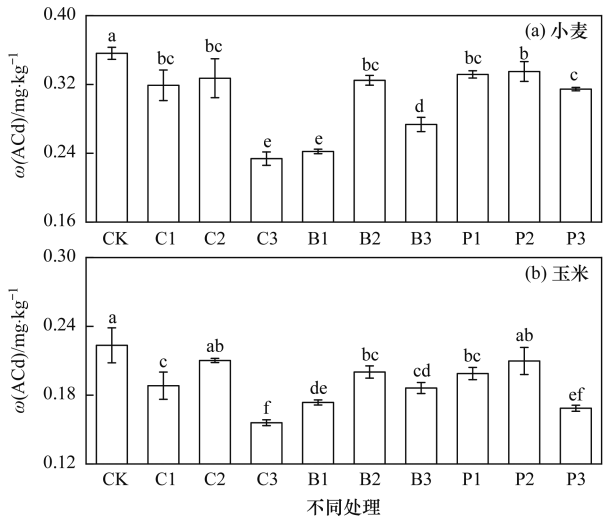


图 3 不同钝化剂对小麦玉米土壤有效态 Cd 含量的影响
Fig. 3 Effects of different amendments on available Cd content in wheat and maize soil

C3 的处理下达到了最佳的钝化效果.
2.4 不同钝化剂对小麦和玉米根系、秸秆和籽粒 Cd 含量的影响
由图 4(a)可知, 相比于 CK, 3 种钝化剂均能显著

降低小麦根系 Cd 含量 ($P < 0.05$)。施用生石灰、生物炭和钙镁磷肥后,小麦根系 Cd 含量分别降低了 12.75% ~ 32.26%、23.48% ~ 53.60% 和 26.20% ~ 33.34%。由图 4(b)可知,除 C1 处理外,其他处理较 CK,小麦秸秆 Cd 含量均显著下降 ($P < 0.05$)。施用生石灰、生物炭和钙镁磷肥后,小麦秸秆 Cd 含量分别降低了 13.89% ~ 36.50%、24.39% ~ 38.86% 和 27.77% ~ 32.59%。

由图 4(c)可知,相比于 CK,3 种钝化剂均显著降低了小麦籽粒 Cd 含量 ($P < 0.05$)。施用生石灰、生物炭和钙镁磷肥后,小麦籽粒 Cd 含量分别降低了 10.98% ~ 27.18%、25.44% ~ 52.96% 和 14.11% ~ 44.77%。在各处理中,施用 $1800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭 (B2) 是降低小麦根系、秸秆和籽粒 Cd 含量的最佳处理。

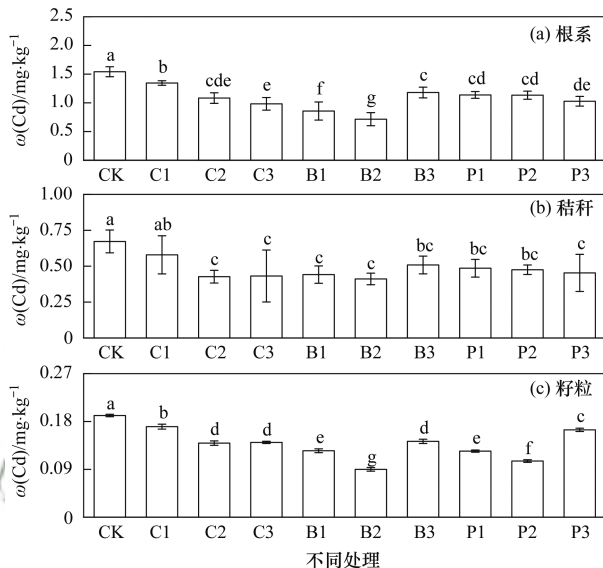


图 4 不同钝化剂对小麦根、秸秆和籽粒 Cd 含量的影响

Fig. 4 Effects of different amendments on Cd content in wheat roots, straws, and grains

由图 5(a)可知,与 CK 相比,除 C1 处理外,其他钝化处理玉米根系 Cd 含量达到显著差异 ($P < 0.05$)。与 CK 相比,施用生石灰、生物炭和钙镁磷肥后,玉米根系 Cd 含量分别降低了 6.19% ~ 45.81%、31.22% ~ 43.74% 和 39.54% ~ 41.62%。C2 处理对降低玉米根系 Cd 含量效果最佳,较 CK 显著降低了 45.81%。由图 5(b)可知,除 C2、B3 和 P3 处理外,其他处理较 CK,玉米秸秆 Cd 含量均显著下降 ($P < 0.05$)。与 CK 相比,施用生石灰、生物炭和钙镁磷肥后,玉米秸秆 Cd 含量分别降低了 24.56% ~ 49.09%、20.46% ~ 53.20% 和 24.53% ~ 57.30%。P1 处理对降低玉米秸秆 Cd 含量差异最显著,较 CK 显著降低了 57.30%。说明施用钙镁磷肥 $420 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 对降低玉米秸秆 Cd 含量效果最好。由图 5(c)可知,钝化处理均能显著地降低玉米籽粒 Cd 含量 ($P < 0.05$)。与 CK 相比,施用生石

灰、生物炭和钙镁磷肥后,玉米籽粒 Cd 含量分别降低了 80.95% ~ 87.52%、74.19% ~ 94.57% 和 59.05% ~ 82.57%。B1 处理降低玉米籽粒 Cd 含量效果最佳,其次为 B3 处理和 C3 处理。从综合效果来看, B1 处理是降低玉米根系、秸秆和籽粒 Cd 含量的最佳处理。

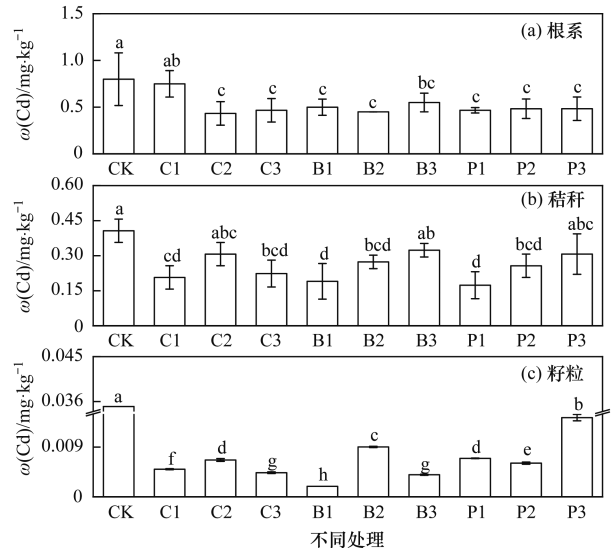


图 5 不同钝化剂对玉米根、秸秆和籽粒 Cd 含量的影响

Fig. 5 Effects of different amendments on Cd content in roots, straws, and grains of maize

2.5 不同钝化剂对小麦和玉米 Cd 转运系数的影响

转移系数反映了植物体内重金属从秸秆转移到籽粒的能力,转运系数越大,表明重金属从秸秆转移到籽粒的能力越强,危害越大^[21]。由图 6 可知,小麦的转运系数高于玉米的转运系数。不同钝化处理下小麦的转运系数见图 6(a),在所有钝化处理中, B2 处理的转运系数最低,为 0.220,较 CK 显著降低 34.72%。此结果说明 B2 处理抑制 Cd 由秸秆向小麦籽粒转运

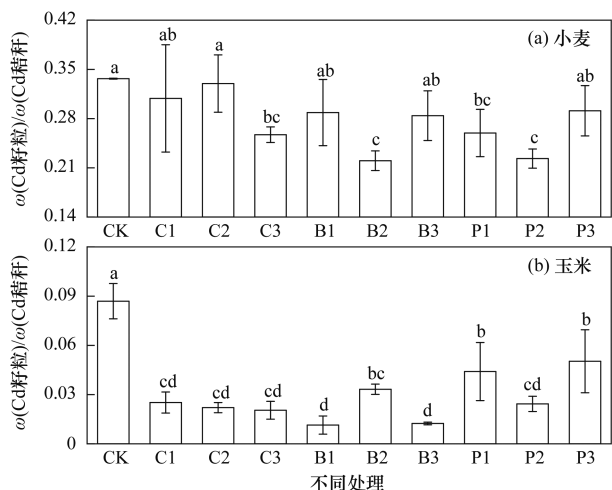


图 6 不同钝化剂对小麦和玉米转运系数的影响

Fig. 6 Effects of different passivators on translocation factors of wheat and maize

的效果最佳. 不同钝化处理下玉米的转运系数见图 6(b), 不同处理间差异较小, 除了 CK、B1、B3、P1 和 P3 之间存在显著差异外, 其他处理间未达到显著差异. B3 处理转运系数最低, 为 0.011, 较 CK 显著降低了 87.37%. 此结果说明 B3 处理抑制 Cd 由秸秆向玉米籽粒转运的效果最佳.

3 讨论

有研究表明, 使用含磷钝化剂修复重金属污染土壤会对原始土壤基本理化性质产生影响^[22]. 本研究结果表明, 小麦-玉米轮作下, 在土壤中施用生石灰、钙镁磷肥和生物炭均能显著改善土壤质量, 这与上官宇先等^[23]研究的结果基本一致. 这可能是因为生物炭含有大量农作物所需要的 N、P 和 K 元素, 施用生物炭后土壤中的相应元素得到补充^[24], 且施加生石灰能有效改善土壤微生物的生存环境, 加速含有机物的转化, 同时能增加土壤含氮量, 促进有机质的分解^[25]. 虽然钙镁磷肥对改善小麦-玉米田土壤理化性质有积极影响, 但是含磷材料的过多使用, 可能会导致可溶性磷向地表水或地下水转移, 从而造成环境破坏^[26]. 本研究结果表明, 与 CK 相比, 施加生石灰的处理显著提高了小麦和玉米的产量. 该结论与董君能等^[27]研究的结果一致. 由数据可以看出, 添加石灰较 CK 实际增加的产量并没有那么高, 只是 CK 的产量比较低, 显得增产百分比比较高. 土壤酸化会直接或间接地影响土壤生化特性和植物生长^[28]. 本试验土壤为酸性土壤, 其中的交换态 Ca^{2+} 、土壤 pH 和速效磷是影响作物年产量的主要因素. 首先是在酸性土壤中施用石灰使得植物在缺磷土壤中释放柠檬酸根分泌物, 可以增加对 P 的利用效率^[29], 提高作物产量; 其次本试验地地处滩涂, 土壤肥力差、养分淋滤损失、养分有效性降低和非必需重金属积累是酸性土壤的共同特征^[30], 这些都对植物生长和养分吸收产生负面影响, 且生长环境不良, 故在本研究中与添加生石灰的处理相比, CK 的小麦产量非常低. 所以导致施加生石灰的处理较大幅度提高了小麦的产量.

生物炭能够提高土壤 pH 值、降低土壤有效态 Cd 含量和籽粒 Cd 含量, 可能是因为生物炭本身的 pH 值很高, 且其表面的酚基、羧基和羟基都带负电荷^[31], 可以中和溶液中部分 H^+ . 因此施加生物炭后提高了土壤 pH 值, 进而增强了重金属与土壤的络合作用, 降低了土壤有效态 Cd 含量^[32], 降低其生物有效性, 最终对农作物可食部位的 Cd 产生一定的稀释效应^[33]. 苏焱等^[34]采用室内试验研究生物炭对矿区土壤的影响, 结果表明施用生物炭不仅明显提高了土

壤 pH 而且降低了土壤 Pb 和 Zn 含量. 此结论与本文试验结果基本一致. 而钙镁磷肥能够提高土壤 pH 值、降低土壤有效态 Cd 含量和籽粒 Cd 含量, 可能是因为钙镁磷肥是一种碱性肥料, 且钙镁磷肥含有的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等盐基离子能与土壤中的 H^+ 和 Al^{3+} 离子发生交换反应^[35,36]. 因此使用钙镁磷肥后提高了土壤的 pH 值^[37], 使得重金属形成氢氧化物、碳酸盐沉淀和难溶性磷酸盐^[38-40], 从而降低 Cd 的活性, 减少小麦和玉米对 Cd 的吸收和积累量, 最终降低籽粒中的 Cd 含量. 关于生石灰的钝化机制已有系统研究, 主要原因是石灰类钝化剂自身水解产生 OH^- , 中和土壤中 H^+ 的浓度, 增加土壤颗粒物表面负电荷, 促进 Cd^{2+} 形成碳酸盐沉淀物或氢氧化物沉淀物, 从而降低 Cd 活性, 减少小麦和玉米对 Cd 的吸收^[41]. 有研究证明, 生石灰和钙镁磷肥可以显著提高土壤 pH 和降低土壤有效态 Cd^[42,43], 以上结论与本文的研究结果基本吻合.

但本研究发现施用钝化剂后, 尽管对小麦籽粒中 Cd 含量有明显降低作用, 但大部分处理的小麦籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 仍然高于国家食品安全标准 (GB 2762-2017) 规定小麦的 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 一方面可能由于土壤本身的有效态 Cd 含量较高, 另一方面可能是钝化剂的添加量不足. 有研究表明, 在相同的 Cd 胁迫条件下, 作物的抗氧化酶 (SOD 和 CAT 等) 活性变化是作物抵抗氧化胁迫的适应机制之一, 以玉米和小麦为例, 随着 Cd 浓度的增加, 两种作物的抗氧化酶活性均表现出先升高后降低的趋势, 在低浓度 Cd 胁迫下, 玉米的抗氧化酶活性变化明显, 但小麦则需要更高剂量的 Cd 处理来诱导酶活性的提高, 因此, 小麦对 Cd 的富集能力本身就高于玉米^[44]. 另外, 可能由于小麦生长周期比玉米更长, 在其生长过程中会比玉米累积更多的重金属到籽粒中. 小麦经钝化处理后, 大部分处理的转运系数同步下降, 仅 C2 和 B1 处理的转运系数未随小麦籽粒 Cd 含量同步下降. 可能是因为籽粒和秸秆中 Cd 含量同步下降, 故转运系数未随籽粒 Cd 下降. 本试验小麦和玉米各部位 Cd 积累量为: 根 > 秸秆 > 籽粒, 可能是因为 Cd 从土壤进入根系细胞及组织再转运至地上部受到细胞壁、质膜、液泡和木质部的滞留作用, 导致根系 Cd 积累量最大, 秸秆和籽粒 Cd 积累量次之^[45].

4 结论

(1) 生石灰 $2\ 340 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C3) 处理是提升小麦季和玉米季土壤 pH 的最佳材料, 而钙镁磷肥 $420 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P1) 处理是提高其他理化指标的最佳材料.

(2) 生石灰 $1\ 800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C2) 处理增加小麦产量效果最佳, 生石灰 $2\ 340 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (C3) 处理增加玉米产

量效果最佳。

(3)生石灰 2 340 kg·hm⁻²(C3)处理降低土壤小麦季和玉米季有效态Cd含量效果最佳。

(4)总体上,施加钝化剂后,小麦和玉米籽粒中的Cd含量均有所降低,但玉米籽粒Cd含量的下降幅度高于小麦。生物炭 1 800 kg·hm⁻²(B2)处理降低小麦季籽粒Cd含量的效果最佳,生物炭 1 260 kg·hm⁻²(B1)处理降低玉米季籽粒Cd含量效果最佳。

(5)生物炭 1 800 kg·hm⁻²(B2)处理和生物炭 2 340 kg·hm⁻²(B3)处理抑制小麦和玉米秸秆Cd向籽粒的转移效果最佳,能有效减少籽粒Cd含量。

参考文献:

- [1] 苏金成,王小兵,汪晓丽,等. 不同钝化剂对镉污染黄壤和棕壤的钝化效果[J]. 江苏农业科学, 2021, **49**(3): 192-198.
- [2] 生态环境部. 2021年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2022, **50**(12): 61-74.
Ministry of Ecology and Environment. China ecological environment status bulletin 2021 (excerpt) [J]. Environmental Protection, 2022, **50**(12): 61-74.
- [3] 冯亚娟,黄议漫,余海英,等. 籽粒镉低积累小麦材料的筛选及稳定性分析[J]. 麦类作物学报, 2021, **41**(7): 842-850.
Feng Y J, Huang Y M, Yu H Y, *et al.* Screening of wheat materials with low cadmium accumulation in grains and characteristics of cadmium accumulation [J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, **41**(7): 842-850.
- [4] 孟龙,黄涂海,陈睿,等. 镉污染农田土壤安全利用策略及其思考[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, **45**(3): 263-271.
Meng L, Huang T H, Chen J, *et al.* Safe utilization of farmland soil with cadmium pollution: strategies and deliberations [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2019, **45**(3): 263-271.
- [5] 肖冰,薛培英,韦亮,等. 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2869-2877.
Xiao B, Xue P Y, Wei L, *et al.* Characteristics of Cd, As, and Pb in soil and wheat grains and health risk assessment of grain-Cd/As/Pb on the field scale [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2869-2877.
- [6] 王伟全,徐冬莹,黄青青,等. 污灌区土壤—小麦系统中重金属富集特征及其对人体健康风险评估[J]. 环境化学, 2022, **41**(10): 3231-3243.
Wang W Q, Xu D Y, Huang Q Q, *et al.* Characteristics of heavy metals in the soil-wheat system of sewage irrigation area and its health risk assessment [J]. Environmental Chemistry, 2022, **41**(10): 3231-3243.
- [7] 李艳玲,陈卫平,杨阳,等. 济源市平原区农田重金属污染特征及综合风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(6): 2229-2236.
Li Y L, Chen W P, Yang Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and comprehensive risk evaluation of farmland across the eastern plain of Jiyuan city [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(6): 2229-2236.
- [8] 孟晓飞,郭俊梅,杨俊兴,等. 石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4779-4790.
Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils and crops in Luancheng, Shijiazhuang city [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4779-4790.
- [9] 徐梦琪,杨文毅,杨利玉,等. 黔西北山区耕地重金属健康风险评估及环境基准[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3799-3810.
Xu M Q, Yang W T, Yang L Y, *et al.* Health risk assessment and environmental benchmark of heavy metals in cultivated land in mountainous area of northwest Guizhou province [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3799-3810.
- [10] Dong Y B, Lin H, Zhao Y M, *et al.* Remediation of vanadium-contaminated soils by the combination of natural clay mineral and humic acid [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123874.
- [11] He L L, Huang D Y, Zhang Q, *et al.* Meta-analysis of the effects of liming on soil pH and cadmium accumulation in crops [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **223**, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112621.
- [12] 杨金康. 不同钝化剂对石灰性潮土镉活性和小麦积累镉的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
Yang J K. Effects of different amendments on cadmium activity and cadmium accumulation in wheat in calcareous chao soil [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.
- [13] 洪鑫,李凡,雷文杰,等. 含磷材料钝化修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 广东化工, 2022, **49**(15): 148-149.
Hong X, Li F, Lei W J, *et al.* Research progress on soil heavy metal immobilization by phosphorus-bearing materials [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, **49**(15): 148-149.
- [14] 李光辉,成晴,陈宏. 石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 925-931.
Li G H, Cheng Q, Chen H. Remediation of Cd contaminated acidic rice fields using the combined application of lime and organic matter [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 925-931.
- [15] 赵永芹. 不同钝化剂对石灰性土壤重金属形态转化和植物吸收的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
Zhao Y Q. Effects of different amendments on heavy metal chemical speciations transformation and plant absorption in calcareous soil [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.
- [16] 张路,唐婵,余海英,等. 稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1698-1705.
Zhang L, Tang C, Yu H Y, *et al.* In-situ remediation effect of cadmium-polluted agriculture land using different amendments under rice-wheat rotation [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1698-1705.
- [17] 张剑,孔繁艺,卢升高. 无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4679-4686.
Zhang J, Kong F Y, Lu S G. Remediation effect and mechanism of inorganic passivators on cadmium contaminated acidic paddy soil [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4679-4686.
- [18] 杨艳征,张银鸽,李畅,等. 微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5769-5777.
Yang Y Z, Zhang Y G, Li C, *et al.* Tobacco stem biochar and phosphate application decrease wheat grain cadmium accumulation in alkaline soil [J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5769-5777.
- [19] Luo W X, Yang S N, Khan M A, *et al.* Mitigation of Cd accumulation in rice with water management and calcium-magnesium phosphate fertilizer in field environment [J].

- Environmental Geochemistry and Health, 2020, **42**(11): 3877-3886.
- [20] 任露陆, 蔡宗平, 张艳林, 等. 含磷材料对土壤重金属有效性及微生物响应[J]. 环境科学与技术, 2022, **45**(6): 37-46.
Ren L L, Cai Z P, Zhang Y L, *et al.* Effects of phosphorus-containing amendments on Cd, Cu, Pb, and Zn availability and microbial community structure in soils[J]. Environmental Science & Technology, 2022, **45**(6): 37-46.
- [21] 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 等. 冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1482-1490.
Wang Y W, Rui Y K, Li Z Y, *et al.* Characteristics of heavy metal absorption by winter wheat and its quantitative relationship with influencing factors[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- [22] Cui H B, Shi Y, Zhou J, *et al.* Effect of different grain sizes of hydroxyapatite on soil heavy metal bioavailability and microbial community composition [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, **267**: 165-173.
- [23] 上官宇先, 尹宏亮, 徐懿, 等. 不同钝化剂对水稻小麦籽粒镉吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(2): 370-379.
Shangguan Y X, Yin H L, Xu Y, *et al.* Effects of different passivators on cadmium absorption in rice and wheat grains [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(2): 370-379.
- [24] 丁爱芳, 刘存丽, 吴晓霞. 生物炭与沸石复配对碱性土壤铅镉有效性的影响[J]. 土壤通报, 2023, **54**(2): 454-461.
Ding A F, Liu C L, Wu X X. Effects of biochar and its mixture of zeolite on availability of lead and cadmium in alkaline soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, **54**(2): 454-461.
- [25] He Y B, Huang D Y, Zhu Q H, *et al.* A three-season field study on the *in-situ* remediation of Cd-contaminated paddy soil using lime, two industrial by-products, and a low-Cd-accumulation rice cultivar [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **136**: 135-141.
- [26] 刘雪梅, 屈凌霄. 土壤重金属污染钝化修复技术研究进展[J]. 应用化工, 2022, **51**(6): 1799-1803.
Liu X M, Qu L X. Research progress of passivation remediation technology for soil heavy metal pollution [J]. Applied Chemical Industry, 2022, **51**(6): 1799-1803.
- [27] 董君能, 王小兵, 汪晓丽, 等. 原位钝化对Cd污染农田棕壤的修复效果研究[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(7): 829-833.
Dong J N, Wang X B, Wang X L, *et al.* Research on remediation effects of in situ passivation for Cd contaminated brown soil [J]. Environmental Pollution and Control, 2021, **43**(7): 829-833.
- [28] El-Mageed T A, Belal E E, Rady M O A, *et al.* Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba* L.) plants: influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency [J]. Agronomy, 2021, **11**(7), doi: 10.3390/AGRONOMY11071290.
- [29] Kostic L, Nikolic N, Samardzic J, *et al.* Liming of anthropogenically acidified soil promotes phosphorus acquisition in the rhizosphere of wheat [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, **51**(3): 289-298.
- [30] Rheinheimer D S, Tiecher T, Gonzatto R, *et al.* Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol [J]. Geoderma, 2018, **313**: 7-16.
- [31] 周振, 黄丽, 黄国棣, 等. 生物炭和海泡石复配对镉和锌复合污染土壤的钝化修复[J]. 华中农业大学学报, 2023, **42**(2): 158-166.
Zhou Z, Huang L, Huang G D, *et al.* Deactivation and remediation of cadmium and zinc contaminated soil by combination of biochar and sepiolite [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, **42**(2): 158-166.
- [32] 黄凯, 孔德平, 盛建军, 等. 生物炭对矿区污染土壤理化性质及重金属形态的影响[J]. 江西农业学报, 2022, **34**(9): 73-79.
Huang K, Kong D P, Sheng J J, *et al.* Effect of biochar on physicochemical properties and heavy metal forms of contaminated soil in mining areas [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, **34**(9): 73-79.
- [33] 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 等. 钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3434-3440.
Cao K K, Li C C, Hu X Y, *et al.* Effects of the immobilization of cadmium in soil alone or combined with foliar application of selenium on cadmium accumulation in the plants of different genotypes of Tsai-tai [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3434-3440.
- [34] 苏焱, 全妍红, 宦紫嫣, 等. 磷改性生物炭对云南某铅锌矿周边农田铅锌污染土壤修复效果的影响[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(3): 593-602.
Su Y, Quan Y H, Huan Z Y, *et al.* Effect of phosphate-modified biochar on remediation of Pb- and Zn-polluted farmlands around a Pb/Zn mine in Yunnan province, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(3): 593-602.
- [35] 戴思睿, 李莲芳, 秦普韦, 等. 生物炭/石灰混施对重金属复合污染土壤的稳定化效应[J]. 中国农业气象, 2021, **42**(4): 272-286.
Dai S R, Li L F, Qin P F, *et al.* Immobilization effect of biochar and lime on arsenic, cadmium and lead in soils [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, **42**(4): 272-286.
- [36] 刘冬冬, 李素霞, 刘海霞. 酸性农田土壤镉污染修复钝化材料筛选研究[J]. 土壤通报, 2022, **53**(1): 213-220.
Liu D D, Li S X, Liu H X. Screening of passivating materials for remediation of cadmium pollution in acid farmland soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, **53**(1): 213-220.
- [37] Yin Z R, Sheng H, Xiao H C, *et al.* Inter-annual reduction in rice Cd and its eco-environmental controls in 6-year biannual mineral amendment in subtropical double-rice cropping ecosystems [J]. Environmental Pollution, 2022, **293**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118566.
- [38] Zhang H Y, Yuan X Z, Xiong T, *et al.* Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: influence factors, mechanisms and evaluation methods [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **398**, doi: 10.1016/j.cej.2020.125657.
- [39] 韩云昌, 张乃明. 施用钝化剂对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, **48**(10): 52-56.
Han Y C, Zhang N M. Research progress of applying passivating agent to remediation of heavy metal pollution in soil [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, **48**(10): 52-56.
- [40] 周春海, 张振强, 黄志红, 等. 不同钝化剂对酸性土壤中重金属的钝化修复研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, **36**(33): 71-79.
Zhou C H, Zhang Z Q, Huang Z H, *et al.* Passivation and remediation of heavy metals in acid soil with different passivators: a research progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, **36**(33): 71-79.

- [41] 邢金峰, 仓龙, 任静华. 重金属污染农田土壤化学钝化修复的稳定性研究进展[J]. 土壤, 2019, **51**(2): 224-234.
Xing J F, Cang L, Ren J H. Remediation stability of *in situ* chemical immobilization of heavy metals contaminated soil: a review[J]. Soils, 2019, **51**(2): 224-234.
- [42] 何丽霞, 张丰松, 张桂香, 等. 复配钝化剂对稻田重金属有效性及其水稻吸收的影响[J]. 环境工程学报, 2022, **16**(2): 565-575.
He L X, Zhang F S, Zhang G X, *et al.* Effects of combined passivators on the availability of heavy metals in red paddy soil and their uptake by rice [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, **16**(2): 565-575.
- [43] 董春雨, 王凯, 邓琪, 等. 钙镁磷肥可以减少复合污染农田不同品种玉米 Cd、As 吸收[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (9): 45-50.
Dong C Y, Wang K, Deng Q, *et al.* Effect of calcium-magnesium-phosphate fertilizer on Cd and As absorption of maize in compound [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, (9): 45-50.
- [44] 王振博, 刘红恩, 许嘉阳, 等. 镉胁迫下施硒对冬小麦幼苗镉吸收、抗氧化能力及植株超微结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, **29**(3): 530-543.
Wang Z B, Liu H E, Xu J Y, *et al.* Effects of selenium application on cadmium uptake, antioxidant activity, and ultrastructure of winter wheat seedlings under cadmium stress[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, **29**(3): 530-543.
- [45] 孔令璇, 郭天亮, 王琪, 等. 不同品种小麦苗期吸收和转运镉的特性[J]. 环境科学与技术, 2022, **45**(10): 36-43.
Kong L X, Guo T L, Wang Q, *et al.* Cadmium uptake and translocation characters of different wheat cultivars [J]. Environmental Science & Technology, 2022, **45**(10): 36-43.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles ; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)