

胡艳美,王旭军,党秀丽.改良剂对农田土壤重金属镉修复的研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(6):17-23.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.06.004

改良剂对农田土壤重金属镉修复的研究进展

胡艳美,王旭军,党秀丽

(沈阳农业大学土地与环境学院/土壤肥料资源高效利用国家工程实验室/农业农村部东北耕地保育重点实验室,辽宁沈阳 110866)

摘要:农田土壤重金属镉污染问题日渐突出,使用改良剂修复土壤重金属是一种经济高效、简单易行的方法,被广泛应用于各种类型的土壤改良中。改良剂种类繁多,不同的改良剂对土壤重金属镉的修复效果差异较大。文中综述了目前国内改良剂修复农田土壤镉污染的效果与作用机理,分析了存在的问题,并展望了今后的研究方向,以期为中轻度农田土壤重金属镉污染的修复提供参考。

关键词:镉污染;改良剂;土壤修复;研究进展

中图分类号: S156.2;X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)06-0017-07

随着城市化进程的加快和近现代工业的飞速发展,越来越多含重金属的污染物通过多种途径进入土壤,造成土壤重金属污染。镉是其中最首要且毒性最强的重金属污染物之一,它在土壤中活性较强,与其他重金属相比,更易被植物吸收并在食物链中迁移富集,危害人类健康^[1]。为了保证粮食数量,有必要通过物理、化学、生物等手段对中轻度镉污染土壤进行修复,从而实现农产品的质量安全。化学修复技术是治理土壤中轻度重金属污染的一种高效方法,因其工艺过程简单、适用范围广、处理容量大、可以实现大面积污染土壤的快速修复而逐渐受到广泛关注。

1 改良剂单施对土壤镉的修复效果

1.1 无机改良剂

1.1.1 碱性物质 常见的碱性改良剂有石灰、硅钙物质等。它主要通过提高土壤 pH 值来增加土壤表面的负电荷,从而促进土壤对镉等重金属离子的吸附;同时,pH 值的升高可促使土壤中的重金属以氢氧化物或碳酸盐的形式形成沉淀,进而降低土壤中重金属的有效性和迁移性,减少其对作物的毒

害^[2]。郭利敏等采用盆栽试验研究发现,施用石灰和碱渣后赤红壤 pH 值显著升高,与对照相比,石灰和碱渣处理后小白菜地上部镉含量均降低 50% 左右,土壤有效态镉含量降低幅度分别为 23.9% ~ 38.4% 和 14.7% ~ 33.9%,而石灰对小白菜的生物量没有显著影响^[1]。高译丹等通过室内培养,利用石灰改良镉污染草甸土后发现,石灰的施用可降低草甸土可交换态镉比例,降幅为 17.8% ~ 21.7%,提高其他形态镉的比例^[3]。朱宏奇等利用石灰改良镉污染稻作、旱作大田土壤的研究结果表明,土壤酸提取态镉含量明显降低,可还原态及残渣态镉含量显著增加^[4]。董宁宇等的研究表明,在酸性镉污染土壤上施用石灰后,黑麦草地上部镉质量分数大幅下降,且随石灰用量水平的增加,下降的幅度增大;然而低用量水平的石灰则在一定程度上促进了黑麦草对镉的吸收^[5]。王艳红等通过盆栽试验发现,石灰处理可使土壤 DTPA 提取态镉从对照的 0.265 mg/kg 降低到 0.219 mg/kg^[6]。谢运河等通过大田试验发现施用石灰能够抑制玉米对镉的富集和转运,显著降低了玉米籽粒镉含量,相比对照,水稻土有效态镉含量降低 3.91% ~ 27.36%^[7]。邱静等进行温室盆栽试验后发现,与对照相比,石灰处理能使籽粒苋镉吸收量下降约 56%,土壤有效镉下降至极低水平^[8]。王美娥等研究发现,石灰处理能够显著降低水稻土中弱酸提取态和可还原态镉含量,提高残渣态镉含量^[9]。代允超等的研究表明,石灰可使云南赤红壤有效镉含量降低 53%,内蒙栗钙土有效镉含量降低 35.6%^[10]。李佳华等研究了几种碱性物质对镉赋

收稿日期:2018-09-19

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0801103-3);国家自然科学基金(编号:41301530);农业农村部东北耕地保育重点实验室开放基金。

作者简介:胡艳美(1995—),女,新疆库尔勒人,硕士研究生,主要从事土壤重金属的生态修复研究。E-mail:1095321577@qq.com。

通信作者:党秀丽,博士,副教授,主要从事土壤改良研究。Tel:(024)88487155;E-mail:dangxiuli@163.com。

存形态的影响,结果表明,石灰施用量为 0.5% 时效果最佳,活性较高态的镉比对照减少了 35%,有机结合态和残渣态镉所占比例增加^[11]。宗良纲等研究发现,用石灰和硅肥作黄泥土改良剂可使土壤有效态镉分别降低 47.29% ~ 51.23%、55.45% ~ 63.90%,与黄泥土相比,在红壤上施加相同改良剂获得的钝化镉效果更好,而潮土上的效果则不明显^[12]。周卫等通过盆栽试验证明,用碳酸钙作棕壤改良剂可大大降低土壤-植物体系的镉毒害^[13]。曾敏等研究发现,碳酸钙能有效缓解镉对黄豆的毒害^[14]。高子翔等研究发现,硅肥可提高土壤 pH 值,吸附镉凝聚形成 Cd-Si 复合物,从而降低镉的活性^[15]。还有研究表明,硅肥可促使土壤镉由活性较高态向迟效态转化^[16-17]。杨超光等通过土培试验研究表明,硅酸钠处理能使黄泥土中可交换态、铁锰氧化物结合态镉钝化,增加碳酸盐结合态、残渣态镉含量^[18]。刘昭兵等的研究表明,碱性废弃物可通过改变土壤 pH 值及交换性钙含量来降低酸性污染潮泥土中镉的生物有效性^[19]。

1.1.2 含磷物质 钙镁磷肥、磷矿粉、羟基磷灰石等磷酸盐物质也常常被用作污染土壤重金属的改良剂。其主要作用机理是通过与土壤中重金属离子的吸附、沉淀、拮抗等作用,来钝化土壤中镉等重金属,降低其活性及有效性。李佳华等利用原位修复技术研究发现,向镉污染土壤中施加钙镁磷肥可使芦蒿可食部位的镉含量降低到卫生限量标准水平以下^[16]。宋正国等研究发现,在田间试验下,高量钙镁磷肥处理的玉米籽粒镉含量可较对照降低 57.4%,降低红壤 EDTA 提取态镉^[20]。李造煌等探究了钙镁磷肥对镉污染红壤的修复效果,结果表明钙镁磷肥显著提升了红壤的 pH 值,0.8 g/kg 钙镁磷肥最多可使 TCLP 提取态镉含量降低 61.9%、糙米镉含量降低 75.6%^[21]。罗远恒等以钙镁磷肥、磷矿石、重钙、普钙等磷酸盐物质为修复材料,探究其对镉污染土壤的钝化效果,研究发现不同的修复材料均能显著抑制小麦和水稻籽粒对镉的吸收^[22]。刘昭兵等利用盆栽试验表明,不同磷肥对降低潮泥土土壤镉活性及稻米对镉的吸收均有显著效果,当施磷量为 0.20 g/kg 时,DTA 提取态镉含量可降低 11.8%^[23]。邱静等研究发现,中量的磷酸钙处理会增加土壤有效态镉含量^[8]。有研究发现,用过磷酸钙改良镉污染沙壤中叶用茼蒿镉质量分数比对照降低 62.13%^[24]。许学慧等研究认为,与对照相

比,低品位草酸活化磷矿粉可使可交换态镉最高降低 39.5%,残渣态镉含量显著增加,减少了对茼蒿的污染^[25]。王立群等利用土培试验发现,羟基磷灰石可使褐潮土中可交换态镉减少 35% ~ 55%^[26]。宋勇等研究发现,在 5 mg/kg 镉污染的红壤中,羟基磷灰石的输入对马铃薯块茎镉含量的降幅为 78% ~ 85%,且可有效提高马铃薯品质^[27]。杜志敏等研究发现,磷灰石有效降低了沙质壤土水溶态和可交换态镉的含量,降低幅度分别为 59.51% 和 30.42%^[28]。陈苗苗等分析了盆栽试验下不同磷酸盐对镉污染褐土的改良效果,结果表明,磷酸盐的施入可明显提高小油菜的生物量,磷酸二氢铵可使污染褐土有效态镉含量降低 2.4% ~ 13.4%^[29]。王秀丽等利用磷酸盐改良镉污染草甸土的研究结果表明,施用磷酸盐使土壤速效磷含量显著升高,且土壤速效磷含量与有效态镉含量呈极显著负相关^[30]。

1.1.3 黏土矿物 黏土矿物通常具有巨大的比表面积、众多的孔隙,表面的吸附能力很强,可与土壤重金属进行离子交换吸附作用,降低其生物有效性及移动性。常用的土壤重金属镉改良剂包括沸石、海泡石、蒙脱石、膨润土等。谢飞等研究发现,施加高剂量沸石,可使草甸土可交换态镉比对照降低 25.99%,铁锰氧化物结合态镉、残渣态镉显著增加^[31]。刘秀珍等研究膨润土和沸石对石灰性褐土污染中镉形态及化学活性的影响,盆栽试验结果表明,膨润土改良土壤后,可交换态、碳酸盐结合态镉的含量均有所下降,但在重度镉污染土壤中,沸石却提高了镉的活性^[32]。梁学峰等利用海泡石原位修复镉污染水稻田后发现,糙米镉含量降幅为 42.3% ~ 46.5%,且使得土壤中活性较高态的镉向活性低态镉转化^[33]。朱奇宏等分析了海泡石对酸性水稻土 0.01 mol/L CaCl₂ 提取态镉含量的影响后发现,镉含量的降低幅度高达 93.8%,糙米镉含量降低 37.6%^[34]。于春晓等也通过土培试验证实,海泡石可以钝化土壤中的镉^[35]。韩君等研究了以坡缕石和海泡石为钝化剂来原位修复镉污染的水稻土,结果表明,2.00 kg/m² 坡缕石和 2.25 kg/m² 海泡石处理能最大程度降低糙米中的镉含量,降幅分别为 54.6% 和 73.5%^[36]。有研究表明发现,施加海泡石可缓解镉对植物的胁迫和毒害,降低土壤镉有效态含量^[37-38]。张青等在盆栽试验中对镉污染红壤施加海泡石后发现,海泡石处理对镉的形态转化及作物中镉有效性没有显著影响^[39]。徐奕等

通过盆栽试验研究了膨润土对镉污染土壤的修复效应,结果表明,膨润土的施入可使土壤可交换态镉含量较对照降低 41.3% ~ 86.1%^[40]。律琳琳等用钠基膨润土、膨润土、沸石、硅藻土等对镉污染潮褐土进行改良,结果表明,各种矿物均可降低土壤镉活性,且 40 g/kg 硅藻土处理可使土壤有效态镉含量最高降低 32.30%^[41]。李红等研究发现,随着伊/蒙黏土添加量的增加,小白菜地上部对镉的吸收减少,土壤中镉的有效性降低^[42]。

1.1.4 工业废渣 工业废渣主要有赤泥、粉煤灰及炉渣,它们含有铁锰铝等氧化物,主要通过表面吸附将重金属离子固定到氧化物晶格层间中,从而降低重金属的有效性。谢运河等研究发现,3 000 kg/hm² 赤泥的施入可显著提高玉米的生物量和产量,使春玉米籽粒镉含量降低了 27.5%^[7]。宋正国等通过大田试验研究发现,1.5% 赤泥能使玉米茎、籽粒中镉的含量较对照分别降低 60.6%、49.3%^[20]。王立群等研究发现,赤泥、酸洗赤泥对褐潮土中可交换态镉含量的钝化比例达 15% ~ 25%^[26]。范美蓉等通过盆栽试验研究表明,赤泥能有效促进潮泥土可交换态镉的稳定性,有利于镉的固定,可大幅提高水稻产量,且赤泥处理的糙米镉含量比对照降低了 42.42%^[43]。刘昭兵等也证实赤泥可以显著降低潮泥田土壤有效态镉含量,减少水稻镉累积及生物毒性^[44]。有学者通过盆栽试验研究了赤泥对潮泥田土壤镉赋存形态的影响,结果表明,相比对照,1.25% 赤泥处理可使土壤交换态镉含量降低 31.6%,碳酸盐结合态镉、铁锰氧化物结合态和残渣态镉含量均增加^[45]。丁永祯等通过大田试验,研究了赤泥对红壤镉的钝化效果,结果表明,高量赤泥可以有效抑制空心菜对镉的累积,降低土壤有效态镉含量^[46]。李佳华等研究证明,高炉渣可缓解芦蒿对镉的吸收,对土壤中的镉有一定的固定作用,但不能使芦蒿中的镉达到安全范围^[16]。李红娟等的研究结果表明,在镉污染的沙壤中加入高量粉煤灰后,土壤有效态镉降低量达到未加改良剂时的 24.14%^[24]。

1.2 有机改良剂

1.2.1 有机物料 有机物料对重金属有效性的影响机理主要包括 2 个方面,一是有机物料中富含的有机质可与土壤中的重金属离子络合,形成难溶的络合物;二是有机物料可以增加土壤阳离子交换量,提高土壤的环境容量,进而促进对重金属的吸

附^[47]。此外,有机物料还可以通过影响土壤其他理化性质间接影响土壤重金属的有效性^[48]。常见的有机物料有畜禽粪便、泥炭、堆肥、秸秆、腐殖酸等。代允超等利用盆栽试验探究了鸡粪、泥炭对不同性质镉污染土壤的改良效果后发现,相比对照,鸡粪、泥炭处理使小白菜的生物量明显增加,且分别可使内蒙栗钙土有效态镉含量降低 44.4%、46.7%、云南赤红壤有效态镉含量降低 42.4%、37.9%^[10]。易秀等通过盆栽试验研究发现,施入 24 g/kg 鸡粪后,土壤中有效态镉的含量比对照降低了 48%^[49]。王林等通过田间试验研究发现,鸡粪处理可显著降低潮土可交换态镉、铁锰氧化物结合态镉含量,增加残渣态镉含量,提高油菜产量^[50]。詹绍军等通过土培试验研究了不同有机物料对镉污染水稻土的修复,结果表明,高量猪粪处理可使土壤有效镉含量分别从对照的 0.112 mg/kg 降至 0.061 mg/kg^[51]。陕红等通过盆栽试验研究发现,猪粪可显著降低石灰性潮土可交换态镉含量,减少油麦菜对镉的吸收,秸秆则增加了油麦菜中镉的含量^[52]。张亚丽等研究了不同有机物料对镉污染黄泥土的改良效果后发现,猪粪可使可交换态镉含量下降约 15%,麦秆、稻草等秸秆类肥料对可交换态镉含量的降幅在 10% 左右^[53]。张秋芳等通过盆栽试验研究证明,在添加外源 10 mg/kg 镉的条件下猪粪和泥炭镉可抑制水稻对镉的吸收,在 1.45 mg/kg 本底红壤镉含量下,二者则促进水稻对镉的吸收^[54]。江巧君等通过盆栽试验研究发现,在添加 3 mg/kg 镉的污染土壤中,有机肥可显著降低稻米中的镉含量^[48]。董宁宇等发现,加入堆肥、泥炭等有机物质可以增强水稻田土壤对镉的吸附固定能力,降低土壤中镉的化学活性^[5]。吴飞龙等研究发现,堆肥可以改变沙壤土镉赋存形态,使土壤易溶态镉和碳酸盐结合态镉含量显著减少,铁锰氧化物结合态镉含量显著升高^[55]。孙文博等通过盆栽试验,利用蔗渣修复镉污染土壤后发现,蔗渣的施入可明显提高小白菜产量,随蔗渣施用浓度的提高,土壤弱酸提取态镉含量不断下降^[56]。陈建斌等研究发现,粉碎的稻草和紫云英均可抑制分蘖期水稻对镉的吸收,而促进成熟期水稻对镉的吸收^[57]。贾乐等研究发现,在模拟镉污染的青紫泥土上采用 2% 玉米秸秆还田会促进白菜吸收镉,在镉污染水稻土上则抑制白菜对镉的吸收^[58]。朱奇宏等在大田试验的研究中表明,腐殖酸不宜被用来改良酸性镉污染水稻土^[34]。何雨帆

等研究了腐殖酸对小白菜吸收镉的影响,结果发现,胡敏酸可以抑制小白菜对镉的吸收,而富里酸却促进了小白菜对镉的吸收^[59]。

1.2.2 生物炭材料 生物炭材料的表面拥有许多活性基团及孔隙,可吸附固定重金属离子^[60],它还可以通过表面的负电荷吸附阳离子发生离子交换、表面络合作用,降低重金属的活性^[50]。生物炭一般显碱性,它也可以通过提高土壤 pH 值促进土壤对重金属离子的吸附。张迪等通过室内培养的方法探索了生物炭对镉污染黄棕壤的钝化效果,结果表明,生物炭的添加可使可交换态镉含量显著下降,铁锰氧化物结合态镉及残渣态镉含量上升^[60]。易卿等探究了不同生物质黑碳对黄棕壤中镉有效性的影响,发现 700 ℃ 条件下制成的水稻黑碳在施用量为 6% 时能使土壤有效态镉最高降低 47.96%^[61]。王风等研究了稻壳生物炭对棕壤中镉形态的影响,结果表明,生物炭提高了棕壤 pH 值,随生物炭用量的增加,可交换态镉含量显著降低,有机结合态镉和残渣态镉含量增加^[62]。毛懿德等通过盆栽试验研究发现,添加生物炭能提高土壤 pH 值,显著降低土壤可交换态镉含量和油菜各器官中镉含量^[63]。曹莹等以生物炭为改良剂修复镉污染棕壤研究发现,花生粒镉含量可随生物炭施入量的增加而降低,且 10 g/kg 生物炭的修复效果最佳^[64]。李明遥等通过土培试验发现,生物炭的施入可以促使草甸土可交换态镉向其他形态转化,5% 生物炭处理可使交换态镉含量降低 34.5%^[65]。王海波等研究了生物炭对红壤镉赋存形态的影响,结果表明,生物质炭的施入会使可交换态镉、碳酸盐结合态镉、铁锰氧化物结合态镉含量降低,残渣态镉含量升高^[66]。李岭等通过盆栽试验研究发现,20 g/kg 生物炭可使黄壤烤烟叶片镉含量降低 58.47%^[67]。刘阿梅等研究表明,10% 生物炭的施入可明显促进圆萝卜和小青菜的生长发育,使萝卜、青菜可食部位镉含量分别降低 81.21%、83.04%^[68]。张华纬等采用室内培养的方法研究了添加生物炭对黄棕壤镉污染修复的效果,结果表明,施加生物炭可提高土壤 pH 值及有机碳含量,3% 生物炭可使玉米地上部镉含量减少 60.58%,降低镉对食品安全的威胁^[69]。周建斌等采用盆栽方法探究了棉秆炭对镉污染土壤的修复效果,结果表明,棉秆炭可显著吸附土壤中的镉,降低其生物有效性和迁移性^[70]。杨惟薇等通过室内培养试验,将甘蔗叶、木薯秆、水稻秸

秆、蚕沙制成生物炭施入镉污染潮土中,结果表明,4 种生物炭的施入均可提高土壤 pH 值和阳离子交换量,显著降低土壤弱酸可提取态镉和可还原态镉含量^[71]。也有学者研究发现,生物炭对土壤重金属镉的修复效果并不显著,有时反而促进了作物对镉的吸收。孟令阳等分析了草炭对镉污染水稻土的修复效果,结果表明,该处理增加了白菜体内镉含量^[72]。张晶等研究发现,秸秆黑炭不能降低酸性污染土壤中镉的生物有效性和植物对土壤镉的吸收量^[73]。

2 改良剂配施对土壤镉的修复效果

已有许多研究表明,复合改良剂配施的修复效果要优于传统单一的改良剂。有文献表明,有机物质与化学改良剂配施处理重金属污染土壤,一方面有机物质可以缓冲化学改良剂引起的 pH 值波动,另一方面有机物质可与化学改良剂发生反应形成复合物,对抑制有机物质的迅速降解有一定的作用,可以降低有机质分解所引起的风险^[74]。王艳红等研究发现,石灰与泥炭配施比单施石灰更进一步降低生菜可食部位镉含量及土壤 DTPA 镉含量^[6]。代允超等的研究表明,有机物料与石灰配施的效果优于单施,但并不优于有机物料与石灰单独处理之和^[10]。梁学峰等研究发现,海泡石单施对糙米中镉含量的降幅为 42.3% ~ 46.5%,海泡石与磷肥配施可使糙米中镉含量最高降低 72.9%;海泡石与生物炭配施的效果接近二者单独施用时的效果^[33]。王林等研究了生物炭、鸡粪对油菜吸收镉的影响,结果发现,高量生物炭和鸡粪配施抑制油菜对镉的吸收效果最好,降低率达到 72%,且对油菜的增产效果最好^[50]。詹绍军等研究不同有机物料与石灰对镉有效性的影响后发现,石灰与猪粪配施降低水稻土有效态镉的效果优于石灰单施,并且可以减少小麦对镉的吸收,但石灰与泥炭或活性炭配施则会在一定程度上促进小麦吸收镉^[51]。杨兰等研究表明,与单施牛粪相比,牛粪分别与海泡石、石灰、钙镁磷肥的配施处理使糙米镉含量降低 50% ~ 70%^[75]。王永昕等研究表明,在海泡石修复镉污染土壤的基础上,增施适量鸡粪可以增强对镉的钝化^[76]。朱奇宏等研究了石灰、海泡石及石灰 + 海泡石对镉污染土壤的钝化效果,结果表明,石灰与海泡石配施效果最佳,可使稻作土壤酸提取态镉降低 10.3% ~ 14.5%^[4]。罗远恒等研究了钙镁磷肥、蒙脱石、石灰对种植小麦、水稻的镉污染土壤的原位

钝化效果,结果表明,与单施钝化剂相比,钙镁磷肥、蒙脱石与石灰配施更能抑制作物对镉的吸收,而蒙脱石 + 石灰处理在稻作条件下不宜施用^[22]。李红娟等研究了不同改良剂对叶用莴苣镉吸收的影响,结果表明,施用复合改良剂的改良效果要明显大于对应的单一改良剂,以质量比 5 : 1 的粉煤灰与过磷酸钙配施效果最佳;粉煤灰 + 鸡粪、粉煤灰 + 草炭对镉的抑制效果也优于单施^[30]。王秀丽等研究表明,单施沸石可使土壤有效态镉含量降低 6.4% ~ 23.2%,而沸石与磷酸盐配施可使土壤有效态镉含量降低 38.6% ~ 61.4%^[24]。谢飞等利用沸石、石灰、沸石 + 石灰等改良镉污染土壤后发现,60 g/kg 沸石与 2 g/kg 石灰配施对土壤镉的钝化效果最好^[31]。于春晓等研究得出,海泡石单施、磷矿粉单施、海泡石与磷矿粉配施对土壤活性较高态镉的降幅分别为 10% ~ 13%、16% ~ 17%、23% ~ 26%^[35]。

3 新型材料改良剂对土壤镉的修复效果

新型材料改良剂主要包括纳米材料、多酚物质、功能膜材料、杂化及介孔材料^[77],相比传统改良剂,新型材料改良剂拥有独特的表面构造和组成成分,更易与重金属离子发生表面吸附络合,将其固定。近年来,新型材料改良剂逐渐被应用到农田土壤重金属污染的治理修复中。钱翌等研究了纳米羟基磷灰石对污染土壤镉形态的影响,结果表明,5% 纳米羟基磷灰石可使有效态镉含量下降 49%,铁锰氧化物结合态镉含量显著增加^[78]。有学者研究发现,纳米沸石可显著降低土壤中活性较高态镉含量及抑制大白菜对镉的吸收^[79-80]。赵秋香等通过盆栽试验探讨了蒙脱石 - OR - SH 复合材料对镉污染土壤的钝化效果,结果表明,在 3 mg/kg 镉污染的土壤上,该改良剂最高可使可交换态镉含量降低 80.37%,极大降低了镉的毒性^[81]。武成辉等通过盆栽试验研究表明,新型硅酸盐钝化剂可促进小白菜的生长,提高土壤 pH 值,在 3 mg/kg 镉污染的土壤中,5% 硅酸盐可使小白菜中镉含量降低 59.17%,显著降低酸性土壤有效态镉含量^[82]。秦端端等利用保水剂开展盆栽试验发现,在 200 mg/L 镉溶液中,保水剂可吸附超过 120 mg/g 的镉,且显著降低镉在黑麦草中的积累^[83]。徐应明等采用盆栽试验,研究在单一镉污染黏壤土中新型功能膜材料对镉的修复效果,结果表明,新型功能膜材料可有效钝化土壤中的镉,并抑制油菜对镉的吸收^[84]。

4 问题与展望

影响改良剂修复效果的环境因素及相关因子众多,即使是同一种改良剂,针对不同的土壤类型、作物、重金属,修复效果也存在很大的差异;因此,应结合影响改良剂修复效果的重要因素,如土壤 pH 值、有机质含量、阳离子交换量、土壤水分等土壤基本理化性质,进一步系统全面地深入研究各种改良剂的修复机理,更加完善改良剂的分类体系,因地制宜地筛选最佳的改良措施。

土壤重金属污染往往是复合型的,单一的改良剂很难同时钝化所有重金属离子,因此研制出一种能同时修复多种污染物的长期稳定、环保无毒、经济可行的多功能修复材料,将具有巨大的现实意义。此外,在选用改良剂之前,须要对改良剂进行污染风险评估,减少其环境风险,以免改良剂本身携带危险成分而导致土壤的再次污染。

单一改良剂存在一定的局限性和缺陷,已有许多研究证明,多种改良剂复合联用的效果要优于相应的单一改良剂,因此应注重运用多种改良剂的复合修复。然而复合改良剂配施具有一定的交互、协同性,它的作用机理十分复杂,还有待今后更加深入的探究,且研究开发更多新型复合型改良剂也具有重要意义。同时,还应将改良剂钝化修复与物理、植物、微生物修复技术联合使用,取长补短,以期达到高效、可靠的修复效果。

在修复重金属污染土壤时还须要考虑改良剂的施用量对土壤理化性质、微生物群落多样性、酶活性的潜在影响。此外,目前大多修复土壤重金属污染的试验研究都采用异位修复,在实验室中进行模拟改良,然而现实农田土壤的环境更加复杂和不可控,原位修复的效果尚不明确,因此大力开展土壤重金属污染的原位修复研究将更具有实际意义。

参考文献:

- [1] 郭利敏,艾绍英,唐明灯,等. 不同改良剂对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(3):654-658.
- [2] 黄凯,张杏锋,李丹. 改良剂修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):292-296.
- [3] 高泽丹,梁成华,裴中健,等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(2):258-261.
- [4] 朱奇宏,黄道友,刘国胜,等. 石灰和海泡石对镉污染土壤的修复效应与机理研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):111-116.
- [5] 董宇宇,陈中敏,宋丽娜,等. 施用石灰和有机物质对酸性镉污染土壤的改良效果及其影响因素[J]. 农业环境科学学报,2008,27

- (2):590-595.
- [6]王艳红,李盟军,唐明灯,等.石灰和泥炭配施对叶菜吸收 Cd 的阻控效应[J].农业环境科学学报,2013,32(12):2339-2344.
- [7]谢运河,纪雄辉,黄涓,等.赤泥、石灰对 Cd 污染稻田改制玉米吸收积累 Cd 的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2104-2110.
- [8]邱静,李凝玉,胡群群,等.石灰与磷肥对籽粒苋吸收镉的影响[J].生态环境学报,2009,18(1):187-192.
- [9]王美娥,彭驰,陈卫平.水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J].环境科学,2015,36(11):4283-4290.
- [10]代允超,吕家珑,刁展,等.改良剂对不同性质镉污染土壤中有效镉和小白菜镉吸收的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(1):80-86.
- [11]李佳华,林仁漳,王世和,等.几种固定剂对镉污染土壤的原位化学固定修复效果[J].生态环境,2008,17(6):2271-2275.
- [12]宗良纲,张丽娜,孙静克,等.3种改良剂对不同土壤-水稻系统中 Cd 行为的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(4):834-840.
- [13]周卫,汪洪,李春花,等.添加碳酸钙对土壤中镉形态转化与玉米叶片镉组分的影响[J].土壤学报,2001,38(2):219-225.
- [14]曾敏,廖柏寒,张永,等. CaCO_3 对黄豆生长过程中 Cd 毒害的缓解效应[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(5):453-456.
- [15]高子翔,周航,杨文弢,等.基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响[J].环境科学,2017,38(12):5299-5307.
- [16]李佳华,林仁漳,王世和,等.改良剂对土壤-芦蒿系统中镉行为的影响[J].环境化学,2009,28(3):350-354.
- [17]郑煜基,陈能场,张雪霞,等.硅肥施用对重金属污染土壤甘蔗镉吸收的影响研究初探[J].生态环境学报,2014,23(12):2010-2012.
- [18]杨超光,豆虎,梁永超,等.硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J].中国农业科学,2005,38(1):116-121.
- [19]刘昭兵,纪雄辉,田发祥,等.碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤镉生物有效性的影响及机制[J].环境科学,2011,32(4):1164-1170.
- [20]宋正国,唐世荣,丁永祯,等.田间条件下不同钝化材料对玉米吸收镉的影响研究[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2152-2159.
- [21]李造煌,杨文弢,邹佳玲,等.钙镁磷肥对土壤 Cd 生物有效性和糙米 Cd 含量的影响[J].环境科学学报,2017,37(6):2322-2330.
- [22]罗远恒,顾雪元,吴永贵,等.钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J].农业环境科学学报,2014,33(5):890-897.
- [23]刘昭兵,纪雄辉,彭华,等.磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J].应用生态学报,2012,23(6):1585-1590.
- [24]李红娟,赵勇,王谦,等.不同改良剂对叶用莴苣吸收 Cd 的影响[J].农业工程学报,2010,26(增刊1):285-291.
- [25]许学慧,姜冠杰,胡红青,等.草酸活化磷矿粉对矿区污染土壤中 Cd 的钝化效果[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2005-2011.
- [26]王立群,罗磊,马义兵,等.不同钝化剂和培养时间对 Cd 污染土壤中可交换态 Cd 的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(6):1098-1105.
- [27]宋勇,何谈,刘明月,等.羟基磷灰石对 Cd 污染土壤中马铃薯生长及品质的影响[J].环境科学,2010,31(9):2240-2247.
- [28]杜志敏,周静,郝建设,等.4种改良剂对土壤-黑麦草系统中镉行为的影响[J].生态环境学报,2010,19(11):2728-2732.
- [29]陈苗苗,徐明岗,周世伟,等.不同磷酸盐对污染土壤中镉生物有效性的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(2):255-262.
- [30]王秀丽,梁成华,马子惠,等.施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响[J].环境科学,2015,36(4):1437-1444.
- [31]谢飞,梁成华,孟庆欢,等.添加天然沸石和石灰对土壤镉形态转化的影响[J].环境工程学报,2014,8(8):3505-3510.
- [32]刘秀珍,赵兴杰,马志宏.膨润土和沸石在镉污染土壤治理中的应用[J].水土保持学报,2007,21(6):83-85,91.
- [33]梁学峰,韩君,徐应明,等.海泡石及其复配原位修复镉污染稻田[J].环境工程学报,2015,9(9):4571-4577.
- [34]朱奇宏,黄道友,刘国胜,等.改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J].中国生态农业学报,2010,18(4):847-851.
- [35]于春晓,张丽莉,杨立杰,等.镉钝化剂与尿素配施对土壤镉钝化效果的影响[J].生态学杂志,2017,36(7):1941-1948.
- [36]韩君,梁学峰,徐应明,等.黏土矿物原位修复镉污染稻田及其对土壤氮磷和酶活性的影响[J].环境科学学报,2014,34(11):2853-2860.
- [37]王林,徐应明,孙扬,等.海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J].环境工程学报,2010,4(9):2093-2098.
- [38]孙约兵,徐应明,史新,等.海泡石对镉污染红壤的钝化修复效应研究[J].环境科学学报,2012,32(6):1465-1472.
- [39]张青,李菊梅,徐明岗,等.改良剂对复合污染红壤中镉锌有效性的影响及机理[J].农业环境科学学报,2006,25(4):861-865.
- [40]徐奕,赵丹,徐应明,等.膨润土对轻度镉污染土壤钝化修复效应研究[J].农业资源与环境学报,2017,34(1):38-46.
- [41]律琳琳,金美玉,李博文,等.4种矿物材料改良 Cd 污染土壤的研究[J].河北农业大学学报,2009,32(1):1-5.
- [42]李红,区杰泳,颜增光,等.牛骨炭与伊/蒙黏土组配改良剂对土壤中 Cd 的钝化效果[J].环境科学研究,2017,31(4):1-8.
- [43]范芙蓉,罗琳,廖育林,等.不同改良剂对镉污染土壤的改良效果和对水稻光合特性的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(4):430-434.
- [44]刘昭兵,纪雄辉,王国祥,等.赤泥对 Cd 污染稻田水稻生长及吸收累积 Cd 的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(4):692-697.
- [45]范芙蓉,罗琳,廖育林,等.赤泥施用量对镉污染稻田水稻生长和镉形态转化的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):390-396.
- [46]丁永祯,宋正国,唐世荣,等.大田条件下不同钝化剂对空心菜

- 吸收镉的影响及机理[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1758–1763.
- [47] 瞿飞, 范成五, 刘桂华, 等. 钝化剂修复重金属污染土壤研究进展[J]. 山西农业科学, 2017, 45(9): 1561–1565.
- [48] 江巧君, 周琴, 韩亮亮, 等. 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 9–14.
- [49] 易秀, 刘意竹, 姜凌, 等. 不同改良剂对重金属污染土壤中小麦镉吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 292–295, 300.
- [50] 王林, 徐应明, 梁雪峰, 等. 生物炭和鸡粪对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2851–2858.
- [51] 詹绍军, 喻华, 冯文强, 等. 有机物料与石灰对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(3): 999–1003.
- [52] 陕红, 李书田, 刘荣乐. 秸秆和猪粪的施用对土壤镉有效性的影响和机理研究[J]. 核农学报, 2009, 23(1): 139–144.
- [53] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 212–218.
- [54] 张秋芳, 王果, 杨佩艺, 等. 有机物料对土壤镉形态及其生物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1659–1662.
- [55] 吴飞龙, 苏德纯. 油菜连作及施用堆肥对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 658–662.
- [56] 孙文博, 莫创荣, 安鸿雪, 等. 施用蔗渣对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1793–1799.
- [57] 陈建斌, 陈必群, 邓朝祥. 有机物料对土壤中外源镉形态与生物有效性的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 110–113.
- [58] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1992–1998.
- [59] 何雨帆, 刘宝庆, 吴明文, 等. 腐殖酸对小白菜吸收 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊1): 84–86.
- [60] 张迪, 胡学玉, 柯跃进, 等. 生物炭对城郊农业土壤镉有效性及镉形态的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(4): 88–94.
- [61] 易卿, 胡学玉, 柯跃进, 等. 不同生物质黑碳对土壤中外源镉(Cd)有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 88–94.
- [62] 王风, 王梦露, 许堃, 等. 生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 907–914.
- [63] 毛懿德, 铁柏清, 叶长城, 等. 生物炭对重污染土壤镉形态及油菜吸收镉的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 579–582.
- [64] 曹莹, 邸佳美, 沈丹, 等. 生物炭对土壤外源镉形态及花生籽粒富集镉的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 688–693.
- [65] 李明遥, 张妍, 杜立宇, 等. 生物炭与沸石混施对土壤 Cd 形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 248–252.
- [66] 王海波, 尚艺婕, 史静. 生物质炭对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(4): 22–26.
- [67] 李岭, 刘冬, 吕银斐, 等. 生物炭施用对镉污染土壤中烤烟品质和镉含量的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(2): 228–232.
- [68] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 193–198, 204.
- [69] 张华伟, 甄华杨, 岳士忠, 等. 水稻秸秆生物炭对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1068–1074.
- [70] 周建斌, 邓丛静, 陈金林, 等. 棉秆炭对镉污染土壤的修复效果[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1857–1860.
- [71] 杨惟薇, 张超兰, 曹美珠, 等. 4 种生物炭对镉污染潮土钝化修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 239–243.
- [72] 孟令阳, 辛术贞, 苏德纯. 不同惰性有机碳物料对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1531–1538.
- [73] 张晶, 苏德纯. 秸秆炭化后还田对不同镉污染农田土壤中镉生物有效性和赋存形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1927–1932.
- [74] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441–1453.
- [75] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 牛粪配合无机改良剂对稻田土壤 Cd 赋存形态及生物有效性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 651–658.
- [76] 王永昕, 孙约兵, 徐应明, 等. 施用鸡粪对海泡石钝化修复镉污染菜地土壤的强化效应及土壤酶活性影响[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 159–169.
- [77] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014(4): 721–728.
- [78] 钱翌, 褚兴飞. 纳米羟基磷灰石修复镉铅污染土壤的效果评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 176–179.
- [79] 熊仕娟, 徐卫红, 谢文文, 等. 纳米沸石对土壤 Cd 形态及大白菜 Cd 吸收的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4630–4641.
- [80] 郑荧辉, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 纳米沸石对大白菜镉吸收及土壤有效镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2353–2360.
- [81] 赵秋香, 黄晓纯, 李媛媛, 等. 蒙脱石-OR-SH 复合体修复剂对重金属污染土壤中 Cd 的钝化效果[J]. 环境化学, 2014, 33(11): 1871–1877.
- [82] 武成辉, 李亮, 晏波, 等. 新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2007–2013.
- [83] 秦端端, 姚粉霞, 陈亚军, 等. 保水剂对土壤重金属镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2327–2333.
- [84] 徐应明, 李军幸, 孙国红, 等. 新型功能膜材料对污染土壤铅汞镉钝化作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 86–89.