

赵家印,杨欣悦,席运官,等. 2种钝化剂对土壤重金属Cu、Cd有效性及植物累积的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(13):308-313.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.13.061

## 2种钝化剂对土壤重金属Cu、Cd有效性及植物累积的影响

赵家印<sup>1</sup>,杨欣悦<sup>1</sup>,席运官<sup>1</sup>,高丽<sup>1</sup>,和丽萍<sup>2</sup>,李丽娜<sup>2</sup>,杨涛明<sup>2</sup>

(1.生态环境部南京环境科学研究所,江苏南京210042;2.云南省环境科学研究院,云南昆明650000)

**摘要:**为比较碳酸钙、生石灰作为钝化剂对土壤改良的效果,通过盆栽试验开展了不同施加量的碳酸钙、生石灰对铜(Cu)和镉(Cd)污染土壤重金属有效态及植物富集影响的比较研究。研究表明:(1)碳酸钙、生石灰均能提高土壤pH值和降低土壤Cu和Cd有效性。(2)碳酸钙、生石灰均降低芥蓝Cd含量,其中以0.1%添加量的碳酸钙、0.072%的生石灰处理组Cd含量最低;但提高了芥蓝Cu的含量。(3)低剂量的碳酸钙、生石灰可提高芥蓝生物量,其中0.1%添加量的碳酸钙、0.06%的石灰最佳。但生石灰剂量继续增加,芥蓝生物量会降低。

**关键词:**钝化剂;生石灰;碳酸钙;重金属污染;土壤

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)13-0308-06

我国土壤重金属污染问题相当普遍。然而由于耕地资源紧缺,许多土壤重金属污染地区仍开展农业生产活动。重金属易随农产品进入食物链,致

使居民重金属暴露风险增加,威胁人类健康<sup>[1-2]</sup>。据统计,中国每年有超过1 000万t的农产品重金属含量超标<sup>[3]</sup>。因此,重金属污染农田修复与农产品安全问题备受关注。

添加钝化剂是目前重金属污染土壤修复的研究热点<sup>[4]</sup>。常见的钝化材料主要有生石灰、钙镁磷肥、硅肥、海泡石、白云石和生物炭等<sup>[5-8]</sup>。其中,生石灰的来源最为广泛,容易被获取,常用于重金属污染农田的修复<sup>[5-9]</sup>,但生石灰易于与水发生激烈化学反应,产生大量热能,杀死土壤微生物,甚至可

收稿日期:2019-08-22

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2014BAK19B01);有机农业-土壤-水质耦合的土壤修复关键技术与应用示范(编号:YNZDZB[2017]002)。

作者简介:赵家印(1990—),男,安徽宿州人,硕士,研究方向为重金属污染土壤修复。E-mail:zjyofrc@126.com。

通信作者:席运官,博士,研究员,主要研究方向为重金属污染土壤修复。E-mail:xyg@nies.org。

道)、村(社区)环保专岗,确保畜禽污染管理有人员支撑、有物资保障、有法规基础;提高社会环保意识,形成养殖经营主体自知自觉守规矩、社会大众齐心协力抓监督的机制。

### 参考文献:

- [1]翁伯琦,雷锦桂,江枝和,等.集约化畜牧业污染现状分析及资源化循环利用对策思考[J].农业环境科学学报,2010,29(增刊1):294-299.
- [2]张录强.我国农业生态系统营养循环链的断裂与重建[J].生态经济,2006(2):103-105.
- [3]曲萍,李萍萍.食用菌可持续农业生态系统分析研究[J].农机化研究,2005(3):87-88.
- [4]包维卿,刘继军,安捷,等.中国畜禽粪便资源量评估的排泄系数取值[J].中国农业大学学报,2018,23(5):1-14.
- [5]李丹阳,孙少泽,马若男,等.山西省畜禽粪污年产生量估算及环

境效应[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):480-486.

- [6]黄红英,常志州,叶小梅,等.区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析——以江苏为例[J].江苏农业学报,2013,29(4):777-783.
- [7]王平.南通市畜禽粪便排放量与农田负荷量分析[J].环境科学与工程,2016(5):134-137.
- [8]辽宁省农业科学院.农作物生产技术手册[M].沈阳:辽宁省科学技术出版社,1980.
- [9]杨飞,杨世琦,诸云强,等.中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J].农业工程学报,2013,29(5):1-11.
- [10]陈振楼,许世远,许启新,等.长江三角洲地表水环境污染规律及调控对策[J].长江流域资源与环境,2001,10(4):353-359.
- [11]杨世琦,韩瑞芸,刘晨峰.中国畜禽粪便磷的农田消纳量及承载负荷研究[J].中国农学通报,2016,32(32):111-116.
- [12]刘晓东,王秀斌,李书田.中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析[J].农业环境科学学报,2019,38(11):2594-2608.

能发生“烧苗”现象<sup>[9]</sup>。为克服生石灰改良土壤的缺点,本研究选择不用经过煅烧、化学性质更缓和的碳酸钙作为钝化剂,通过盆栽试验对比不同剂量碳酸钙、生石灰配施有机肥对土壤铜(Cu)、镉(Cd)有效性及其在芥蓝中的累积影响,以期为重金属污染的酸性土壤改良选择更合适的钝化剂。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

土壤采自云南省昆明市农田土壤(0~20 cm),经风干、磨碎、过筛(5目)后用于盆栽。经检测,该地区土壤重金属 Cu、Cd 含量超过土壤风险筛选值(有效态含量分别为 8.93、0.191 mg/kg),土壤其他基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

测量指标	数据
pH 值	6.23
有机质含量(g/kg)	30.50
全氮含量(g/kg)	1.81
全磷含量(g/kg)	1.73
土壤重金属全量含量(mg/kg)	
铜	122.00
镉	0.62
锌	112.00
铅	28.90
镍	36.70
砷	28.60
汞	0.058
铬	90.50

试验用碳酸钙购于灵寿县华辰矿产品贸易有限公司,生石灰购于分宜县英歌矿物有限公司。试验用有机肥购于江阴市联合生物科技有限公司(pH 值为 8.1,总氮含量为 22.4 g/kg,总磷含量为 25.7 g/kg,总钾含量为 20.5 g/kg)。试验用芥蓝购于仪征江扬有机农场,培育 10 d 后用于盆栽。

### 1.2 试验过程

试验共设置 11 个处理(表 2),每组碳酸钙与生石灰的用量,是以理论上 60% 生石灰用量调节 pH 值能力相当于 100% 碳酸钙计算的。每组 3 个平行。将添加物质与土充分混匀后装入聚丙烯(PP)花盆中(盆直径 17 cm、高 12 cm,装 1.75 kg/盆),平衡 20 d。2018 年 3 月 28 日,选择植株大小相等、生长状况相似的培育 10 d 的芥蓝幼苗移栽到盆中,置于温室(自然光照,环境温度 20~35℃)中培养,定

表 2 盆栽试验处理组设计

处理组	添加物质及添加量
M	1% 有机肥
CM1	1% 有机肥 + 0.08% 碳酸钙
CM2	1% 有机肥 + 0.10% 碳酸钙
CM3	1% 有机肥 + 0.12% 碳酸钙
CM4	1% 有机肥 + 0.20% 碳酸钙
CM5	1% 有机肥 + 0.30% 碳酸钙
HM1	1% 有机肥 + 0.048% 生石灰
HM2	1% 有机肥 + 0.060% 生石灰
HM3	1% 有机肥 + 0.072% 生石灰
HM4	1% 有机肥 + 0.120% 生石灰
HM5	1% 有机肥 + 0.180% 生石灰

期观察植株长势,根据盆中缺水情况,补充自来水。

### 1.3 样品采集和分析

在 70 d 时采集 0~12 cm 处土壤样品,样品采集后风干、粉碎、过 20 目和 100 目筛待测。70 d 时收集植物样品。将盆内植物与土一起移出,并用手将土轻轻捏碎,最大可能保存其根系完整将植物清洗干净、测量生物量。植物分地上和地下 2 部分,杀青(105℃,1 h)、烘干(60℃,72 h)、粉碎成均匀样品,颗粒度不大于 0.425 mm,备用。样品采集后测量其含水率。

植物 Cu 和 Cd 的测定采用硝酸-高氯酸消解-原子吸收光谱法(Cu:GB 5009.13—2017;Cd:GB 5009.15—2014)。土壤重金属有效态 Cu 和 Cd 的测定采用二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法(Cu:GB/T 17138—1997;Cd:GB/T 17141—1997)。

### 1.4 数据分析和处理

试验数据经 Microsoft Excel 2007 软件整理,运用 SPSS for Windows 20.0 统计分析,Duncan's 法进行单因素方差分析和相关性分析,数据以平均值表示。

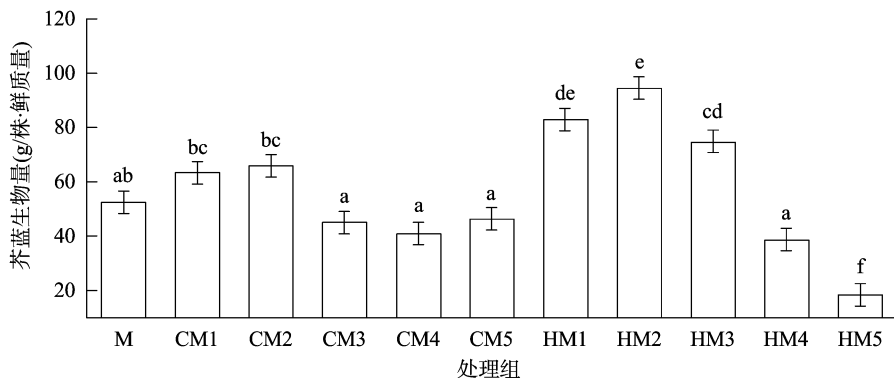
## 2 结果与分析

### 2.1 碳酸钙、生石灰配施有机肥对芥蓝生物量的影响

从图 1 可以看出,碳酸钙和石灰影响了芥蓝生物量。对于碳酸钙来说,CM1 和 CM2 处理组芥蓝生物量高于 M 处理组 20.1%~25.3%,而 CM3~CM5 处理组芥蓝略低于 M 处理组,但差异不显著。对于生石灰来说,HM1~HM3 处理组芥蓝生物量显著高于 M 处理组 45.1%~79.6%,其中 HM2 处理组最

高,但随着生石灰的增多,芥蓝生物量逐渐降低, HM5 处理组生物量最低,低于 M 处理组 74.6%。相关研究认为,低剂量的碳酸钙和生石灰输入土壤能够促进作物生长,提高作物生物量<sup>[10]</sup>。崔红标等在 Cu、Cd 污染土壤中添加生石灰,巨菌草的生物量显著增加<sup>[11]</sup>。在土壤中施用 1.2 g/kg 的生石灰后,甘蔗的产量显著提高,当生石灰用量进一步增加,甘蔗生物量随之下降<sup>[12]</sup>。在 Cu、Zn 污染土壤中施加生石灰,小白菜生物量显著增加<sup>[13]</sup>。然而当生石灰施加量增加时,芥蓝生长受到显著抑制,生物量

急剧降低。其原因可能在于生石灰施用较多会降低土壤营养元素的可利用性,进而抑制作物生长<sup>[14]</sup>。此外,相关研究认为,生石灰持效性较短,大量或长期施用生石灰容易破坏土壤团粒结构,形成生石灰性板结田,肥力下降而导致作物减产<sup>[12,15-16]</sup>。生石灰撒入土壤中因其产生大量的热及生成强碱类物质氢氧化钙,能够杀死土壤微生物。而碳酸钙尚无导致作物减产的相关报道,可能是因其难溶于水,施入土壤不会产生热,对土壤损害较小。



注:不同小写字母表示处理间差异显著, ( $P < 0.05$ )。图2~图4同。

图1 不同处理芥蓝地上部生物量的比较

## 2.2 不同用量碳酸钙、生石灰配施有机肥对土壤 pH 值的影响

从图 2 可以看出,与单施有机肥相比,配施处理土壤 pH 值提高了 0.03 ~ 0.50,其中,碳酸钙、有机肥配施处理组土壤 pH 值提高了 0.03 ~ 0.43, HM 处理组土壤 pH 值提高了 0.16 ~ 0.50。表明生石灰的添加量为碳酸钙添加量的 60% 时,二者调节土壤 pH 值效果类似。其他研究也有类似发现,如施加 4 500 kg/hm<sup>2</sup> 碳酸钙和 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 生石灰,土壤 pH 值无显著差异<sup>[9]</sup>。

其原因在于消耗相同量的  $[H]^+$  二者所需的摩尔数相同,而生石灰(主要成分为 CaO)的摩尔质量

仅为碳酸钙的 60%。另一方面,碳酸钙处理组的  $[OH]^-$  是由碳酸根水解产生,而生石灰处理组的  $[OH]^-$  是氧化钙与水反应产生,后者对土壤 pH 值的影响更为明显<sup>[17-18]</sup>。此外,碳酸钙添加量从 0.08% 提高到 0.12%,土壤 pH 值提高了 0.39,添加量从 0.12% 提高到 0.30%,土壤 pH 值无显著增加。与之类似,生石灰添加量从 0.048% 提高到 0.072%,土壤 pH 值提高了 0.20,添加量从 0.072% 提高到 0.180%,土壤 pH 值增加不显著。表明低剂量生石灰和碳酸钙对土壤 pH 值影响较为敏感。值得注意的是 CM4 处理组土壤 pH 值的增加值显著低于 CM3, HM4 土壤 pH 值的增加值显著低于 HM3。

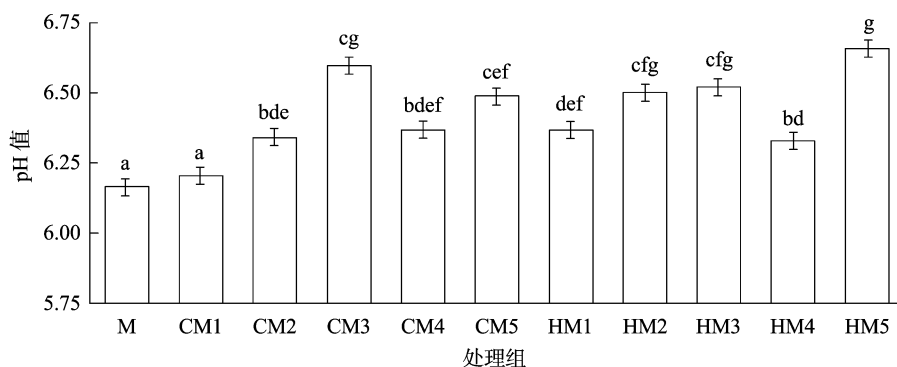


图2 不同处理土壤 pH 值比较

其原因可能在于石灰类改良剂施用量到达一定程度短期造成土壤营养元素平衡失调,导致土壤复酸化,但随着碳酸钙和石灰用量增加,它们提高土壤 pH 值能力大于复酸化能力<sup>[19-21]</sup>。

### 2.3 碳酸钙、生石灰配施有机肥对土壤 Cu、Cd 有效性的影响

从图 3 可以看出,土壤有效态重金属含量 70 d 时,配施处理组土壤有效态 Cu、Cd 含量显著低于 M 处理组,其中 CM 处理组土壤有效态 Cu、Cd 含量分

别降低了 6.16% ~ 20.3%、1.47% ~ 19.3%,HM 处理组分别降低了 3.16% ~ 26.70%、0.49% ~ 29.90%。表明在碳酸钙添加量为 0.08% ~ 0.30% 和生石灰添加量为 0.048% ~ 0.18% 时,二者钝化土壤重金属能力相似。对于碳酸钙来说,平均土壤有效态 Cu、Cd 含量均以 CM2 处理组最低,但处理组之间差异不显著。石灰处理组土壤平均有效态 Cu、Cd 含量均以 HM5 最低,其次为 HM3,处理组之间亦差异不显著(除 HM5 外)。

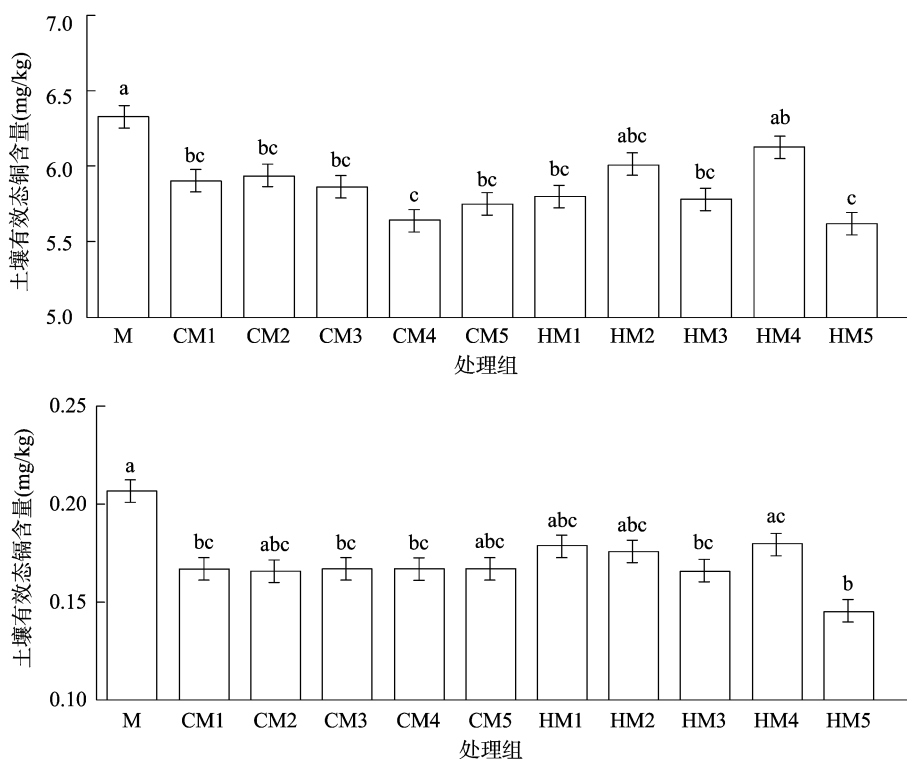


图3 不同处理土壤有效态重金属含量比较

### 2.4 碳酸钙、生石灰配施有机肥对芥蓝地上部重金属含量的影响

从图 4 可以看出,芥蓝地上部配施处理组芥蓝地上部 Cu 含量均高于单施有机肥处理组。其中,CM 处理组芥蓝地上部 Cu 含量提高了 12.5% ~ 38.0%,HM 处理组提高了 9.61% ~ 49.3% (图 4 - A)。其他研究也有类似报道,如生石灰配施海泡石水稻植株 Cu 含量有所增加,施用生石灰提高了蔬菜中 Cu 的累积<sup>[14,22]</sup>。其原因可能是 Cu 是植物生长的必需元素,碳酸钙、石灰提高了芥蓝生物量,也就提高了芥蓝对营养元素 Cu 的需求。与此同时,碳酸钙和生石灰添加量不同,芥蓝地上部 Cu 含量不同。CM2 和 CM5 处理组芥蓝地上部 Cu 含量低于其他碳酸钙施加量处理组,但差异不显著。

HM2 和 HM3 处理组芥蓝地上部 Cu 含量低于其他石灰施加量处理组,但处理间除 HM4 外差异不显著。

配施处理组芥蓝地上部 Cd 含量总体低于 M 处理组,碳酸钙、生石灰(除 HM4)分别降低了芥蓝 Cd 含量 5.85% ~ 22.10%、6.25% ~ 28.70%,表明碳酸钙、石灰添加均可抑制芥蓝地上部 Cd 累积(图 4 - B)。郭利敏等向土壤中施加 3.9 ~ 15.6 t/hm<sup>2</sup> 的氧化钙,小白菜地上部 Cd 含量显著降低 15.81% ~ 31.00%,施加 1.25 ~ 6.00 t/hm<sup>2</sup> 的氧化钙,小白菜地上部 Cd 浓度降低了 5.32% ~ 41.30%<sup>[23-25]</sup>。施加碳酸钙、生石灰通过改变土壤 Cd 的赋存形态,降低 Cd 的植物有效性,抑制作物 Cd 吸收<sup>[26-28]</sup>。其次,生石灰、碳酸钙均提高了土壤

$\text{Ca}^{2+}$  浓度,加强了与植物根系细胞上的  $\text{Cd}^{2+}$  吸收点位和离子通道的竞争,降低植物 Cd 富集<sup>[29-30]</sup>。碳酸钙、生石灰添加量不同,芥蓝地上部 Cd 含量不同。CM2 处理组芥蓝地上部 Cd 含量低于碳酸钙处理组, HM3 处理组芥蓝地上部 Cd 含量低于其他石灰处理组,表明当碳酸钙、生石灰的添加量分别为 0.10%、0.072%,二者抑制芥蓝 Cd 累积效果最好。此外,值得注意的是 CM3 处理组芥蓝地上部 Cd 含量显著高于 CM2 处理组,而 CM2 处理组显著低于

CM1 处理组, HM4 处理组芥蓝地上部 Cd 含量显著高于 HM3 处理组,而 HM3 处理组显著低于 HM2 处理组,即芥蓝 Cd 含量随生石灰或碳酸钙用量增加在一定范围内呈现波动,其原因可能与土壤 pH 值及土壤 Cd 有效性在此范围内的波动有关。刘勇等认为,当施用低剂量碳酸钙或生石灰时,土壤重金属生物活性降低,当剂量进一步增加时,其生物活性反而增加,导致植物重金属累积增加<sup>[30]</sup>。

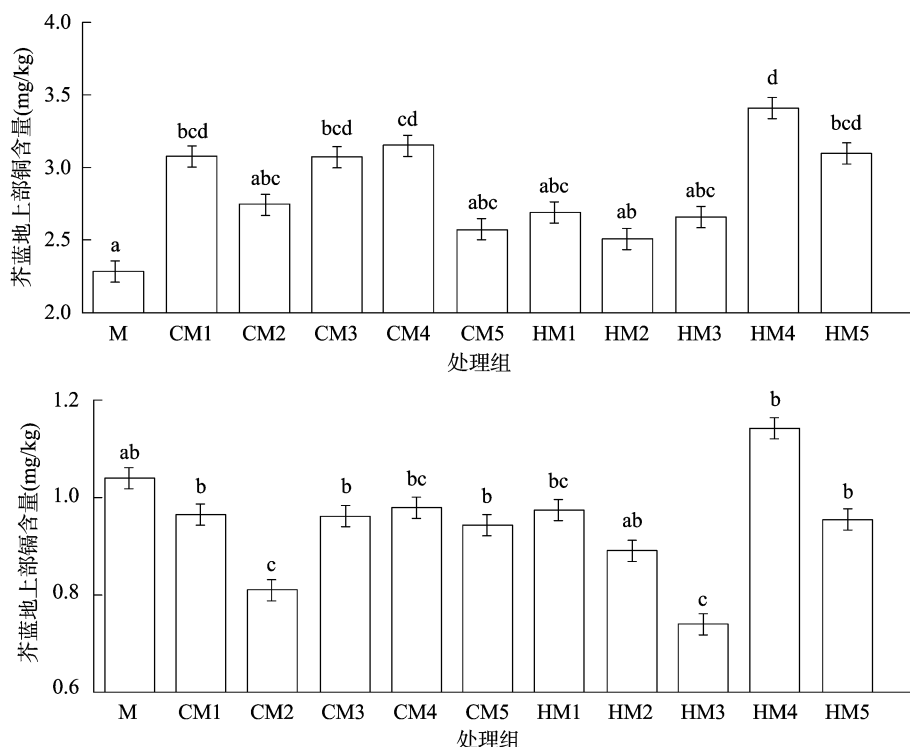


图4 不同处理芥蓝地上部 Cu、Cd 含量比较

综上所述,综合考虑碳酸钙、石灰对芥蓝生物量、土壤 pH 值、土壤有效态 Cu、Cd 浓度及芥蓝地上部重金属累积作用,碳酸钙、生石灰施加量分别以 0.1%、0.072% 施用效果最佳,考虑到前者化学性质更温和,可作为优选的土壤钝化剂。

### 3 结论

施用低剂量的碳酸钙、生石灰均提高芥蓝生物量,施加量分别为 0.10%、0.06% 时,芥蓝生物量最高。生石灰施加量达到 0.18%,则显著抑制芥蓝生长。

碳酸钙、生石灰施加量分别为 0.08% ~ 0.30%、0.048% ~ 0.180% 时,二者提高土壤 pH 值和降低土壤重金属有效性能力相似,其中施加量分

别以 0.1% 和 0.18%、0.072% 效果较好。

碳酸钙、生石灰均能降低芥蓝地上部 Cd 含量,施加量分别以 0.100%、0.072% 抑制效果最好。此外,碳酸钙、生石灰均提高了芥蓝地上部 Cu 含量。

综合本试验结果,以碳酸钙、生石灰作为钝化剂,最佳施用量分别为 0.100%、0.072%。因碳酸钙化学性质更温和,不用经过煅烧,价格低廉,可以替代生石灰作为优选的土壤钝化剂。

### 参考文献:

- [1] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(1): 84-91.
- [2] Li Y S, Hao T, Hu Y X, et al. Enrofloxacin at environmentally

- relevant concentrations enhances uptake and toxicity of cadmium in the earthworm *Eisenia fetida* in farm soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 308: 312–320.
- [3] 张茜. 磷酸盐和生石灰对污染土壤中铜锌的固定作用及其影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [4] 孟莉蓉, 俞浩丹, 杨婷婷, 等. 2 种生物炭对 Pb、Cd 污染土壤的修复效果[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 835–841.
- [5] Gray C W, Dunham S J, Dennis P G, et al. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud[J]. Environmental Pollution, 2006, 142(3): 530–539.
- [6] Cao X D, Ammar W, Ma L, et al. Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soils using phosphate rock and phosphoric acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3): 555–564.
- [7] Zhang G Y, Lin Y Q, Wang M K. Remediation of copper polluted red soils with clay materials[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(3): 461–467.
- [8] 兰天, 张辉, 刘源, 等. 玉米秸秆生物炭对  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$  的吸附特征与机制[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 368–375.
- [9] 李明, 陈宏坪, 王子萱, 等. 石灰钝化法原位修复酸性镉污染菜地土壤[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2864–2873.
- [10] 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.
- [11] 崔红标, 梁家妮, 周静, 等. 磷灰石和生石灰联合巨菌草对重金属污染土壤的改良修复[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1334–1340.
- [12] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 生石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266–269.
- [13] 钱海燕, 王兴祥, 黄国勤, 等. 钙镁磷肥和生石灰对受 Cu、Zn 污染的菜园土壤的改良作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 235–239.
- [14] 蔡轩, 龙新宪, 种云霄, 等. 无机-有机混合改良剂对酸性重金属复合污染土壤的修复效应[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3991–4002.
- [15] 宁皎莹, 周根娣, 周春儿, 等. 农田土壤重金属污染钝化修复技术研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2016, 15(2): 156–162.
- [16] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用生石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 206–213.
- [17] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1241–1249.
- [18] Tang X J, Xia L, Liu X M, et al. Effects of inorganic and organic amendments on the uptake of Lead and trace elements by *Brassica chinensis* grown in an acidic red soil[J]. Chemosphere, 2015, 119: 177–183.
- [19] 孟赐福, 傅庆林, 水建国, 等. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 129.
- [20] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 48–51.
- [21] 刘琼峰, 蒋平, 李志明, 等. 湖南省水稻主产区酸性土壤施用石灰的改良效果[J]. 湖南农业科学, 2014(13): 29–32.
- [22] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 437–444.
- [23] 倪中应, 沈倩, 章明奎. 秸秆还田配施生石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 215–225.
- [24] 倪中应, 石一瑁, 谢国雄, 等. 生石灰降低酸性农田农产品中重金属积累的效果[J]. 现代农业科技, 2018(1): 176–177.
- [25] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对土壤-叶菜系统 Cd 迁移累积的调控作用[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1520–1525.
- [26] Zhao X L, Saigusa M. Fractionation and solubility of cadmium in paddy soils amended with porous hydrated calcium silicate[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(3): 343–347.
- [27] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 值对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1): 81–86.
- [28] 陆素芬, 曹晶潇, 田美玲, 等. 土壤改良剂对污染土壤及栽培蔬菜 Pb、Cd 含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 278–281.
- [29] Guo X F, Wei Z B, Wu Q T, et al. Cadmium and zinc accumulation in maize grain as affected by cultivars and chemical fixation amendments[J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 650–656.
- [30] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1204–1208.
- [31] 刘勇, 刘燕, 朱光旭, 等. 石灰对 Cu、Cd、Pb、Zn 复合污染土壤中重金属化学形态的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(2): 158–164.