

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

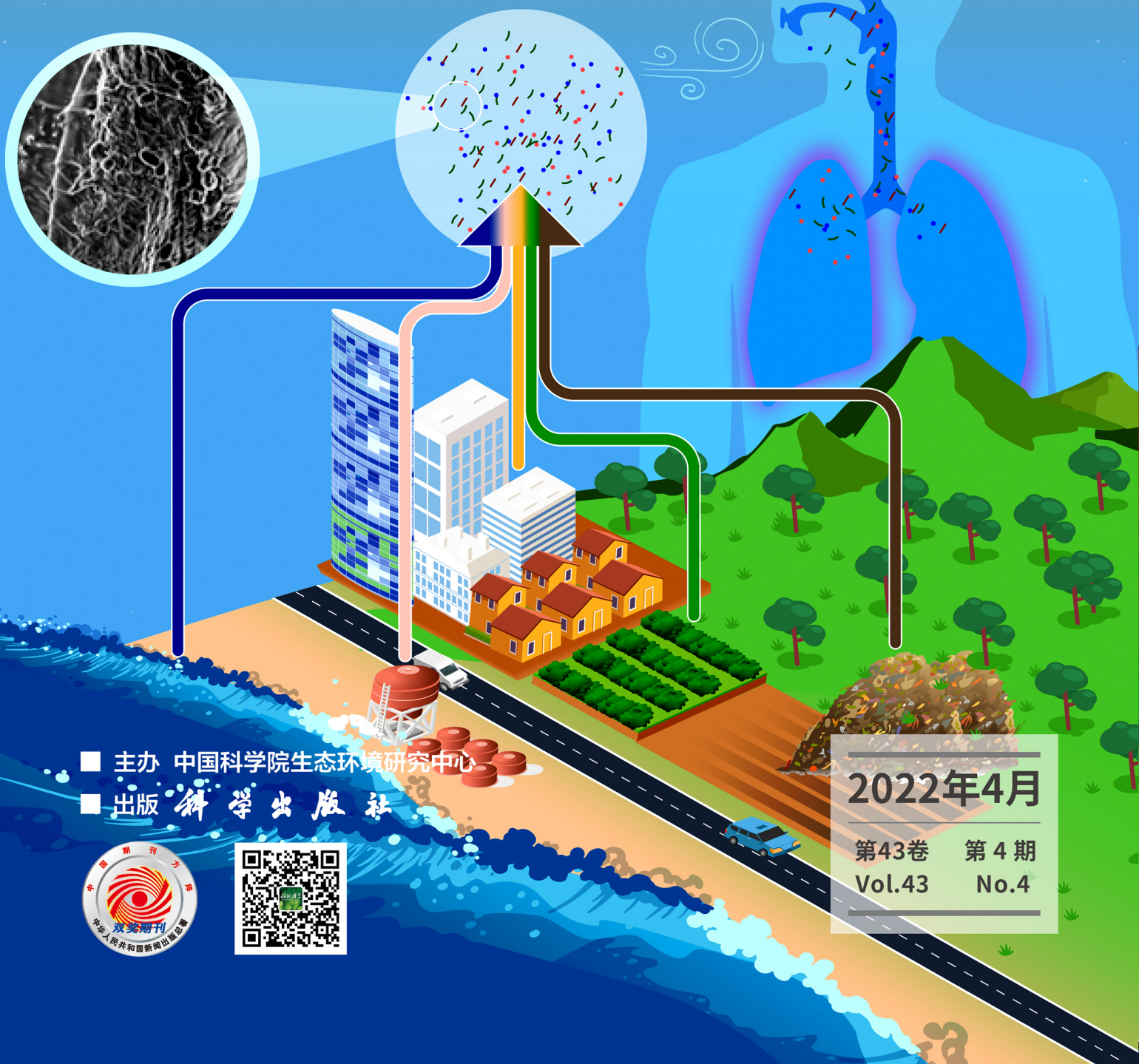
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果

任超^{1,2}, 任彧仲^{1,2}, 李竞天¹, 王浩¹, 朱利文¹, 肖建辉^{1,2}, 赵瑞¹, 杜倩倩¹

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 洛阳 471000; 2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室, 洛阳 471000)

摘要: 针对典型北方碱性镉和铅复合污染农田土壤, 开展土壤钝化与低积累农作物协同修复田间试验, 以方解石作为主量钝化材料, 分别复配少量熟石灰、沸石粉和生物炭形成组配钝化剂. 研究在 CL(方解石 + 熟石灰)、CZ(方解石 + 沸石)、CB(方解石 + 生物炭)和 CLZB(方解石 + 熟石灰 + 沸石 + 生物炭)不同组配条件下, 对土壤理化性质、重金属 Cd 和 Pb 生物有效性的影响, 以及对低积累玉米产量和植株(茎叶和籽粒)重金属 Cd 和 Pb 含量的影响. 结果表明: ①施用钝化剂均能保障玉米正常生长, 小幅提升玉米千粒重与玉米产量. ②不同方解石基组配钝化剂处理对土壤理化性质的影响具有一定的差异性, CL、CZ、CB 和 CLZB 处理对土壤 pH 分别提升 0.46、0.25、0.12 和 0.13 个单位, 对土壤肥力指标无显著相关性 ($P > 0.05$). ③不同方解石基组配钝化剂处理均能显著降低土壤 Cd 和 Pb 的 DTPA 浸提态和离子交换态含量, 其中 CLZB 处理对 DTPA 浸提态 Cd 和 Pb 含量降低率分别为 49.36% 和 72.55%, 对离子交换态 Cd 和 Pb 含量降低率分别为 55.39% 和 78.52%. ④在不同组配钝化剂处理后可使低积累玉米茎叶和籽粒 Cd 和 Pb 含量进一步降低, 其中 CLZB 处理后玉米茎叶 Cd 和 Pb 含量分别降低 45.93% 和 67.00%, 玉米籽粒 Cd 和 Pb 含量分别降低 25.17% 和 46.62%, 且 DTPA 浸提态和离子交换态 Cd 和 Pb 含量与玉米茎叶和籽粒中的 Cd 和 Pb 含量均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$). 结果表明, 在修复北方中碱性土壤镉铅复合污染农田时, 组配钝化剂与低积累作物品种联合使用能够获得较好的修复效果.

关键词: 碱性土壤; 镉和铅复合污染; 方解石基组配钝化剂; 低积累玉米; 协同修复

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2133-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106020

Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize

REN Chao^{1,2}, REN Yu-zhong^{1,2}, LI Jing-tian¹, WANG Hao¹, ZHU Li-wen¹, XIAO Jian-hui^{1,2}, ZHAO Rui¹, DU Qian-qian¹

(1. No.1 Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Henan Province, Luoyang 471000, China; 2. Key Laboratory of Au-Ag-Polymetallic Deposit Series and Deep-seated Metallogenic Prognosis of Henan Province, Luoyang 471000, China)

Abstract: In this study, a field experiment of soil passivation and low accumulation-crops was carried out for typical northern alkaline cadmium and lead compound-polluted farmland soil. Calcite was used as the main passivation material, and a small amount of slaked lime, zeolite powder, and biochar were combined to form a group passivation agent. The effects of passivators on soil physicochemical properties, bioavailability of the heavy metals Cd and Pb, and the yield and plant (stalk and seed) content of heavy metals Cd and Pb in low-accumulation maize were investigated under different grouping conditions of calcite + slaked lime (CL), calcite + zeolite (CZ), calcite + biochar (CB), and calcite + slaked lime + zeolite + biochar (CLZB). The results showed that: ① all applications of passivating agent ensured the normal growth of maize and slightly increased the 1000 grain weight and maize yield. ② The effects of different calcite-based passivators on soil physical and chemical properties were different. The CL, CZ, CB, and CLZB treatments increased soil pH by 0.46, 0.25, 0.12, and 0.13 units, respectively, but had no significant correlation with soil fertility index ($P > 0.05$). ③ DTPA leaching and ion exchange state contents of Cd and Pb in soil could be significantly reduced by different calcite-based combinations with passivators, and the reduction rates of Cd and Pb in DTPA leaching were 49.36% and 72.55%, respectively. The reduction rates of ion exchange Cd and Pb contents were 55.39% and 78.52%, respectively. ④ The contents of Cd and Pb in stems, leaves, and grains of low-accumulation maize were further reduced by different passivating agents. The contents of Cd and Pb in the stems and leaves of maize were reduced by 45.93% and 67.00% after CLZB treatment, and the contents of Cd and Pb in grains were decreased by 25.17% and 46.62%, respectively. Moreover, the contents of Cd and Pb in DTPA extraction and ion exchange states were significantly positively correlated with the contents of Cd and Pb in corn stems, leaves, and grains ($P < 0.01$). The results showed that the combined use of combination passivators and low-accumulation crop varieties can obtain better restoration effects in the remediation of cadmium and lead combined-polluted farmland in the middle alkaline soil in northern China.

Key words: alkaline soil; cadmium and lead combined pollution; calcite-based passivating agent; low-accumulation maize; collaborative repair

当前,我国耕地土壤污染形势总体不容乐观,局部问题突出,特别是重金属等污染已对部分地区农产品质量构成严重威胁.近年来,关于重金属污染农田采用石灰调节^[1]、品种调整^[2]、叶面调控^[3]、优化施肥^[4]、水分调控^[5]、原位钝化^[6]、微生物修复^[7]和植物提取^[8]等单一技术研究较多,而综合类治理技术的研究报道较少^[9].由于田间环境因素复杂多变,加之土壤污染的复杂性,单一措施往往难以保障农作物可食部位污染物含量达标,集成优化物

理-化学-生物联合技术措施,建立适合当地实际情况的农田安全利用模式已成为轻中度污染耕地安全利用与治理修复的重要课题之一.有研究表明,在农田土壤污染修复实践中组配钝化剂钝化效果明显优于单一钝化剂施用^[10,11],原位钝化+低积累作物协同修复技术明显优于单一技术措施应用^[12,13].

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-08-22

基金项目: 中央土壤污染防治专项(2110402-农村环境保护)

作者简介: 任超(1987~),男,工程师,主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: renchaodkyy@163.com

目前,“VIP+n”综合治理技术相对成熟^[14],在低镉水稻品种(V)、淹水灌溉(I)和施用石灰等调节土壤酸度(P)的基础上增施(采用)土壤调理剂、钝化剂、叶面调控剂和有机肥等降镉产品或技术(n).该技术克服了单一治理技术在污染耕地治理中存在治理效率低,且可能影响正常农作物种植和粮食生产的缺点,具有较好地应用前景,但该技术主要适用于南方酸性Cd污染稻田,针对碱性土壤重金属污染农田修复的“北方模式”尚未建立,关于方解石基组配钝化剂的田间试验研究在国内外未见报道.本文以河南栾川石宝沟金属矿区Cd和Pb复合污染土壤作为研究对象,以本课题组前期开展的钝化剂实验室筛选和低积累玉米田间筛选试验成果为基础,选取了方解石作为基础钝化材料,配施少量熟石灰、沸石和生物炭,探讨不同材料配施对田间土

壤Cd和Pb生物活性的影响,通过方解石基复配改良剂与低积累农作物协同修复技术,以期为北方中碱性土壤重金属复合污染农田修复研究提供科学依据,以达到污染农田安全利用的目的.

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

本试验田位于河南省洛阳市栾川县石宝沟SBG-17号污染农田,共划分为4个试验区,各试验区按照梅花五点法采集0~20 cm混合土壤样,土壤类型为褐土,质地为砂质黏壤土.由于本研究为田间试验条件,T1~T4区之间存在土壤理化性质和Cd、Pb污染程度的不同,各试验区供试土壤理化性质及重金属含量见表1.

表1 各试验区供试土壤理化性质及重金属含量¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties and heavy metal contents of soil in each test area

试验区	pH	CEC	ω(OM)	ω(N)	ω(K)	ω(P)	ω(碱解氮)	ω(有效磷)	ω(速效钾)	ω(全Cd)	ω(全Pb)	ω(有效镉)	ω(有效铅)
T1	7.89	14.55	20.59	1.13	25.25	1.44	80.22	20.86	114.20	1.19	220	0.48	33.02
T2	8.11	17.62	19.54	0.75	22.32	1.20	66.85	29.98	107.50	0.88	174	0.32	30.05
T3	8.19	13.06	14.87	0.77	22.81	1.44	66.85	21.36	81.06	1.63	235	0.47	33.50
T4	8.29	13.55	17.16	0.77	17.39	1.61	40.11	29.72	92.36	3.03	897	0.83	144.50

1)单位说明:pH为无量纲,CEC为 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,OM、N、K和P为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮、有效磷、速效钾、全Cd、全Pb、有效镉和有效铅为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

1.1.2 供试钝化剂

供试钝化剂材料为方解石、熟石灰、沸石和生物炭.其中方解石购自河南省南阳市宇星世纪矿业开发有限责任公司,粒度300目,价格220元 $\cdot\text{t}^{-1}$;熟石灰购自河南省新乡市大新环保科技有限公司,粒度

300目,价格800元 $\cdot\text{t}^{-1}$;沸石购自河南省信阳市平桥区军创珍珠岩厂,粒度200目,价格385元 $\cdot\text{t}^{-1}$;生物炭购自湖北金日生态能源股份有限公司,粒度200目,价格2200元 $\cdot\text{t}^{-1}$.供试钝化剂重金属含量见表2,方解石和沸石的X射线衍射结果见图1.

表2 供试钝化剂重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Heavy metal content of passivator/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

钝化剂名称	ω(Cd)	ω(Hg)	ω(As)	ω(Pb)	ω(Cr)	ω(Cu)	ω(Ni)	ω(Zn)
方解石	0.17	0.013	0.71	5.86	7.20	3.92	10.20	22.98
熟石灰	0.10	0.025	1.13	4.78	8.86	5.13	11.56	12.47
沸石	0.18	0.011	0.66	42.22	12.86	5.86	5.17	68.28
生物炭	0.27	0.0072	0.54	42.12	14.89	28.77	9.46	98.65

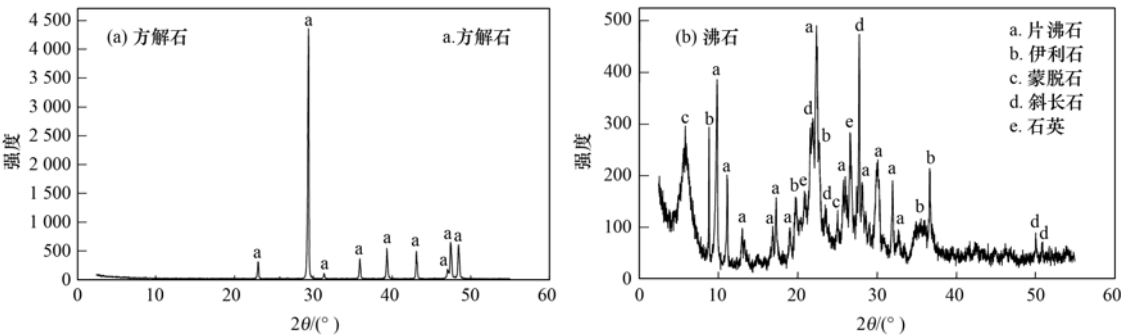


图1 方解石和沸石 XRD 衍射结果

Fig. 1 XRD diffraction results of calcite and zeolite

1.1.3 供试玉米品种

2019 年研究区进行了低积累玉米品种田间筛选试验,筛选出先玉 335 为 Cd 和 Pb 复合低积累玉米品种,为进一步验证土壤原位钝化与低积累农作物的协同修复效果,本试验供试玉米品种确定为先玉 335.

1.2 试验设计

本试验田共划分为 4 个试验区,分别为 T1、T2、T3 和 T4 区,每个试验区设置 1 个未施用钝化剂处理(CK)、1 组钝化剂处理(3 次重复),共计 16 个试验单元,相邻之间采用 1.2 m 田埂相隔. 4 种钝化剂处理分别为:方解石 + 熟石灰(CL)、方解石 + 沸石(CZ)、方解石 + 生物炭(CB)和方解石 + 熟石

灰 + 沸石 + 生物炭(CLZB),组配钝化剂按 0.8% (占土壤 0~20 cm 耕作层质量分数)施用量添加,各组配钝化剂施用量见表 3. 组配钝化剂采用搅拌机混匀后装袋,运至田间后均匀撒施在各试验单元土壤表面,同时施用商品有机肥(羊粪制作) 375 t·km⁻²(约 250 kg·亩⁻¹),利用旋耕设备翻耕 3 次以上,将钝化材料与 0~20 cm 耕层土壤充分混匀. 种植玉米品种为先玉 335,播种前施用 75 t·km⁻²(约 50 kg·亩⁻¹)磷酸二铵作为基肥,播种行距 40 cm,株距 30 cm,于大喇叭口期追施 45 t·km⁻²(约 30 kg·亩⁻¹)磷酸二铵和 30 t·km⁻²(约 20 kg·亩⁻¹)尿素. 各试验小区田间管理与当地农户的种植习惯保持一致.

表 3 方解石基组配钝化剂施用量
Table 3 Dosage of calcite-based passivating agent

试验区	试验单元	试验处理	钝化剂施用量(1 hm ² = 15 亩)
T1	T ₁₋₁	未施用钝化剂(CK)	
	T ₁₋₂ 、T ₁₋₃ 和 T ₁₋₄	方解石 + 熟石灰(CL)	1 500 kg·亩 ⁻¹ 方解石 + 150 kg·亩 ⁻¹ 熟石灰
T2	T ₂₋₁	未施用钝化剂(CK)	
	T ₂₋₂ 、T ₂₋₃ 和 T ₂₋₄	方解石 + 沸石(CZ)	1 500 kg·亩 ⁻¹ 方解石 + 150 kg·亩 ⁻¹ 沸石
T3	T ₃₋₁	未施用钝化剂(CK)	
	T ₃₋₂ 、T ₃₋₃ 和 T ₃₋₄	方解石 + 生物炭(CB)	1 500 kg·亩 ⁻¹ 方解石 + 150 kg·亩 ⁻¹ 生物炭
T4	T ₄₋₁	未施用钝化剂(CK)	
	T ₄₋₂ 、T ₄₋₃ 和 T ₄₋₄	方解石 + 熟石灰 + 沸石 + 生物炭(CLZB)	1 500 kg·亩 ⁻¹ 方解石 + 100 kg·亩 ⁻¹ 熟石灰 + 100 kg·亩 ⁻¹ 沸石 + 50 kg·亩 ⁻¹ 生物炭

1.3 样品采集与处理

2020 年 10 月协同采集土壤样品和成熟期玉米植株样品. 各试验单元分别按照梅花 5 点法各采集 1 组表层(0~20 cm)混合土壤样品,共计土壤样品 16 组. 土壤样品经自然风干、粗磨(过 2 mm 尼龙筛)、细磨(过 1 mm 和 0.15 mm 尼龙筛)后备用. 各试验单元协同采集玉米茎叶、籽粒各 1 组,共计玉米茎叶样品 16 组,玉米籽粒样品 16 组. 玉米植株样品经去离子水清洗、自然晾干,磨碎至过 0.25~0.4 mm 尼龙筛,混匀后备用.

1.4 测定项目与方法

土壤基本理化性质:pH 采用玻璃电极法,机械组成采用密度计法,有机质采用重铬酸钾容量法,阳离子交换量采用氯化铵-乙酸铵交换法,全氮采用凯氏定氮法,全磷、全钾采用四酸消解-电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES),碱解氮采用碱解-扩散法,有效磷采用碳酸氢钠浸提-电感耦合等离子体发射光谱法,速效钾采用乙酸铵浸提-电感耦合等离子体发射光谱法. 土壤全镉、全铅含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),土壤 Cd、Pb 有效态含量采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)浸提-电感耦合等离子体发射光谱法^[15],Cd、Pb 离子交换态含量采

用 Tessier 修正顺序七步提取-电感耦合等离子体质谱法^[16,17],钝化剂中矿物成分采用 XRD 衍射仪(X, Pert Pro)测定.

1.5 数据统计分析

试验检测数据采用 Excel 2019、Origin 2018 和 SPSS 26 分析软件对不同钝化剂的处理效果进行数据整理、统计分析和绘图分析.

采用降低率(K)判定钝化材料对重金属的稳定效果^[18],采用富集系数(BCF)判定农作物对重金属的积累程度^[19].

降低率 $K(\%) = 1 - (C_e/C_i)$

式中, C_e 为污染土壤钝化平衡后某种金属元素提取态含量; C_i 为污染土壤钝化前某种金属元素提取态含量.

富集系数 $BCF = C_{\text{plant}}/C_{\text{soil}}$

式中, C_{plant} 为某种金属元素在植株某部分的含量; C_{soil} 为某种金属元素在植物土壤中的含量.

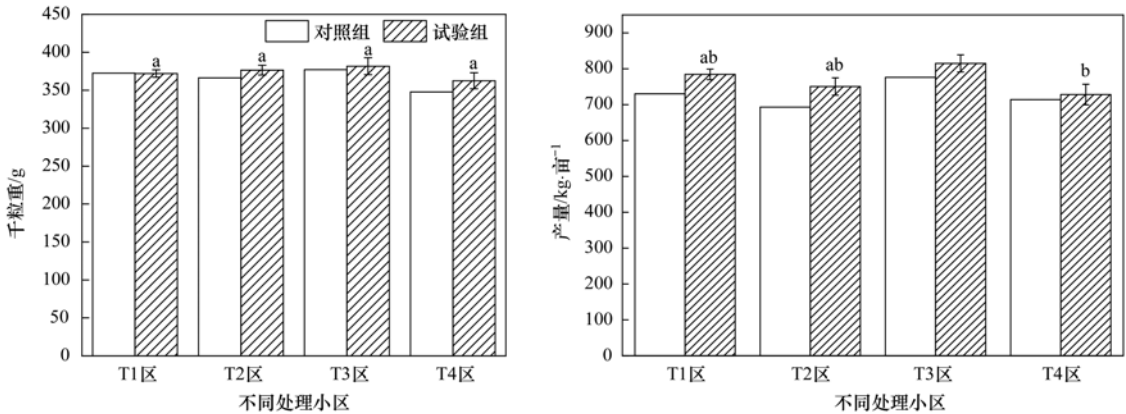
2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米产量的影响

由图 2 可知,T1 区对照组和试验组玉米千粒重分别为 372 g 和 372 g,产量分别为 730 kg·亩⁻¹和

784 kg·亩⁻¹; T2 区对照组和试验组玉米千粒重分别为 366 g 和 377 g,产量分别为 693 kg·亩⁻¹和 750 kg·亩⁻¹; T3 区对照组和试验组玉米千粒重分别为 377 g 和 382 g,产量分别为 776 kg·亩⁻¹和 815

kg·亩⁻¹; T4 区对照组和试验组玉米千粒重分别为 348 g 和 362 g,产量分别为 714 kg·亩⁻¹和 728 kg·亩⁻¹; 不同方解石基组配钝化剂处理与对照组相比,均能小幅提升玉米千粒重和亩产.



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

图 2 不同处理条件下玉米千粒重和产量对比

Fig. 2 Comparison of 1000-grain weight and yield of maize under different treatment conditions

2.2 不同处理对土壤理化性质的影响

由表 4 可知,不同组配钝化剂处理对土壤 pH 具有一定的提升作用,T1 ~ T4 区 pH 分别提升 0.46、0.25、0.12 和 0.13 个单位,不同组配处理对土壤 pH 值提升排序为:CL > CZ > CLZB ≈ CB. 根据前期小试阶段单一钝化剂对土壤 pH 的提升幅度排序为:熟石灰 > 沸石 > 生物炭 > 方解石,本研究以 90% 方解石添加量为基础的组配钝化剂整体对土壤 pH 值的影响较小,提升幅度均低于 0.5 个单位. 4

种方解石基组配钝化剂对土壤 pH 提升幅度略微差异主要取决于复配材料熟石灰、沸石和生物炭对土壤 pH 值的影响. 不同方解石基组配钝化剂处理与田间土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量的影响无明显规律,且与对照组相比无统计学意义,相关性不显著 ($P > 0.05$). 表明以方解石为基础的组配钝化剂不会对土壤肥力指标造成影响,这与不同处理试验区玉米产量无显著变化的结果相对应.

表 4 不同处理条件下土壤 pH 和肥力指标的变化¹⁾

Table 4 Changes in soil pH and fertility under different treatment conditions

试验区	施用方式	处理方式; 玉米品种	pH	ω(OM)	ω(N)	ω(P)	ω(K)	ω(碱解氮)	ω(有效磷)	ω(速效钾)
T1	方解石 + 熟石灰	CK; 先玉 335	7.89	20.59	1.13	1.44	25.25	80.22	20.86	114.20
		CL; 先玉 335	8.35	18.83	0.95	1.12	28.15	63.73	24.89	110.47
T2	方解石 + 沸石	CK; 先玉 335	8.11	19.54	0.75	1.20	22.32	66.85	29.98	107.50
		CZ; 先玉 335	8.36	15.78	0.84	1.28	23.40	61.95	19.37	126.97
T3	方解石 + 生物炭	CK; 先玉 335	8.19	14.87	0.77	1.44	22.81	66.85	21.36	81.06
		CB; 先玉 335	8.31	18.42	0.86	1.22	25.48	55.71	28.16	102.23
T4	方解石 + 熟石灰 + 沸石 + 生物炭	CK; 先玉 335	8.29	17.16	0.77	1.61	17.38	40.11	29.72	92.36
		CLZB; 先玉 335	8.42	17.27	0.80	1.60	22.93	51.25	26.12	85.67

1) 单位说明: pH 为无量纲, OM、N、K 和 P 为 g·kg⁻¹, 碱解氮、有效磷和速效钾为 mg·kg⁻¹

2.3 不同处理对土壤中 Cd 和 Pb 生物有效性的影响

2.3.1 不同处理对土壤中 DTPA 浸提态 Cd 和 Pb 含量的影响

由图 3 可知,T1 ~ T4 区对照组和试验组土壤有效态 ω(Cd) 分别为 0.318 ~ 0.835 mg·kg⁻¹ 和 0.284 ~ 0.423 mg·kg⁻¹,不同组配处理土壤重金属 Cd 降低率排序均为:CLZB(49.36%) > CL(38.25%) > CB(14.44%) > CZ(10.69%). T1 ~ T4 区对照组和试验组土壤有效态 ω(Pb) 分别为 30.05 ~ 144.50 mg·kg⁻¹

和 20.26 ~ 39.66 mg·kg⁻¹,不同组配处理土壤重金属 Pb 降低率排序均为:CLZB(72.55%) > CL(38.65%) > CB(25.84%) > CZ(22.87%).

2.3.2 不同处理对土壤中离子交换态 Cd 和 Pb 含量的影响

由图 4 可知,T1 ~ T4 区对照组和试验组土壤离子交换态 ω(Cd) 分别为 0.164 ~ 0.536 mg·kg⁻¹ 和 0.161 ~ 0.253 mg·kg⁻¹,不同组配处理土壤重金属 Cd 降低率排序均为:CLZB(55.39%) > CL

(36.61%) > CB(12.33%) > CZ(2.16%)。T1 ~ T4 区对照组和试验组土壤离子交换态 $\omega(\text{Pb})$ 分别为 0.090 ~ 0.506 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.056 ~ 0.109 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

不同组配处理土壤重金属 Pb 降低率排序均为: CLZB(78.52%) > CL(37.28%) > CZ(26.52%) $\approx$ CB(26.01%)。

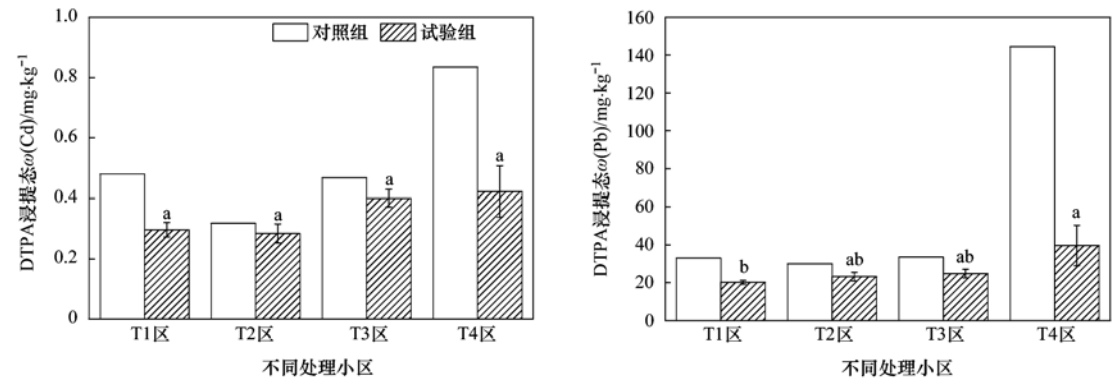


图3 不同处理条件下土壤 Cd 和 Pb 有效态含量降低效果对比

Fig. 3 Comparison of effective content reduction effects of soil Cd and Pb under different treatment conditions

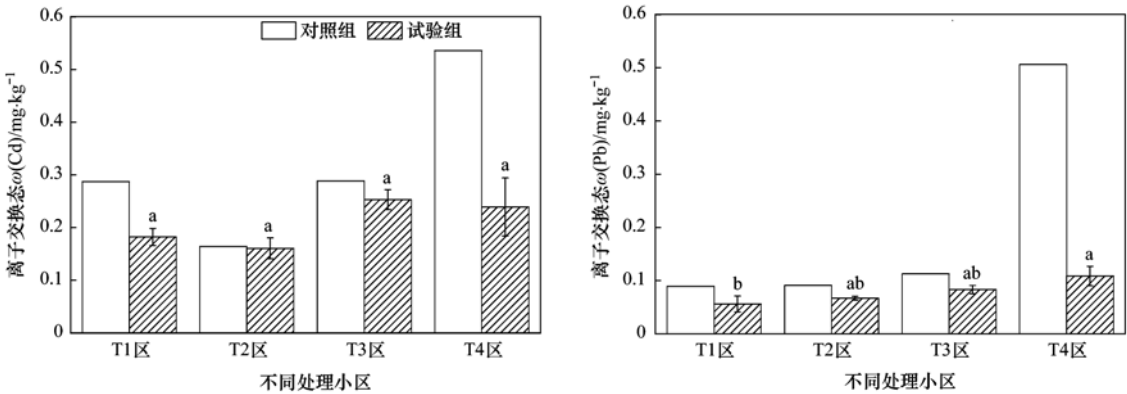


图4 不同处理条件下土壤 Cd 和 Pb 离子交换态含量降低效果对比

Fig. 4 Comparison of the effect of reducing the contents of Cd and Pb ion exchange states in soil under different treatment conditions

2.4 不同处理对玉米植株吸收 Cd 和 Pb 的影响

2.4.1 不同处理对玉米茎叶吸收 Cd 和 Pb 的影响

由图 5 可知,T1 ~ T4 区对照组和试验组低积累玉米茎叶 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 0.450 ~ 0.955 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.385 ~ 0.640 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,茎叶 Cd 富集系数分别为 0.315 ~ 0.531 和 0.375 ~ 0.501,不同组配处理对低积累玉米茎叶 Cd 含量降低率排序为: CLZB

(45.93%) > CB(25.99%) > CL(22.94%) > CZ(14.38%)。T1 ~ T4 区对照组和试验组低积累玉米茎叶 $\omega(\text{Pb})$ 为 3.194 ~ 11.010 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 3.062 ~ 3.852 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,茎叶 Pb 富集系数分别为 0.012 ~ 0.022 和 0.013 ~ 0.021,不同组配处理对低积累玉米 Pb 含量降低率排序为: CLZB(67.00%) > CL(22.17%) > CB(4.12%) > CZ(0.56%)。

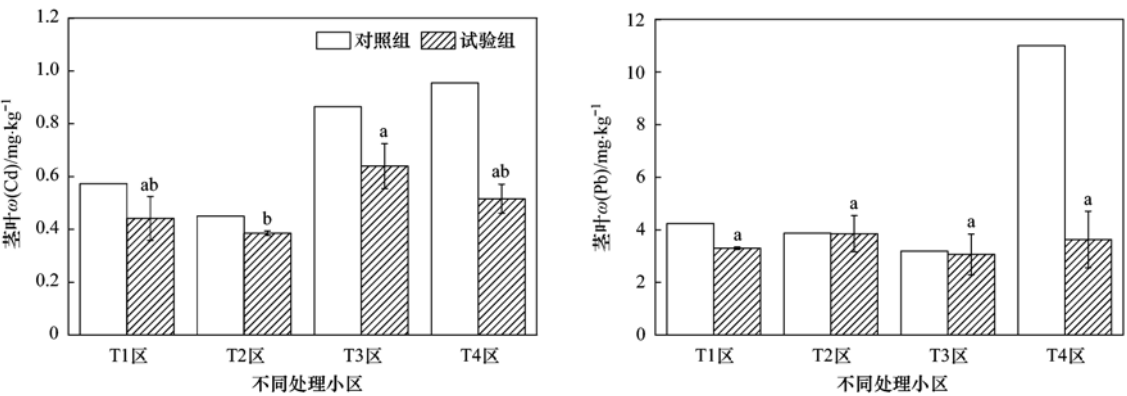


图5 不同处理条件下玉米茎叶 Cd 和 Pb 含量对比

Fig. 5 Comparison of Cd and Pb contents in corn stems and leaves under different treatment conditions

2.4.2 不同处理对玉米籽粒吸收 Cd 和 Pb 的影响

由图 6 可知, T1 ~ T4 区对照组和试验组低积累玉米籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 $0.0099 \sim 0.0149 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.0087 \sim 0.0122 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 籽粒 Cd 富集系数分别为 $0.005 \sim 0.011$ 和 $0.008 \sim 0.010$, 不同组配处理对低积累玉米籽粒 Cd 含量降低率排序为: CLZB (25.17%) > CL (22.69%) > CB (18.12%) > CZ (12.12%). T1 ~ T4 区对照组和试验组低积累玉米籽粒 $\omega(\text{Pb})$ 分别

为 $0.0081 \sim 0.0414 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.0066 \sim 0.0221 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 籽粒 Pb 富集系数分别为 $0.00004 \sim 0.00007$ 和 $0.00004 \sim 0.00007$, 不同组配处理对低积累玉米籽粒 Pb 含量降低率排序为: CLZB (46.62%) > CB (32.53%) > CL (18.52%) > CZ (0%). 不同组配钝化剂处理条件下使玉米籽粒吸收 Cd 和 Pb 含量进一步降低, 表明方解石基组配钝化剂处理有效地降低了土壤中重金属 Cd 和 Pb 的迁移和转运。

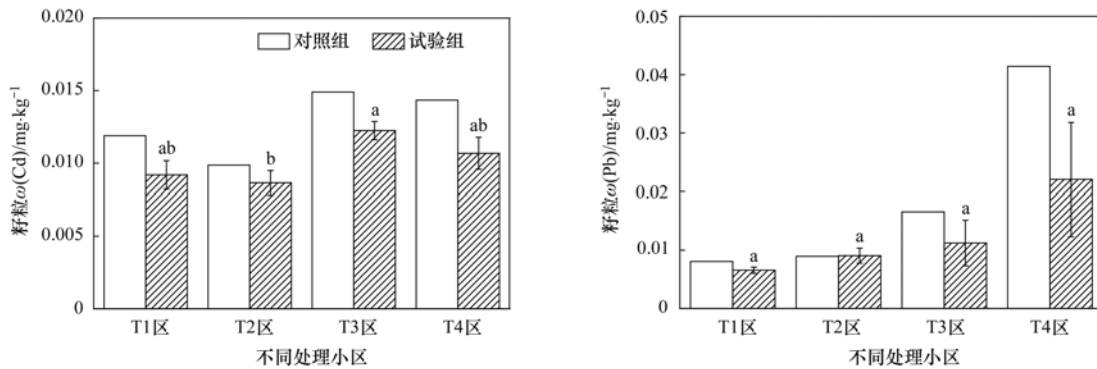


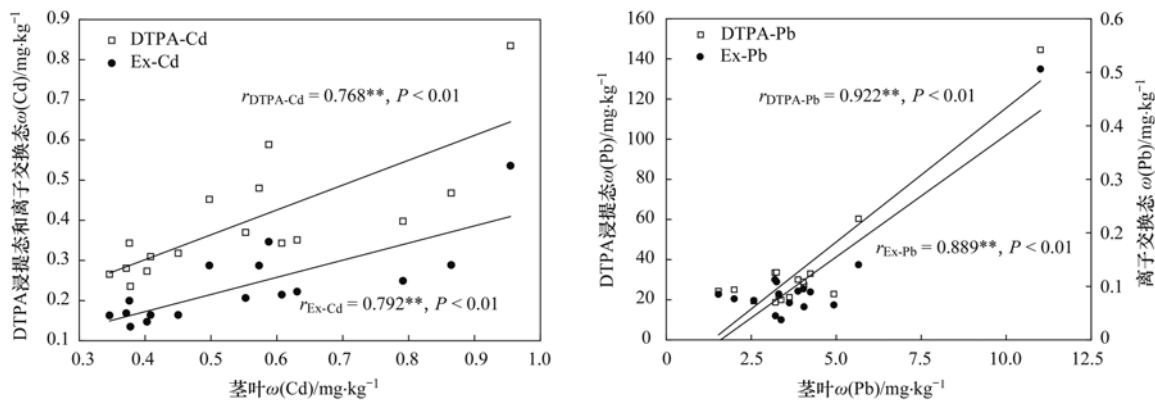
图 6 不同处理条件下玉米籽粒 Cd 和 Pb 含量对比

Fig. 6 Comparison of Cd and Pb contents in corn grains under different treatment conditions

2.4.3 玉米植株 Cd 和 Pb 含量与土壤 2 种提取态含量的关系

为进一步研究施用方解石基组配钝化剂后土壤中 Cd 和 Pb 各提取态含量对玉米植株 Cd 和 Pb 含量的影响, 分别将玉米茎叶和籽粒 Cd 和 Pb 含量与土壤中 Cd 和 Pb 的浸提态 (DTPA) 和离子交换态 (Ex) 进行相关性分析. 由图 7 可知, 土壤中 Cd 的 2 种提取态含量与玉米茎叶中的 Cd 含量均呈现出极显著的正相关关系 ($r_{\text{DTPA-Cd}} = 0.768^{**}$ 、 $r_{\text{Ex-Cd}} =$

0.792^{**}), 土壤中 Pb 的 2 种提取态含量与玉米茎叶中的 Pb 含量均呈现出极显著的正相关关系 ($r_{\text{DTPA-Pb}} = 0.922^{**}$ 、 $r_{\text{Ex-Pb}} = 0.889^{**}$). 由图 8 可知, 土壤中 Cd 的 2 种提取态含量与玉米籽粒中的 Cd 含量均呈现出极显著的正相关关系 ($r_{\text{DTPA-Cd}} = 0.730^{**}$ 、 $r_{\text{Ex-Cd}} = 0.751^{**}$), 土壤中 Pb 的 2 种提取态含量与玉米籽粒中的 Pb 含量均呈现出极显著的正相关关系 ($r_{\text{DTPA-Pb}} = 0.838^{**}$ 、 $r_{\text{Ex-Pb}} = 0.767^{**}$), 这与已有的研究结果一致^[20].



** 表示在 0.01 水平上极显著相关 ($P < 0.01$), 下同

图 7 玉米茎叶 Cd 和 Pb 含量与土壤中 2 种提取态含量的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient of Cd and Pb contents in maize stems and leaves with the contents of two extracted states in soil

3 讨论

有研究表明石灰、碳酸钙、黏土矿物和生物炭等相互组配钝化效果均优于单一钝化剂^[21~25]. 本课

题组前期开展了方解石、熟石灰、沸石和生物炭等钝化剂实验室筛选, 发现各钝化剂对碱性土壤 Cd 和 Pb 均有一定的钝化效果, 但其作用机制不尽相同^[26], 故选择了钝化效果稳定且对弱碱性土壤 pH

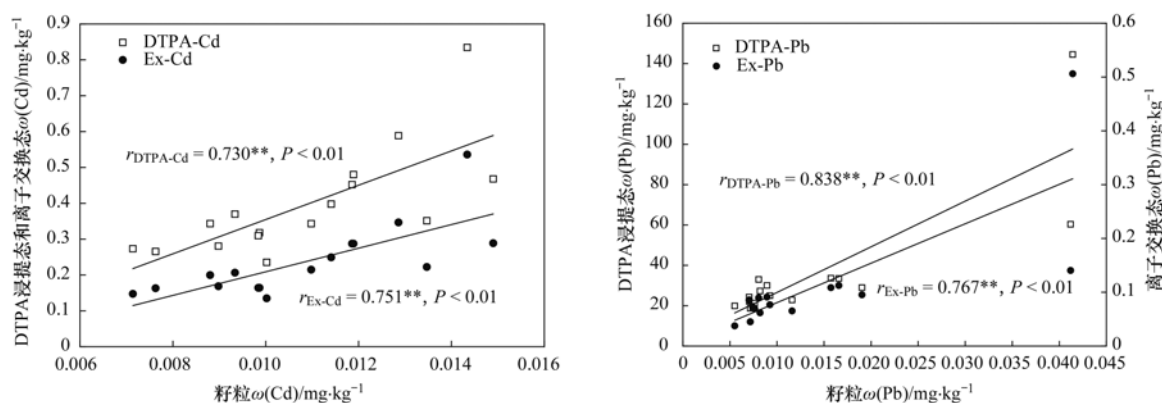


图8 玉米籽粒 Cd 和 Pb 含量与土壤中 2 种提取态含量的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient of Cd and Pb contents in maize grains and contents of two extractive states in soil

值影响较小的方解石作为主量钝化材料,复配少量熟石灰、沸石和生物炭,形成不同的方解石基组配钝化剂,充分发挥各钝化材料之间的交互作用.田间试验表明,4种方解石基组配钝化剂对土壤 pH 影响不大,但钝化效率效果明显.其中 CBZL 组配钝化剂对 pH 基本无影响(略微提升 0.13 个单位),土壤 Cd 的 DTPA 浸提态和离子交换态降低率可达 49.36% 和 55.39%,Pb 的 DTPA 浸提态和离子交换态降低率可达 72.55% 和 78.52%,这与以往通过提升土壤 pH 值以获得更高钝化效率的研究截然不同^[27].

方解石为碳酸盐矿物,结构稳定且成分单一,纯度可达 99%,施入土壤中不会引入杂质离子,主要通过表面吸附和溶解沉淀^[28]与同晶类质替代作用^[29]实现稳定钝化,对土壤 pH 值的影响较小,作为组配主基物料优势明显.熟石灰为碱性物质,主要通过提升土壤 pH 值增加胶体表面负电荷形成难溶性沉淀而降低重金属活性^[30],具有快速明显地钝化效果,但石灰具有持效性较短的缺点^[31],大量或长期施用石灰会引起土壤 pH 值提升过高,给土壤结构和养分状况带来不利影响,在北方中性和碱性土壤条件下以少量添加为宜.沸石为碱性多孔硅酸盐矿物,比表面积和孔隙大、阳离子交换量大,对土壤具有一定的保水保肥作用,通过离子交换、络合吸附和碱化沉淀等作用抑制重金属在土壤中的迁移和降低有效性^[32],但专性吸附位点易被吸附也易被交换,存在钝化不稳定现象.生物炭通过静电吸附、离子交换、官能团络合和沉淀等作用机制来直接吸附固定土壤重金属,同时还可以通过间接影响土壤理化性质(pH、OM 和 Eh 等),从而影响土壤中重金属形态^[33],但生物炭经济成本高,是方解石价格的数倍以上,考虑到大田修复投入品的经济性,生物炭与硅酸盐、磷酸盐和碳酸盐等天然非金属矿物材料配施可取得更高的综合效益.

本研究供试玉米为本课题组于 2019 年田间小区试验筛选出的 Cd 和 Pb 复合低积累玉米品种先玉 335,其基因型对重金属 Cd 和 Pb 具有良好的抗性和避性.本次田间试验先玉 335 在未施用钝化剂处理的污染土壤条件下,玉米籽粒 Cd 和 Pb 的含量与富集系数均维持在较低水平,表现出该品种 Cd 和 Pb 低积累在田间的稳定性,这与该品种以往田间试验的研究结果一致^[34].由于大田土壤重金属污染程度因土壤环境的差异,存在一定的不均一性和复杂性.本研究 T4 试验区土壤污染物 Cd 和 Pb 含量要高于 T1 ~ T3 试验区,而 T4 区在 CLZB 方解石基组配钝化剂处理下对 Cd 和 Pb 的钝化效率最大,以及对玉米茎叶和籽粒吸收 Cd 和 Pb 含量的降低率也最大,说明方解石基钝化材料在土壤重金属 Cd 和 Pb 含量相对较高的条件下表现出了较好的钝化效果.故针对轻度重金属污染农田可通过不同类型的低积累作物品种即可实现安全生产,而对于中重度重金属污染农田,宜采用“土壤钝化 + 低积累作物”协同修复的方式,通过“降活性 + 低吸收”双重机制实现安全生产.

4 结论

(1) 不同组配钝化剂处理对土壤理化性质的影响具有一定的差异性,CL、CZ、CB 和 CLZB 处理对土壤 pH 分别提升 0.46、0.25、0.12 和 0.13 个单位,总体来看,以方解石为主量钝化材料的组配钝化剂对 pH 的提升较小.不同处理对田间土壤养分指标的影响不显著($P > 0.05$).

(2) 不同方解石基组配钝化剂处理均能显著降低土壤中 DTPA 浸提态和离子交换态 Cd 和 Pb 含量,且降低率排序为:CLZB > CL > CB > CZ,其中 CLZB 处理对 DTPA 浸提态 Cd 和 Pb 降低率为 49.36% 和 72.55%,对离子交换态 Cd 和 Pb 降低率为 55.39% 和 78.52%,方解石基组配钝化剂在田间

试验条件下表现出高效的钝化效率。

(3) 玉米茎叶和籽粒 Cd 和 Pb 含量与土壤中 Cd 和 Pb 的浸提态(DTPA)和离子交换态(E_x)均呈现极显著正相关关系($P < 0.01$),方解石基组配钝化剂可有效抑制土壤中 Cd 和 Pb 的生物活性和迁移性,其中 CLZB 处理后降低效果最好,玉米茎叶 Cd 和 Pb 含量降低率为 45.93% 和 67.00%,玉米籽粒 Cd 和 Pb 含量降低率为 25.17% 和 46.62%,且 Cd 和 Pb 复合低积累玉米品种先玉 335 在重金属污染农田中表现出稳定的低积累特性。

(4) 本研究为田间试验,在小区之间存在土壤理化性质及 Cd 和 Pb 污染程度的差异,但不同方解石基组配钝化剂均表现出良好的钝化效果,初步验证了“方解石基组配钝化剂 + 低积累玉米品种”协同修复技术模式具有高效、稳定和经济的优点,对中碱性土壤重金属污染农田修复“北方模式”的建立具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 冉洪珍, 郭朝晖, 肖细元, 等. 改良剂连续施用对农田水稻 Cd 吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(3): 1117-1123.
Ran H Z, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Effects of continuous application of soil amendments on cadmium availability in paddy soil and uptake by rice [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(3): 1117-1123.
- [2] 陈洁, 王娟, 王恰雯, 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.
- [3] 章明奎, 倪中应, 沈倩. 农作物重金属污染的生理阻控研究进展[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(1): 96-101.
Zhang M K, Ni Z Y, Shen Q. Research progress on physiological control of heavy metal pollution in crops [J]. Environmental Pollution and Control, 2017, **39**(1): 96-101.
- [4] 徐明岗, 曾希伯, 周世伟, 等. 施肥与土壤重金属污染修复[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 等. 典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2512-2521.
Zhang Y T, Tian Y B, Huang D Y, *et al.* Effects of water management on cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) growing in typical paddy soil [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2512-2521.
- [6] 吴霄霄, 曹榕彬, 米长虹, 等. 重金属污染农田原位钝化修复材料研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, **36**(3): 253-263.
Wu X X, Cao R B, Mi C H, *et al.* Research progress of in-situ passivated remedial materials for heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, **36**(3): 253-263.
- [7] 黄刘辉, 胡辉美, 郑永昕, 等. 动植物源活化剂及微生物强化植物修复进展[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(8): 73-82.
Huang L H, Hu H M, Zheng Y X, *et al.* Progress on the phytoremediation enhanced by activators of plant and animal origin with microorganisms [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(8): 73-82.
- [8] 史广宇, 余志强, 施维林. 植物修复土壤重金属污染中外源物质的影响机制和应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(3): 655-666.
Shi G Y, Yu Z Q, Shi W L. Research progress on mechanism and application of exogenous substances in phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(3): 655-666.
- [9] 曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(9): 1900-1906.
Zeng X D, Wang X Q, Tu X H, *et al.* Research progress on speciation and physiological control of heavy metal in soil-plant system [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(9): 1900-1906.
- [10] 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1491-1497.
Yan D M, Guo Z H, Huang F L, *et al.* Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1491-1497.
- [11] 陈立伟, 杨文毅, 辜娇峰, 等. 复合改良剂对 Cd 污染稻田早晚稻产地修复效果[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2549-2552.
Chen L W, Yang W T, Gu J F, *et al.* Remedying effects of a combined amendment for paddy soil polluted with Cd for spring and autumn rice [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2549-2552.
- [12] 崔俊义, 马友华, 陈亮妹, 等. 原位钝化-低积累品种联合修复镉污染农田研究[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(7): 77-83.
Cui J Y, Ma Y H, Chen L M, *et al.* Study on phytoremediation of cadmium contaminated farmland by in-situ inactivation and plant inhibition [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(7): 77-83.
- [13] 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 等. 低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4348-4358.
Xie X M, Fang Z P, Liao M, *et al.* Potential to ensure safe production from rice fields polluted with heavy cadmium by combining a rice variety with low cadmium accumulation, humic acid, and sepiolite [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4348-4358.
- [14] 唐熙雯, 周旋, 黄凤球, 等. 不同污染程度耕地下稻米镉综合治理效果研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(10): 1339-1346.
Tang X W, Zhou X, Huang F Q, *et al.* Study on the Effect of comprehensive treatment technology on rice cadmium content under different Cd polluted cultivated land [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, **36**(10): 1339-1346.
- [15] HJ 804-2016, 土壤 8 种有效态元素的测定 二乙三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法[S].
HJ 804-2016, Soil-determination of bioavailable form of eight elements-extraction with buffered DTPA solution/inductively coupled plasma optical emission spectrometry[S].
- [16] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [17] 安子怡. 土壤与沉积物中重金属元素顺序提取方法的可靠性研究及其地球化学意义探讨[D]. 北京: 中国地质科学院,

- 2009, 22-27.
- An Z Y. Reliability assessment and geochemical significance of heavy metal sequential extraction in soils and sediments [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2009. 22-27.
- [18] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 309-313.
- Wu L S, Zeng D M, Mo X R, *et al.* Immobilization impact of different fixatives on heavy metals contaminated soil [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 309-313.
- [19] 封文利, 郭朝晖, 史磊, 等. 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 399-405.
- Feng W L, Guo Z H, Shi L, *et al.* Distribution and accumulation of cadmium in paddy soil and rice affected by pollutant sources control and improvement measures [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 399-405.
- [20] 杨文弢, 周航, 邓贵友, 等. 组配改良剂对污染稻田中铅、镉和砷生物有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 257-263.
- Yang W T, Zhou H, Deng G Y, *et al.* Effects of combined amendment on bioavailability of Pb, Cd, and As in polluted paddy soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(1): 257-263.
- [21] 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.
- [22] 吴玉俊, 周航, 杨文弢, 等. 组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2791-2798.
- Wu Y J, Zhou H, Yang W T, *et al.* Comparison of the persistence of a combined amendment stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in polluted paddy soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2791-2798.
- [23] 朱维, 周航, 吴玉俊, 等. 组配改良剂对稻田土壤中镉铅形态及糙米中镉铅累积的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3688-3694.
- Zhu W, Zhou H, Wu Y J, *et al.* Effects of combined amendment on forms of cadmium/lead in paddy soil and accumulation of cadmium/lead in brown rice [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3688-3694.
- [24] 陈立伟, 杨文弢, 周航, 等. 土壤调理剂对土壤-水稻系统 Cd、Zn 迁移累积的影响及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1635-1641.
- Chen L W, Yang W T, Zhou H, *et al.* Effects of combined amendment on transport and accumulation of Cd and Zn in soil-rice system and the related health risk assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(4): 1635-1641.
- [25] 赵莎莎, 肖广全, 陈玉成, 等. 不同施用量石灰和生物炭对稻田镉污染钝化的延续效应[J]. 水土保持学报, 2021, **44**(3): 334-340.
- Zhao S S, Xiao G Q, Chen Y C, *et al.* Continuous effect of different application rates of lime and biochar on the passivation of cadmium pollution in paddy fields [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **44**(3): 334-340.
- [26] 任超, 李竞天, 朱利文, 等. 不同钝化剂对碱性镉污染土壤钝化效果研究[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(3): 71-78.
- Ren C, Li J T, Zhu L W, *et al.* Study on the passivation effect of different passivators on alkaline cadmium contaminated soil [J]. Environmental Science and Technology, 2021, **44**(3): 71-78.
- [27] 杜彩艳, 段宗颜, 曾民, 等. 田间条件下不同组配钝化剂对玉米 (*Zea mays*) 吸收 Cd、As 和 Pb 影响研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(10): 1731-1738.
- Du C Y, Duan Z Y, Zeng M, *et al.* Effects of different combined amendments on cadmium, arsenic and lead absorption of maize under field conditions [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(10): 1731-1738.
- [28] 朱德强, 梁成华, 杜立宇, 等. 含方解石物质对土壤镉赋存形态的影响[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(1): 326-330.
- Zhu D Q, Liang C H, Du L Y, *et al.* Effects of substances containing calcite on cadmium speciation in contaminated soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(1): 326-330.
- [29] Henry T H, 赵良. 方解石表面 Cd^{2+} 与 Pb^{2+} 类质同象的 AFM 研究[J]. 高校地质学报, 2012, **18**(2): 193-202.
- Henry T H, Zhao L. Surface behavior of calcite upon uptake of Cd^{2+} and Pb^{2+} [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, **18**(2): 193-202.
- [30] Cui H B, Zhang W, Zhou J, *et al.* Availability and vertical distribution of Cu, Cd, Ca, and P in soil as influenced by lime and apatite with different dosages: a 7-year field study [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(35): 35143-35153.
- [31] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 石灰对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(26): 109-112.
- Cao S, Ouyang M Y, Zhou W J, *et al.* Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: a review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(26): 109-112.
- [32] 邓世茂, 楚哲婷, 梁佳欣, 等. 沸石材料在土壤修复工程中的应用研究进展[J]. 科学通报, 2021, **66**: 1002-1013.
- Deng S M, Chu Z T, Liang J X, *et al.* Progress of using zeolite materials in soil remediation engineering [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, **66**(9): 1002-1013.
- [33] 梅闯, 王衡, 蔡昆争, 等. 生物炭对土壤重金属化学形态影响的作用机制研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(4): 421-429.
- Mei C, Wang H, Cai K Z, *et al.* Advances on effects and mechanisms of biochar on chemical forms of heavy metals in contaminated soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, **37**(4): 421-429.
- [34] 孙洪欣, 赵全利, 薛培英, 等. 不同夏玉米品种对镉、铅积累与转运的差异性田间研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(12): 2068-2074.
- Sun H X, Zhao Q L, Xue P Y, *et al.* Variety difference of cadmium and lead accumulation and translocation in summer maize [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(12): 2068-2074.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)