

矿物基土壤调理剂对烟草土壤修复的效果

龙炜凡¹, 胡志娇¹, 杨家明², 张亚当³, 刘耀驰^{1,4*}

(1. 湖南隆洲驰宇科技有限公司, 湖南长沙 410013; 2. 云南省罗平县板桥镇农业综合服务中心, 云南罗平 655800; 3. 西南林业大学会计学院, 云南昆明 650000; 4. 中南大学化学化工学院, 湖南长沙 410083)

摘要 以矿物基土壤调理剂为核心, 配合其他农艺措施对烟草土壤进行重金属污染修复与土壤改良, 研究不同修复模式对烟草种植的影响。结果表明, 矿物基土壤调理剂能有效改良土壤理化性质, 土壤 pH 在一定程度得到提高, 处理①(7 500 kg/hm² 矿物基土壤调理剂) 和处理③(7 500 kg/hm² 矿物基土壤调理剂+有机硅) 的模式能很大程度改善土壤理化性质, 处理②(7 500 kg/hm² 矿物基土壤调理剂+深翻耕) 和处理④(7 500 kg/hm² 矿物基土壤调理剂+有机硅+深翻耕) 在加上深翻耕操作后, 土壤水解性氮、有效磷、速效钾和有机质含量都大幅度降低; 同时矿物基土壤调理剂能有效降低土壤重金属含量, 其中对镉最明显。处理②综合表现最好, 上、中、下部叶重金属大部分均有效降低, 利用该技术模式能有效改良烟田土壤、改善烟叶品质和提高烟叶产量, 适合后续推广应用。

关键词 矿物基土壤调理剂; 烟草; 土壤修复; 土壤理化性质

中图分类号 X 53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)14-0060-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.14.014



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effect of Mineral-based Soil Conditioners on Soil Remediation of Tobacco

LONG Wei-fan¹, HU Zhi-jiao¹, YANG Jia-ming² et al (1. Hunan Longe-Gallop Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410013; 2. Agricultural Comprehensive Service Center of Banqiao Town, Luoping County, Yunnan Province, Luoping, Yunnan 655800)

Abstract Taking mineral-based soil conditioners as the core, combined with other agronomic measures, heavy metal pollution remediation and soil improvement in tobacco soil were carried out, and the effects of different remediation modes on tobacco planting were studied. The results showed that the mineral-based soil conditioner could effectively improve the physical and chemical properties of the soil, and the soil pH was increased to a certain extent. Treatment ① (7 500 kg/hm² mineral-based soil conditioner) and treatment ③ (7 500 kg/hm² mineral-based soil conditioner + organosilicon) could greatly improve soil physical and chemical properties. Treatment ② (7 500 kg/hm² mineral-based soil conditioner + deep ploughing) and treatment ④ (7 500 kg/hm² mineral-based soil conditioner + organosilicon + deep ploughing) after adding deep ploughing, the soil hydrolyzability nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter content were greatly reduced; at the same time, the mineral-based soil conditioner could effectively reduce the content of heavy metals in the soil, among which cadmium was the most obvious. Treatment ② had the best comprehensive performance, and most of the heavy metals in the upper, middle and lower leaves were effectively reduced. The use of this technology model could effectively improve the soil of tobacco fields, improve the quality of tobacco leaves and increase the yield of tobacco leaves, which was suitable for subsequent promotion and application.

Key words Mineral based soil conditioner; Tobacco; Soil remediation; Soil physical and chemical property

烟草是重要的经济作物, 在我国南方广泛种植, 而烟草对重金属尤其是镉(Cd)有富集作用^[1]。烟草制成的卷烟燃烧时, 其重金属化合物的 10%~20% 成为烟气气溶胶, 以金属氧化物的形式随烟气进入人体, 因此, 有关重金属在烟草中的累积及对人体健康危害的研究日益受到重视^[2]。Cd 是一种对动物和人类健康危害严重的重金属^[3], 1990 年 Hoffmann 清单将其列入烟草 44 种有害成分中^[4]。

土壤退化问题在全球普遍存在, 我国土壤重金属污染尤显突出, 过量的重金属进入耕地中, 不仅对作物产生毒害, 影响作物生长, 还可以逐步富集在植物中, 通过食物链进入人体后危害人的健康, 造成重金属蔬菜、“镉大米”等诸多事件发生^[5-6]。目前, 治理土壤重金属 Cd 污染的方式主要有 2 种: 一种是直接降低土壤中 Cd 的总量, 主要有客土法、化学淋洗法、热力提取法、络合浸提法、生物吸收法等^[7-8]; 第 2 种是改变 Cd 在土壤中的存在方式, 将 Cd 固定于土壤中, 即降低土壤中 Cd 的有效性, 使其生物活性降低, 从而不被作物吸收, 如在土壤中施加钝化剂等^[9]。其中第 2 种方法使用更普遍, 在钝化剂材料中, 黏土矿物基材料是土壤修复的主力

军, 具有粒径小、比表面积大等特点, 可利用它的可变电荷表面对重金属离子进行离子交换吸附、络合、沉淀来实现重金属元素的固化与稳定化, 且能持久有效^[10-11]。同时可以改良酸性土壤, 提高土壤中有效硅含量, 使得作物更好生长^[12]。所以黏土矿物材料尤其是活化改性后制成的矿物基土壤调理剂在农业领域土壤改良、土壤修复中发挥了关键作用, 具有其他修复材料无可比拟的成本低、使用简便、效果好等优势^[13-14]。该试验在验证以黏土矿物基材料制成的“海汇龙洲牌”土壤调理剂在烟田土壤改良及重金属修复的基础上, 探索不同修复模式对烟草种植的影响, 为高品质烟草的可持续种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地情况 试验地选在云南省某地, 于 2020 年 4—10 月进行, 烤烟—油菜轮作, 田形方正、地力均匀、排灌方便, 光照充足, 有较强的代表性和典型性。试验地土壤理化性质为 pH 6.55、有机质 40.02 g/kg、速效氮 55.1 mg/kg、速效磷 69.1 mg/kg、速效钾 502.7 mg/kg、有效镉 1.662 mg/kg、总镉 3.622 mg/kg、总铅 66.8 mg/kg、总铬 76.76 mg/kg、总砷 53.1 mg/kg、总汞 < 5.00 mg/kg。

1.2 试验材料

1.2.1 供试烟草品种 根据当地气候环境、土壤条件及农户的种植习惯, 选择主栽品种烟草 K326。

作者简介 龙炜凡(1992—), 男, 湖南湘乡人, 从事土壤改良和重金属修复研究。* 通信作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事环境化学、功能材料及矿物综合利用研究。

收稿日期 2021-08-17

1.2.2 供试产品。“海汇龙洲牌”土壤调理剂, CaO \geq 40%, SiO₂ \geq 20%, pH 9~11; “海汇龙洲牌”有机硅叶面肥, SiO₂ \geq 120 g/L。

1.3 试验设计 试验安排 5 个处理: 对照 (CK), 常规施肥; 处理①, 基施土壤调理剂 7 500 kg/hm²+常规施肥; 处理②, 基施土壤调理剂 7 500 kg/hm²+深翻耕 40 cm+常规施肥; 处理③, 基施土壤调理剂 7 500 kg/hm²+有机硅叶面肥喷施+常规施肥; 处理④, 基施土壤调理剂 7 500 kg/hm²+有机硅叶面肥喷施+深翻耕 40 cm+常规施肥。不同处理间进行隔离, 防止小区间出现串排串灌。

1.4 样品采集

1.4.1 土壤取样。移栽前在试验地按五点取样法设置采样点, 用不锈钢取样器钻取 0~20 cm 土壤 5 份, 混合后制成 1 份植烟前土壤样品。在采收后, 分小区按五点取样法原则, 用不锈钢取样器钻取 0~20 cm 土壤, 每小区 5 份制成该小区混合样品。

1.4.2 烟叶取样。烟草成熟后, 分小区采收成熟烟叶进烤房烘烤。待烘烤结束后, 按照 42 级分级标准, 取各个小区 X2F、C3F、B2F 靠后烟叶各 1 kg, 去主脉粉碎后装入样品袋中备用。

1.5 样品分析

1.5.1 土壤检测。pH 按照 NY/T 1121.2—2006 测定, 有机质按照 NY/T 1121.6—2006 测定, 水解性氮按照 LY/T 1228—2015 测定, 有效磷按照 NY/T 1121.7—2014 测定, 速效钾按照 NY/T 889—2004 测定, 有效硅按照 NY/T 1121.15—2006 测定, 交换性钙按照 NY/T 1121.13—2006 测定, 总镉、总砷按照 HJ 803—2016 测定, 总汞按照 GB/T 22105.1—2008 测定,

有效镉按照 GB/T 23739—2009 测定^[15-24]。

1.5.2 烟叶检测。镉、砷按照 YC/T 380—2010 测定, 汞按照 YC/T 250—2008 测定^[25-26]。

1.6 数据分析 采用 Excel 2010 对数据进行初步运算和绘制图表, 利用 SPSS 21.0 统计分析软件对数据进行方差分析和相关性分析, 在 0.05 水平下用最小显著差异法 (LSD) 分析所有数据之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤理化性质的影响 以矿物基土壤调理剂为核心的不同处理条件对土壤理化性质的影响见表 1。从表 1 可以看出, 土壤 pH 除处理③外, 其余的处理均较对照组有所升高, 其中处理①增幅最大; 矿物基土壤调理剂富含氧化钙、二氧化硅等物质, 且呈碱性 (pH 9~11), 因此, 施入土壤后会增加土壤 pH^[27-28]。土壤中水解性氮含量处理①和处理③均高于对照组, 其中处理③最高, 达 446.27 mg/kg; 土壤中有效磷含量只有处理①高于对照组, 其余均低于对照组, 其中处理④有效磷含量为 96.10 mg/kg, 比对照组低 19.13 mg/kg; 土壤中速效钾含量处理①和处理③均高于对照组, 其中处理①含量最高, 达 897 mg/kg; 土壤中有机质含量处理①和处理③均高于对照组; 土壤中有效硅含量 4 个处理组均高于对照组, 其中处理③有效硅含量最高, 为 603 mg/kg; 土壤中交换性钙 4 个处理组均高于对照组, 其中处理③交换性钙含量最高, 为 3 322 mg/kg; 处理③(矿物基土壤调理剂+有机硅)在土壤水解氮、有机质、有效硅和交换性钙含量均为最大值; 处理②(矿物基土壤调理剂+深翻耕)和处理④(矿物基土壤调理剂+有机硅+深翻耕)的水解性氮、有效磷、速效钾和有机质含量 4 个指标均低于对照组。

表 1 不同处理条件对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatment conditions on soil physical and chemical properties

处理 Treatment	pH		水解性氮 Hydrolysable nitrogen//mg/kg		有效磷 Available phosphorus mg/kg		速效钾 Rapidly available potassium//mg/kg		有机质 Organic matter g/kg		有效硅 Available silicon mg/kg		交换性钙 Exchangeable calcium//mg/kg	
	数值 Data	增幅 Increase rate	含量 Content	增幅 Increase rate	含量 Content	增幅 Increase rate	含量 Content	增幅 Increase rate	含量 Content	增幅 Increase rate	含量 Content	增幅 Increase rate	含量 Content	增幅 Increase rate
①	7.12	0.16	208.40	7.07	116.23	1.00	897	67	53.37	0.64	529	132	2 967	581
②	7.02	0.06	177.60	-23.73	101.20	-14.03	533	-297	45.57	-7.16	545	148	2 885	499
③	6.91	-0.05	446.27	244.94	114.83	-0.40	844	14	54.90	2.17	603	206	3 322	936
④	7.09	0.13	183.07	-18.26	96.10	-19.13	566	-264	45.67	-7.06	580	183	2 871	485
对照 CK	6.96		201.33		115.23		830		52.73		397		2 386	

2.2 不同处理对烟叶重金属含量的影响

2.2.1 不同处理对烟叶下部叶重金属含量的影响。以矿物基土壤调理剂为核心的不同处理条件对烟叶下部叶中重金属含量的影响见表 2。由表 2 可知, 下部叶中 As 含量处理②和处理④低于对照组, 各处理间 As 含量从高到低排序为处理①>处理③>对照>处理④>处理②; 4 个处理组下部叶中 Cd 含量均低于对照组, 其中处理②较对照组降低 17.10%, 各

处理间 Cd 含量从高到低排序为对照>处理④>处理①>处理③>处理②; 各处理间 Hg 含量均较低, 其中处理①、处理②和处理③较对照组均降低 20.00%。

2.2.2 不同处理对烟叶中部叶重金属含量的影响。以矿物基土壤调理剂为核心的不同处理条件对烟叶中部叶中重金属含量的影响见表 3。由表 3 可知, 烟叶中部叶中 As 含量除处理③外, 其余均低于对照组, 各处理间 Cd 含量从高到低为

对照=处理③>处理④>处理①>处理②,其中处理②较对照组降低 26.03%,处理①降低 19.18%;4个处理组中部叶中 Cd 含量均低于对照组,其中处理②降低 26.83%,各处理间 Cd

含量从高到低为对照>处理④>处理③>处理①>处理②;4个处理组中部叶中 Hg 含量均低于对照组,其中处理②降幅最大,为 37.50%。

表 2 不同处理条件烟叶下部叶中重金属含量

Table 2 Contents of heavy metals in lower leaves of tobacco leaves under different treatment conditions

处理 Treatment	As		Cd		Hg	
	含量 Content//mg/kg	与 CK± %	含量 Content//mg/kg	与 CK± %	含量 Content//mg/kg	与 CK± %
①	1.45	12.40	12.67	-6.63	0.04	-20.00
②	1.23	-4.65	11.25	-17.10	0.04	-20.00
③	1.33	3.10	12.47	-8.11	0.04	-20.00
④	1.28	-0.78	12.83	-5.45	0.05	0.00
对照 CK	1.29		13.57		0.05	

表 3 不同处理烟叶中部叶重金属含量

Table 3 Contents of heavy metals in middle leaves of tobacco leaves under different treatments

处理 Treatment	As		Cd		Hg	
	含量 Content//mg/kg	与 CK± %	含量 Content//mg/kg	与 CK± %	含量 Content//mg/kg	与 CK± %
①	0.59	-19.18	9.08	-15.69	0.07	-12.50
②	0.54	-26.03	7.88	-26.83	0.05	-37.50
③	0.73	0.00	9.36	-13.09	0.06	-25.00
④	0.66	-9.59	10.22	-5.11	0.06	-25.00
对照 CK	0.73		10.77		0.08	

2.2.3 不同处理对烟叶上部叶重金属含量的影响。以矿物基土壤调理剂为核心的不同处理条件对烟叶上部叶中重金属含量的影响见表 4。由表 4 可知,上部叶中 As 含量除处理④,其余均低于对照组,其中处理②降幅最大,为 60.00%,其

次为处理①,降幅为 55.56%;上部叶中 Cd 含量除处理④,其余均低于对照组,处理②降幅最大,为 52.72%,其次为处理①,降幅为 51.46%;上部叶中 Hg 含量整体较低,处理①和处理③降幅均为 50.00%。

表 4 不同处理烟叶上部叶重金属含量

Table 4 Contents of heavy metals in upper leaves of tobacco leaves under different treatments

处理 Treatment	As		Cd		Hg	
	含量 Content//mg/kg	与 CK± %	含量 Content//mg/kg	与 CK± %	含量 Content//mg/kg	与 CK± %
①	0.20	-55.56	2.32	-51.46	0.01	-50.00
②	0.18	-60.00	2.26	-52.72	0.02	0.00
③	0.34	-24.44	3.10	-35.15	0.01	-50.00
④	0.82	82.22	7.15	49.58	0.02	0.00
对照 CK	0.45		4.78		0.02	

上述研究结果表明,矿物基土壤调理剂的施用大幅降低了烟叶中重金属含量。以黏土矿物材料生产的土壤调理剂比表面积大,其结构层带电荷,通过吸附、配位反应以及共沉淀反应等作用,可降低土壤中重金属离子的活性,从而降低对作物的毒害,起到改良土壤、提升烟叶品质的作用^[29-33]。

2.3 不同处理对土壤重金属含量的影响 不同处理对土壤重金属含量的影响如表 5 所示。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)^[34],土壤中总砷含量均处于高于土壤污染筛选值、低于风险管控值,处理①、处理②和处理③均相对于对照组总砷含量有所降低,其中处理②总砷含量最低,为 51.27 mg/kg,其降幅最大,为 23.13%;土壤中总汞含量均低于土壤污染筛选值,处理②和处理③较对照组总汞含量有所升高;土壤中总镉含量均

高于土壤污染筛选值,其中处理①、处理③和对照均高于风险管控值,4个处理相较于对照组总镉含量均有所降低,总镉含量从高到低依次为对照>处理③>处理①>处理②>处理④,其中处理④降幅最大,为 27.56%,其次为处理②,降幅为 21.58%;4个处理组土壤中有效镉含量均低于对照组,有效镉含量从高到低依次为对照>处理①>处理③>处理②>处理④,其中处理④降幅最大,为 39.72%,其次是处理②,降幅为 34.75%。

3 结论

(1)矿物基土壤调理剂能有效改良土壤理化性质,土壤 pH 在一定程度得到提高,处理①(7 500 kg/hm² 基施土壤调理剂)和处理③(7 500 kg/hm² 基施土壤调理剂+有机硅)的模式能很大程度改善土壤理化性质,处理②(7 500 kg/hm²

基施土壤调理剂+深翻耕)和处理④(7 500 kg/hm² 基施土壤调理剂+有机硅+深翻耕)在加上深翻耕操作后,土壤水解性氮、有效磷、速效钾和有机质含量都大幅度降低;同时矿物基

土壤调理剂能有效降低土壤重金属含量,其中对镉最明显,处理②和处理④总镉降幅均超过了 20%,有效镉降幅均超过了 30%,其中处理④有效镉降幅高达 39.72%。

表 5 不同处理土壤重金属含量

Table 5 Contents of heavy metals in soils under different treatments

处理 Treatment	总砷 Total arsenic		总汞 Total mercury		总镉 Total cadmium		有效镉 Available cadmium	
	含量 Content mg/kg	与 CK± %	含量 Content mg/kg	与 CK± %	含量 Content mg/kg	与 CK± %	含量 Content mg/kg	与 CK± %
①	60.80	-8.85	0.02	-75.00	4.54	-2.99	1.25	-11.35
②	51.27	-23.13	0.22	175.00	3.67	-21.58	0.92	-34.75
③	62.70	-6.00	0.21	162.50	4.64	-0.85	1.11	-21.28
④	75.63	13.39	0.05	-37.50	3.39	-27.56	0.85	-39.72
对照 CK	66.70		0.08		4.68		1.41	

(2)以矿物基土壤调理剂为核心的不同模式处理土壤后,烟叶中重金属含量都在一定程度上有所降低,其中以中部叶效果最为明显,且处理②(7 500 kg/hm² 矿物基土壤调理剂+深翻耕)在烟叶 As、Cd 和 Hg 含量的降幅均是最大值,提升了烟叶品质。

(3)处理②(7 500 kg/hm² 矿物基土壤调理剂+深翻耕)综合表现最好,上、中、下部叶重金属大部分均有效降低,可考虑在后续生产实践中于轻中度镉砷污染烟地上施用 7 500 kg/hm² 矿物基土壤调理剂,配合深耕操作,既可以提高土壤 pH 改良土壤理化性状,又能降低烟草植株对镉的吸收,起到提质增效的作用。

参考文献

[1] 郎思曼,王龙宪,许自成,等.烟草对重金属的吸收分布特征及影响因素研究综述[J].江西农业学报,2012,24(11):93-99.

[2] 易艳梅,张帆,张春霞.卷烟重金属残留及其防控研究进展[J].安徽农业科学,2018,46(10):42-45.

[3] 张建云,吴胜春,王敏艳,等.烟秆炭修复重金属污染土壤的效应及对烟草生长的影响[J].浙江农林大学学报,2018,35(4):674-683.

[4] 朱茂祥,谢剑平,赵明月,等.关注吸烟与健康 降低卷烟危害[C]//周光召.全面建设小康社会:中国科技工作者的历史责任——中国科协 2003 年学术年会论文集(下).北京:中国科学技术出版社,2003.

[5] 张齐锋,夏汉平,李志安,等.牧草对重金属污染土壤的植物修复综述[J].生态学杂志,2009,28(8):1640-1646.

[6] 赵铭.土壤重金属污染现状、原因、危害及修复研究[J].资源节约与环境,2016(4):181,184.

[7] LI X N, JIAO W T, XIAO R B, et al. Soil pollution and site remediation policies in China: A review[J]. Environmental reviews, 2015, 23(3): 263-274.

[8] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. Environmental science & technology, 2015, 49(2): 750-759.

[9] CHENG J Z, LI Y L, GAO W C, et al. Effects of biochar on Cd and Pb mobility and microbial community composition in a calcareous soil planted with tobacco[J]. Biology & fertility of soils, 2018, 54(3): 373-383.

[10] 王毅,王艺,王恩德.改性蒙脱石吸附 Pb²⁺、Hg²⁺ 的实验研究[J].岩石矿物学杂志,2001,20(4):565-567.

[11] 王苏新.麦饭石特性及作用分析[J].江苏陶瓷,2003,36(1):1-2.

[12] 苏红.硅肥在农业中的应用[J].农业开发与装备,2015(4):135.

[13] 娄燕宏,诸葛玉平,顾继光,等.粘土矿物修复土壤重金属污染的研究进展[J].山东农业科学,2008,40(2):68-72.

[14] 曹正海,赖学明,张振兴,等.活化改性矿物基土壤调理剂的研发及产业化——(III)中试与应用研究[J].中国高科技,2018(12):3-6.

[15] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第 2 部分:土壤 pH 的测定:NY/T 1121.2—2006[S].北京:中国农业出版社,2006.

[16] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定:NY/T 1121.6—2006[S].北京:中国农业出版社,2006.

[17] 国家林业局.森林土壤氮的测定:LY/T 1228—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.

[18] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第 7 部分:土壤有效磷的测定:NY/T 1121.7—2014[S].北京:中国农业出版社,2015.

[19] 中华人民共和国农业部.土壤速效钾和缓效钾含量的测定:NY/T 889—2004[S].北京:中国农业出版社,2005.

[20] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第 15 部分:土壤有效硅的测定:NY/T 1121.15—2006[S].北京:中国农业出版社,2006.

[21] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第 13 部分:土壤交换性钙和镁的测定:NY/T 1121.13—2006[S].北京:中国农业出版社,2006.

[22] 中华人民共和国环境保护部.土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法:HJ 803—2016[S].北京:中国环境科学出版社,2016.

[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定:GB/T 22105.1—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法:GB/T 23739—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.

[25] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品 铬、镍、砷、硒、镉、铅的测定 电感耦合等离子体质谱法:YC/T 380—2010[S].北京:中国标准出版社,2011.

[26] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品 汞、砷、铅含量的测定 氢化物原子荧光光度法:YC/T 250—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

[27] 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.

[28] 李耀奇,谷雨,李明德,等.4 种土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J].湖南农业科学,2019(11):65-68.

[29] 钟楚彬,曹正海,王杨,等.活化改性矿物基土壤调理剂的研发及产业化——(I)材料制备与产品特性[J].中国高科技,2018(10):11-14.

[30] 熊孜,刘耀地.活化改性矿物基材料在土壤修复中的应用[J].中国高科技,2018(12):27-34.

[31] 刘丽娟.不同改良剂对镉污染土壤的修复作用及其机理研究[D].南京:南京农业大学,2012.

[32] 李心,林大松,刘岩,等.不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1511-1520.

[33] 吕巨智,程伟东,钟昌松,等.不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J].中国农学通报,2014,30(30):38-43.

[34] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.