

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.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.034

# 不同钝化剂对镉污染黄壤和棕壤的钝化效果

苏金成<sup>1</sup>, 王小兵<sup>1,2</sup>, 汪晓丽<sup>1</sup>, 董君能<sup>1</sup>, 王海潮<sup>1</sup>, Saima Parveen Memon<sup>1</sup>, 冯 彬<sup>1</sup>

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225100; 2. 江苏省有机固废废弃物资源化协同创新中心, 江苏扬州 225100)

**摘要:** 为了解钝化剂对不同性质镉污染土壤的钝化效果, 分别选取模拟镉污染的广西黄壤和江苏棕壤为研究对象。利用盆栽试验研究碳酸钙、硅酸钙、磷酸二氢钙和硫化钠 4 种常见钝化剂对 2 种土壤 pH 值、可交换态镉含量、小麦地上部生物量、籽粒产量和籽粒中镉含量的影响。结果表明, 在 2 种土壤中添加碳酸钙、硅酸钙、硫化钠均可以使土壤 pH 值上升, 而添加磷酸二氢钙的土壤 pH 值降低。从土壤镉的化学形态看, 随着钝化剂添加比例增高, 2 种土壤可交换态镉均呈下降趋势。当 4 种钝化剂添加比例为 2.0% 时, 对广西黄壤的钝化效果由大到小为硫化钠、硅酸钙、磷酸二氢钙、碳酸钙, 钝化率分别为 29.54%、28.11%、24.56%、17.79%, 对江苏棕壤的钝化效果由大到小为硫化钠、磷酸二氢钙、硅酸钙、碳酸钙, 钝化率分别为 28.21%、27.56%、22.76%、13.46%。在广西黄壤中, 钝化剂添加量分别为 0.5%、1.0%、2.0% 时, 硅酸钙处理的小麦地上部生物量、籽粒产量均大于磷酸二氢钙和碳酸钙的处理, 且籽粒中镉含量更低, 硅酸钙添加比例为 2.0% 处理后小麦籽粒中镉含量为 0.06 mg/kg, 低于 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中小麦含镉量的限量(0.1 mg/kg); 在江苏棕壤中, 在钝化剂添加量分别为 0.5%、1.0%、2.0% 时, 磷酸二氢钙处理的小麦地上部生物量、籽粒产量均大于硅酸钙和碳酸钙的处理, 且籽粒中镉含量更低, 磷酸二氢钙添加比例为 2.0% 处理后小麦籽粒中镉含量为 0.08 mg/kg。由于硫化钠对小麦的生长表现出毒害作用, 一般情况下不宜采用。在盆栽条件下, 综合考虑钝化剂对土壤镉的钝化率影响, 以硅酸钙作为镉污染广西黄壤的钝化剂, 以磷酸二氢钙作为镉污染江苏棕壤的钝化剂较好。

**关键词:** 钝化剂; 镉污染; 土壤理化性质; 广西黄壤; 江苏棕壤

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2021)03-0192-06

近年来, 我国土壤重金属污染形势严峻, 污染事件频发, 严重影响农产品质量和人类健康<sup>[1-2]</sup>。据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤环境状况总体不容乐观, 耕地土壤环境质量堪忧, 全国土壤污染总的点位超标率为 16.1%, 污染类型以无机型为主, 无机污染物超标点占全部超标点位的 82.85%。镉(Cd)污染的点位超标率为 7.0%, 位居无机污染物之首<sup>[3-4]</sup>。由于镉具有分解周期长(半衰期超过 20 年)、移动性大、毒性高、难降解等特点, 因此修复镉污染的土壤已成

为急需解决的问题<sup>[5]</sup>。原位钝化技术是一种经济高效的污染治理技术, 符合我国可持续农业发展的需要, 是当前修复农田重金属中轻度污染的较好选择<sup>[6-9]</sup>。硅酸盐、碳酸盐、磷酸盐和硫化物是钝化技术中常用的几类钝化剂, 对其钝化机制已有一定研究<sup>[10]</sup>。硅酸盐可与土壤中重金属镉形成不能被作物吸收的硅酸化合物沉淀, 抑制了重金属在土壤中的转移及植物的吸收<sup>[11]</sup>; 硅酸盐还可以提高土壤 pH 值, 使土壤的吸附能力增强, 降低了镉的交换态与碳酸盐态的含量, 增加了铁锰氧化结合态含量<sup>[12]</sup>。碳酸钙能提高土壤 pH 值, 使土壤中的有机质、铁氧化物等的螯合能力加强, 增强土壤的吸附能力, 从而减少土壤中金属的可溶性<sup>[13]</sup>; 碳酸钙亦具有吸附表面积大、化学结构稳定、阳离子交换能力强等特点<sup>[14]</sup>。含磷化合物在农业上应用已久, 是农作物增产丰收的主要措施之一, 它们对重金属镉的稳定效果也十分明显<sup>[15]</sup>; 付煜恒等研究发现, 在铅、镉复合污染土壤中加入磷酸二氢钙后, 土壤中毒性特征沥滤方法(TCLP)提取态镉浓度的降幅达到 35.18%<sup>[16]</sup>。硫化钠则可解离出硫离子, 硫离子

收稿日期: 2020-05-01

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(17)3043]; 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题(编号: Y20160017); 2018 年太仓市土壤安全利用与修复试点项目(编号: TCGGZY-2018G106); 太仓市重点研发计划(编号: TC2018SF06); 江苏省研究生科研与实践创新计划(编号: XJSJCX19\_090)。

作者简介: 苏金成(1995—), 男, 安徽天长人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤重金属治理与修复。E-mail: 985932106@qq.com。

通信作者: 王小兵, 博士, 副教授, 主要从事农田土壤重金属治理与修复。E-mail: xbwang@yzu.edu.cn。

水解后生成的氢氧根离子能与重金属结合生成氢氧化物,从而降低重金属生物有效性<sup>[17-18]</sup>;曹宇等研究发现,添加硫化钠可明显降低可交换态镉的含量,条件适当时,镉可交换态下降值为 73%<sup>[19]</sup>。酸性土壤和碱性土壤中的重金属镉的化学形态比例不同,钝化剂在不同性质镉污染土壤钝化效果也有所不同。本研究以镉污染广西黄壤和江苏棕壤为研究对象,通过小麦盆栽试验,从化学形态和生物有效性分析不同钝化剂对不同性质土壤的钝化效果,进而筛选出对不同土壤钝化效果较好的钝化剂,

以期对不同性质农田土壤镉污染治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤有 2 种,分别为广西黄壤和江苏棕壤。广西黄壤取自广西壮族自治区某镉污染农田,江苏棕壤取自扬州大学试验农田内。2 种土壤均取自 0~20 cm 的表层土壤,土壤经自然风干后去除杂质,粉碎后过 20 目筛备用。广西黄壤和江苏棕壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

供试土壤	pH 值	有机质含量 (g/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	全氮含量 (g/kg)	全镉含量 (mg/kg)	可交换态镉 含量 (mg/kg)
广西黄壤	6.40	16.61	26.76	93.84	1.32	9.52	2.81
江苏棕壤	8.46	10.42	19.78	76.85	0.97	7.70	3.12

1.1.2 供试钝化材料 所用钝化剂为碳酸钙 ( $\text{CaCO}_3$ )、硅酸钙 ( $\text{CaSiO}_3$ )、磷酸二氢钙 [ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ] 和硫化钠 ( $\text{Na}_2\text{S}$ ),均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.1.3 供试小麦 小麦品种为扬麦 9 号,购自江苏省大华种业集团有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 土壤镉钝化试验 称取 2 kg 过筛后的土壤于 5 L 塑料桶中,分别添加 0.5%、1.0%、2.0% (质量分数) 的碳酸钙、硅酸钙、磷酸二氢钙和硫化钠于塑料桶中,钝化剂以溶液或浊液 (碳酸钙、硅酸钙溶解度较小) 的形式添加。按照土壤饱和持水量的 70% 添加去离子水,添加后对土样进行充分搅拌,通过称质量法来保持土壤水分含量。整个钝化过程持续 45 d,钝化结束后,将土样风干待用,并测定不同处理土壤的 pH 值和镉的形态特征。以不添加钝化剂作空白对照 (CK),每个处理重复 3 次。

1.2.2 盆栽试验 将小麦种子在水中浸泡 10 h,取出种子转移至营养液中,在暗室中催芽 2 d,待种子发芽后转移至人工制造的营养毯上进行生长,5~7 d 后,取根以上部分平均高度达到 5 cm 的植株移植至已钝化处理的土壤中。称取 1 kg 含有 0.5%、1.0%、2.0% 4 种钝化剂的土壤置于小型盆栽中,并用去离子水使土壤含水率稳定在饱和持水量的 70%,2019 年 11 月在扬州大学环境科学与工程学院 6 楼移植小麦植株,每盆移植 2 株小麦植株,生长 10 d 后,移除长势较差的 1 颗植株。以不添加钝化

剂的土壤作空白对照,每个处理重复 3 次。小麦成熟后取样,测定小麦地上部生物量、籽粒产量、籽粒中镉含量。

### 1.3 分析方法

土壤基本理化性质测定采用常规方法<sup>[20]</sup>。土壤 pH 值测定采用玻璃电极法。土壤镉形态 (可交换态、可还原态、可氧化态、残渣态等) 测定采用 BCR 连续提取法。小麦籽粒中镉含量测定先采用  $\text{HNO}_3$  -  $\text{HClO}_4$  联合消煮,再用石墨炉 - 原子吸收光谱法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据分析与处理

分别采用 Excel 2010 进行数据处理,Origin 8.0 进行图表制作,SPSS 16.0 进行数据统计。

## 2 结果与分析

### 2.1 钝化剂对不同土壤 pH 值的影响

不同钝化剂对广西黄壤、江苏棕壤 pH 值的影响如图 1 所示,未添加钝化剂时,广西黄壤的 pH 值为 6.40,呈弱酸性,而江苏棕壤的 pH 值为 8.46,呈微碱性。随着硅酸钙、碳酸钙和硫化钠添加比例的增加,广西黄壤和江苏棕壤的 pH 值不断升高。与 CK (添加量为 0) 相比,添加硅酸钙的量为 2.0% 时,2 种土壤的 pH 值分别提高了 2.62、0.84;添加 0.5% 碳酸钙后,2 种土壤的 pH 值分别提高了 1.17、0.03,继续添加施用量,土壤 pH 值增加趋势不明显。黄擎等的研究结果也表明,土壤 pH 值不会随着钙离子浓度和种植时间而发生显著变化<sup>[22]</sup>。

添加 2.0% 硫化钠后,2 种土壤的 pH 值分别为 10.07、10.53,这可能与硫化钠的水溶液呈强碱性有关,如此高的 pH 值已经不适合小麦生长,且可能会导致土壤盐碱化<sup>[23]</sup>。而添加磷酸二氢钙处理的土壤 pH 值则逐渐减小。这与 Hong 等的试验结果<sup>[24]</sup>相似,这是由于磷酸二氢钙属于酸性肥料,所含钙离子也可使吸附在土壤胶体上的氢离子发生交换解析,从而降低土壤 pH 值。广西黄壤 pH 值受硫化钠影响最大,受磷酸二氢钙影响最小;江苏棕壤 pH 值受磷酸二氢钙影响最大,受碳酸钙影响最小。

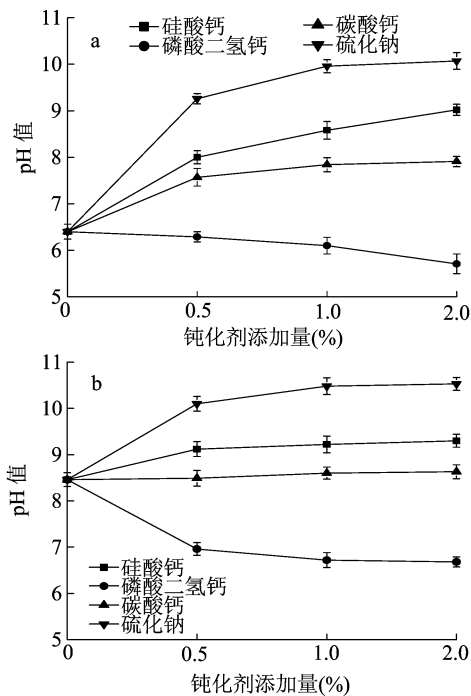


图1 钝化剂处理对广西黄壤(a)、江苏棕壤(b)pH 值的影响

2.2 钝化剂对不同土壤镉形态的影响

采用 BCR 连续提取法可将镉形态分为可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态。一般认为可交换态镉的生物可利用性最高,可还原态和可氧化态次之,而残渣态镉的生物可利用性最差。从表 2 可以看出,未添加钝化剂时,广西黄壤和江苏棕壤的可交换态镉含量较高,分别占土壤总镉含量的 29.52%、40.52%。

表 2 供试土壤各形态镉含量				mg/kg
土壤类型	可交换态 镉含量	可还原态 镉含量	可氧化态 镉含量	残渣态 镉含量
广西黄壤	2.81	1.85	3.42	1.44
江苏棕壤	3.12	1.79	1.31	1.48

根据表 3 可以看出,在广西黄壤中,添加 2.0% 的硅酸钙、磷酸二氢钙、碳酸钙和硫化钠后,各处理

土壤中可交换态镉的含量均显著降低,对镉的钝化效果由大到小依次为硫化钠、硅酸钙、磷酸二氢钙、碳酸钙,钝化率分别为 29.54%、28.11%、24.56%、17.79%,而残渣态镉的含量则明显增加,比未钝化处理的土壤分别提高 111.11%、106.25%、75.69%、59.72%。根据表 4 可以看出,在江苏棕壤中,添加 2.0% 的硅酸钙、磷酸二氢钙、碳酸钙和硫化钠后,各处理土壤中可交换态镉的含量均显著降低,对镉的钝化效果由大到小依次为硫化钠、磷酸二氢钙、硅酸钙、碳酸钙,钝化率分别为 28.21%、27.56%、22.76%、13.46%,而残渣态镉的含量则明显增加,比未钝化处理土壤分别提高 56.76%、53.38%、33.11%、25.68%。

总的来说,所用的 4 种钝化剂中,对镉钝化效果最好的是硫化钠,硫化钠作为一种强碱弱酸盐,溶于水后,解离后的硫离子可与土壤中重金属通过硫化反应生成金属硫化物来降低土壤中镉的有效性<sup>[25]</sup>。广西黄壤中硅酸钙的钝化效果仅次于硫化钠,硅酸钙钝化镉的机制与  $\text{SiO}_3^{2-}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  发生化学反应生成硅酸盐沉淀有关,且  $\text{SiO}_3^{2-}$  水解后产生的  $\text{OH}^-$  能够提高土壤 pH 值,进而促进重金属氢氧化物沉淀的形成。江苏棕壤中磷酸二氢钙的钝化效果仅次于硫化钠,这可能与磷酸盐与镉离子生成磷酸盐沉淀和难溶性羟基金属矿有关<sup>[16]</sup>。有研究表明,土壤环境 pH 值过低可能会对磷酸盐钝化重金属起到抑制作用<sup>[26]</sup>,这可能是磷酸二氢钙钝化效果不及硫化钠的原因之一。碳酸钙的溶解度约为  $1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ,当继续添加用量时,溶出的  $\text{CO}_3^{2-}$  并不明显,从而影响其钝化能力。但碳酸钙仍对土壤表现出一定的钝化能力,这可能是少量溶出的  $\text{CO}_3^{2-}$  水解后产生  $\text{HCO}_3^-$  释放出  $\text{OH}^-$  从而提高了土壤 pH 值;另一方面, $\text{CO}_3^{2-}$  本身也会与  $\text{Cd}^{2+}$  发生络合反应,促进了镉的钝化。虽然添加 4 种钝化剂后 2 种土壤有效态镉含量均下降,但广西黄壤中可交换态镉、可还原态镉以及可氧化态镉含量均下降,残渣态镉含量上升,而江苏棕壤添加钝化剂后,土壤的可交换态镉和可还原态镉含量下降,可氧化镉和残渣态镉含量上升。由此可见,对广西黄壤这种酸性土壤而言,添加钝化剂后,可交换态镉、可还原态镉和可氧化镉均向更稳定的状态转变,生成了更多的残渣态镉,而对偏碱性的江苏棕壤来说,虽然添加钝化剂后可交换态镉和可还原态镉含量降低了,但可氧化态镉含量升高了,说明可氧化态镉难

表 3 钝化剂对广西黄壤镉形态的影响

钝化剂	添加量 (%)	镉含量 (mg/kg)			
		可交换态	可还原态	可氧化态	残渣态
CaSiO <sub>3</sub>	0	2.81 ± 0.09a	1.85 ± 0.11a	3.42 ± 0.16a	1.44 ± 0.17d
	0.5	2.30 ± 0.13b	1.65 ± 0.12b	3.40 ± 0.21a	2.17 ± 0.24c
	1.0	2.18 ± 0.15bc	1.51 ± 0.17b	3.35 ± 0.14ab	2.48 ± 0.13b
	2.0	2.02 ± 0.20c	1.31 ± 0.11c	3.22 ± 0.17b	2.97 ± 0.18a
Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0	2.81 ± 0.09a	1.85 ± 0.11a	3.42 ± 0.16a	1.44 ± 0.17d
	0.5	2.51 ± 0.12b	1.70 ± 0.13b	3.39 ± 0.21ab	1.92 ± 0.11c
	1.0	2.39 ± 0.15b	1.67 ± 0.16b	3.31 ± 0.18ab	2.15 ± 0.25b
	2.0	2.12 ± 0.25c	1.63 ± 0.15b	3.24 ± 0.14b	2.53 ± 0.19a
CaCO <sub>3</sub>	0	2.81 ± 0.09a	1.85 ± 0.11a	3.42 ± 0.16a	1.44 ± 0.17b
	0.5	2.42 ± 0.19b	1.63 ± 0.12b	3.39 ± 0.19a	2.08 ± 0.24a
	1.0	2.35 ± 0.20b	1.61 ± 0.21b	3.33 ± 0.14a	2.23 ± 0.19a
	2.0	2.31 ± 0.18b	1.60 ± 0.22b	3.31 ± 0.12a	2.30 ± 0.21a
Na <sub>2</sub> S	0	2.81 ± 0.09a	1.85 ± 0.11a	3.42 ± 0.16a	1.44 ± 0.17d
	0.5	2.28 ± 0.25b	1.62 ± 0.18b	3.37 ± 0.17a	2.25 ± 0.21c
	1.0	2.16 ± 0.16b	1.53 ± 0.21b	3.32 ± 0.12a	2.51 ± 0.13b
	2.0	1.98 ± 0.19c	1.30 ± 0.12c	3.20 ± 0.11b	3.04 ± 0.15a

注:同列数据后不同小写字母表示同种钝化剂不同添加量处理间差异显著( $P < 0.05$ )。表 4 同。

表 4 钝化剂对江苏棕壤镉形态的影响

钝化剂	添加量 (%)	镉含量 (mg/kg)			
		可交换态	可还原态	可氧化态	残渣态
CaSiO <sub>3</sub>	0	3.12 ± 0.14a	1.79 ± 0.08a	1.31 ± 0.12b	1.48 ± 0.11c
	0.5	2.68 ± 0.18b	1.58 ± 0.15b	1.71 ± 0.13a	1.73 ± 0.12b
	1.0	2.62 ± 0.15b	1.51 ± 0.12b	1.76 ± 0.18a	1.81 ± 0.14b
	2.0	2.41 ± 0.11c	1.47 ± 0.19b	1.85 ± 0.21a	1.97 ± 0.17a
Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0	3.12 ± 0.14a	1.79 ± 0.08a	1.31 ± 0.12b	1.48 ± 0.11c
	0.5	2.54 ± 0.20b	1.48 ± 0.11b	1.81 ± 0.11a	1.87 ± 0.16b
	1.0	2.33 ± 0.16c	1.39 ± 0.17b	1.88 ± 0.16a	2.10 ± 0.13a
	2.0	2.26 ± 0.17c	1.21 ± 0.14c	1.96 ± 0.22a	2.27 ± 0.22a
CaCO <sub>3</sub>	0	3.12 ± 0.14a	1.79 ± 0.08a	1.31 ± 0.12c	1.48 ± 0.11b
	0.5	2.84 ± 0.18b	1.55 ± 0.22b	1.54 ± 0.08b	1.77 ± 0.18a
	1.0	2.79 ± 0.11b	1.50 ± 0.16b	1.59 ± 0.15ab	1.82 ± 0.19a
	2.0	2.70 ± 0.17b	1.46 ± 0.21b	1.68 ± 0.14a	1.86 ± 0.14a
Na <sub>2</sub> S	0	3.12 ± 0.14a	1.79 ± 0.08a	1.31 ± 0.12c	1.48 ± 0.11d
	0.5	2.79 ± 0.16b	1.44 ± 0.22b	1.68 ± 0.16b	1.79 ± 0.23c
	1.0	2.36 ± 0.19c	1.32 ± 0.18bc	1.87 ± 0.14a	2.15 ± 0.16b
	2.0	2.24 ± 0.21c	1.16 ± 0.16c	1.98 ± 0.19a	2.32 ± 0.14a

以向残渣态镉转化,这也导致了硫化钠、硅酸钙和碳酸钙在江苏棕壤上对镉的钝化效果没有广西黄壤的好。由此说明不同 pH 值的土壤对钝化剂的反应是不一样的。

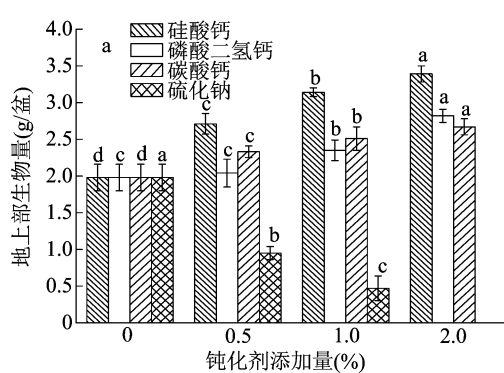
2.3 钝化剂对不同土壤小麦地上部生物量和籽粒产量的影响

2.3.1 钝化剂对不同土壤小麦地上部生物量的影

响 由图 2 可见,磷酸二氢钙、硅酸钙、碳酸钙处理后的小麦地上部生物量随钝化剂的添加量增加而增加,这可能是由于钝化剂降低了土壤中镉的生物有效性,减轻了镉对农作物的毒害作用<sup>[27-28]</sup>。由图 2-a 可见,在广西黄壤中,未添加钝化剂小麦地上部生物量为 1.98 g/盆。硅酸钙对小麦地上部生物量的增加效果最明显,添加 2.0% 硅酸钙后,小麦地上部生

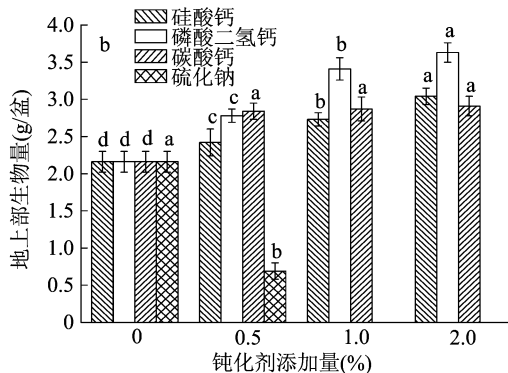
物量比未钝化处理提高了 1.41 g/盆,添加 2.0% 的磷酸二氢钙和碳酸钙分别提高了 0.84、0.69 g/盆,而添加 1.0% 的硫化钠,小麦生长已受到限制,地上部生物量减少了 1.51 g/盆,当硫化钠添加量为 2.0% 时,小麦已无法生长。由图 2-b 可见,在江苏棕壤中,未添加钝化剂小麦地上部生物量为 2.16 g/盆,添加 2.0% 的磷酸二氢钙、硅酸钙、碳酸

钙处理后,小麦地上部生物量比未钝化处理分别提高 1.47、0.88、0.75 g/盆,磷酸二氢钙对小麦地上部生物量的增加最明显,而硫化钠对小麦的生长出现毒害作用,在添加 0.5% 硫化钠处理后小麦地上部生物量降低了 68.69%,而硫化钠添加量达 1.0% 及更高时,小麦已无法生长。



柱上不同小写字母表示同种钝化剂不同添加量间差异显著( $P<0.05$ )。下同

图2 钝化剂对广西黄壤(a)、江苏棕壤(b)小麦地上部生物量的影响



2.3.2 钝化剂对不同土壤小麦籽粒产量的影响 由图 3 可见,磷酸二氢钙、硅酸钙、碳酸钙处理后小麦籽粒产量随钝化剂添加量的增加而增加。由图 3-a 可见,在广西黄壤中,未钝化处理小麦籽粒产量为 0.42 g/盆,添加 2.0% 的硅酸钙、磷酸二氢钙和碳酸钙后小麦籽粒产量分别提高了 0.65、0.50、0.33 g/盆,而添加 0.5% 的硫化钠后籽粒产量减少 0.24 g/盆,当

硫化钠添加量为 1.0% 及更高时小麦籽粒产量为 0,这可能由于硫化钠使得土壤盐分过高导致小麦无法生长<sup>[29]</sup>。由图 3-b 可见,在江苏棕壤中,未钝化处理小麦籽粒产量为 0.51 g/盆,添加 2.0% 的磷酸二氢钙、硅酸钙和碳酸钙后小麦籽粒产量分别提高了 0.64、0.43、0.23 g/盆,而硫化钠添加量达 0.5% 及更高时,小麦不产生籽粒。

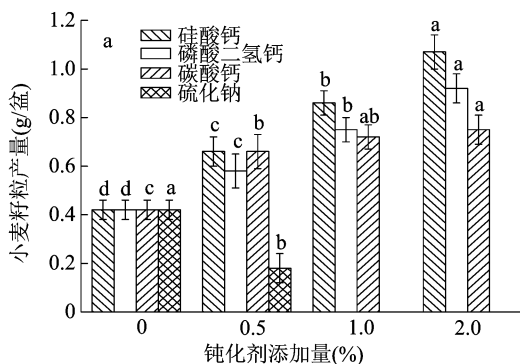
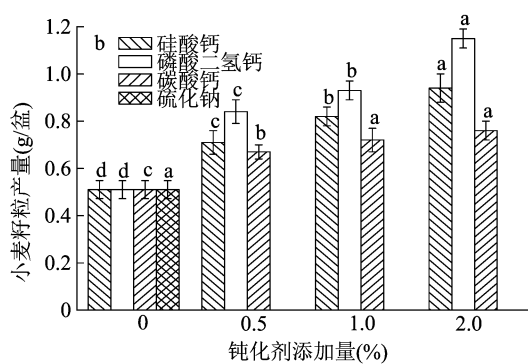


图3 钝化剂对广西黄壤(a)、江苏棕壤(b)小麦籽粒产量的影响



2.3.3 钝化剂对不同土壤小麦籽粒镉含量的影响 由图 4 可见,磷酸二氢钙、硅酸钙、碳酸钙处理后小麦籽粒镉含量随钝化剂添加量的增加而减少。由图 4-a 可见,在广西黄壤中,未添加钝化剂小麦籽粒镉含量为 0.14 mg/kg,添加 2.0% 的硅酸钙、磷酸二氢钙和碳酸钙后小麦籽粒镉含量分别降低 0.080、0.065、0.050 mg/kg,均低于 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中小麦

含镉量的限量(0.1 mg/kg)。添加 0.5% 的硫化钠后小麦籽粒镉含量减少 0.02 mg/kg。由图 4-b 可见,在江苏棕壤中,未添加钝化剂小麦籽粒镉含量为 0.17 mg/kg,添加 2.0% 的磷酸二氢钙、硅酸钙和碳酸钙后小麦籽粒镉含量分别降低了 0.090、0.070、0.055 mg/kg。有研究表明,在镉污染水稻田施磷后,镉主要富集在水稻根部和茎叶中,糙米中的镉含量相对较少,说明磷酸盐可降低镉在水稻体

内的迁移能力,使大部分的镉滞留在根部和茎叶中,降低镉通过食物链危害人体健康的风险<sup>[30]</sup>。由

于添加硫化钠处理的小麦未进入成熟阶段,所以未得到籽粒镉含量的数据。

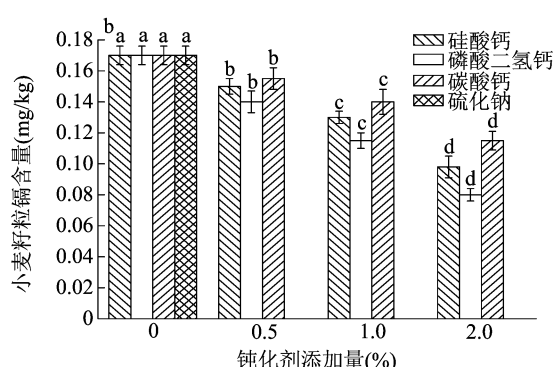
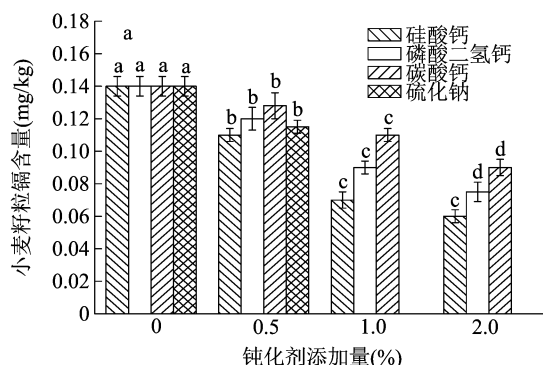


图4 钝化剂对广西黄壤(a)、江苏棕壤(b)小麦籽粒镉含量的影响

### 3 结论

碳酸钙、硅酸钙和硫化钠处理使 2 种土壤 pH 值升高,而磷酸二氢钙处理使 2 种土壤 pH 值降低。广西黄壤 pH 值受硫化钠影响最大,受磷酸二氢钙影响最小;江苏棕壤 pH 值受磷酸二氢钙影响最大,受碳酸钙影响最小。

随钝化剂添加比例增高,2 种土壤有效态镉含量呈下降趋势。当 4 种钝化剂添加比例为 2.0% 时,对广西黄壤钝化效果由大到小为硫化钠、硅酸钙、磷酸二氢钙、碳酸钙,钝化率分别为 29.54%、28.11%、24.56%、17.79%;对江苏棕壤钝化效果由大到小为硫化钠、磷酸二氢钙、硅酸钙、碳酸钙,钝化率分别为 28.21%、27.56%、22.76%、13.46%。

在广西黄壤中,相同添加量下,硅酸钙处理的小麦地上部生物量、籽粒产量大于磷酸二氢钙和碳酸钙的处理,且籽粒镉含量更低,硫化钠在添加量达 1.0% 及更高时,小麦未收获到籽粒。在江苏棕壤中,相同添加量下,磷酸二氢钙处理的小麦地上部生物量、籽粒产量大于硅酸钙和碳酸钙的处理,且籽粒镉含量更低,当硫化钠添加量为 0.5% 时,小麦地上部生物量降低了 68.69%,在添加量达 1.0% 及更高时,小麦不能生长。

硫化钠对 2 种土壤镉形态变化影响最大,对土壤钝化效果最好。但在小麦盆栽试验下,硫化钠对小麦生长表现出毒害作用。综合考虑,以硅酸钙作为镉污染广西黄壤的钝化剂,以磷酸二氢钙作为镉污染江苏棕壤的钝化剂较好。

### 参考文献:

[1] 周建军,周 桔,冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略

[J]. 中国科学院院刊,2014,29(3):350.

[2] 宋玉婷,彭世逞. 我国土壤重金属污染状况及其防治对策[J]. 吉首大学学报(自然科学版),2018,39(5):71-76.

[3] 李 婧,周艳文,陈 森,等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. 安徽农业通报,2015,21(24):104-107.

[4] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业,2014(5):10-11.

[5] 张兴梅,杨清伟,李 扬. 土壤镉污染现状及修复研究进展[J]. 河北农业科学,2010,14(3):79-81.

[6] 梁 焯,李云祯,牟海燕,等. 钝化土壤酸化过程机理及关键影响因素研究[J]. 工程科学与技术,2018,50(6):193-197.

[7] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments; a review[J]. Waste Management, 2008,28(1):215-225.

[8] Van Herwijnen R, Hutchings T R, Al-Tabbaa A, et al. Remediation of metal contaminated soil with mineral-amended composts[J]. Environmental Pollution, 2007,150(3):347-354.

[9] Garau G, Castaldi P, Santona L, et al. Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil[J]. Geoderma, 2007,142(1/2):47-57.

[10] 陈 杰,张 晶,王 鑫,等. 不同物料对污染土壤中铅的钝化[J]. 农业环境科学学报,2015,34(9):1674-1678.

[11] 梁 媛,王晓春,曹心德. 基于磷酸盐、碳酸盐和硅酸盐材料化学钝化修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 环境化学,2012,31(1):16-25.

[12] 张云龙,李 军. 硅素物质对土壤-水稻系统中镉行为的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(10):2955-2956.

[13] 张 茜,徐明岗,张文菊,等. 磷酸盐和石灰对污染红壤与黄泥土中重金属铜锌的钝化作用[J]. 生态环境,2008,17(3):1037-1041.

[14] 廖 敏,黄昌勇,谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性机理研究[J]. 农业环境保护,1998,17(3):101-103.

[15] 周世伟,徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态学报,2007,27(7):3043-3050.

[16] 付煜恒,张惠灵,王 宇,等. 磷酸盐对铅镉复合污染土壤的钝化修复研究[J]. 环境工程,2017,35(9):176-180,163.

梁青青. 改革开放 40 年来云南省小城镇环境保护问题研究[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(3): 198–203.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.035

# 改革开放 40 年来云南省小城镇环境保护问题研究

梁青青

(长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054)

**摘要:**小城镇环境保护, 是我国农村环境保护的重要组成部分。加强小城镇环境保护, 既是保护小城镇可持续发展、实现人民对美好生活向往的客观要求, 也是改善农村生产生活环境、贯彻落实十九大精神的具体行动。对小城镇环境问题的客观、充分认识, 对加强小城镇管理具有重要意义。笔者运用生态学和社会学的研究方法, 通过对云南省的小城镇建设和发展情况开展调查和分析, 从农村环境管理视角来看待环境保护的问题, 反思云南省小城镇发展方式, 分析农村环境保护问题对小城镇经济生活发展形成的制约, 探寻云南省小城镇社会、经济和环境协调发展的有效途径。为维护生态系统完整性、环境保护的有效性, 小城镇可以不是简单地从行政建制的意义上来理解, 应该包括了城镇建成区和其他行政区域。在此基础上, 构建一个新的和谐的小城镇发展体系。最后提出解决小城镇环境问题、实现小城镇可持续发展的对策, 包括加快小城镇环保基础设施建设、助力生态产业发展等。

**关键词:**云南省; 小城镇; 生态; 环境保护

**中图分类号:** F323.22; X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)03-0198-06

发展小城镇, 是城市化的重要途径; 保护环境, 是小城镇可持续发展的基础。小城镇的迅速崛起, 充分体现了小城镇作为农村地域性经济、文化及各种社会化服务中心的地位。但是, 各地在加快小城镇建设和发展步伐的同时, 由于重建设、轻环保等

传统发展观念的影响, 对小城镇及周边农村环境构成了严重威胁, 危害了人民群众的身体健康, 制约了农村经济和小城镇的可持续发展。因此, 小城镇环境保护, 立足于服务和带动“三农”。要实现小城镇的又好又快发展, 必须有良好的环境基础, 而环境的好坏, 取决于“人”这个因素。

小城镇环境质量的好坏事关城镇居民生活质

收稿日期: 2020-05-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 310827171011); 陕西省省级大学生创新创业训练计划。

作者简介: 梁青青(1985—), 女, 山东济宁人, 博士, 副教授, 主要从事生态与环保经济研究。E-mail: pinyuan2012@163.com。

[17] 陈 盾, 王小兵, 汪晓丽, 等. 镉污染红壤的钝化剂筛选及钝化效果[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 115–120.

[18] Zhu N M, Qiang Q L, Guo X J, et al. Sequential extraction of anaerobic digestate sludge for the determination of partitioning of heavy metals[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 102: 18–24.

[19] 曹 宇, 陈 明, 张佳文, 等. 硫化钠对土壤中铅镉的固定效果[J]. 环境工程学报, 2014, 8(2): 782–788.

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 13–195.

[21] Spark D L. Methods of soil analysis, part 3: chemical methods[M]. Madison: SSSA and ASA, 1996: 703–919.

[22] 黄 擎, 刘博睿, 王梦远, 等. 碳酸钙对潮土  $\text{Cd}^{2+}$  的固定及土壤酶活性的影响[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(6): 1–9.

[23] 张建锋, 张旭东, 周金星, 等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 28–30, 107.

[24] Hong C O, Chung D Y, Lee D K, et al. Comparison of phosphate materials for immobilizing cadmium in soil[J]. Archives of

Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 58(2): 268–274.

[25] 李文姣, 张 丽, 刘东方, 等. 不同钝化剂对猪粪中重金属 Cu、Zn、Mn 钝化效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1262–1269.

[26] Matusik J, Tomasz B, Manecki M. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 1332–1339.

[27] 杨志敏, 郑绍建, 胡露堂, 等. 镉磷在小麦细胞内的积累和分布特性及其交互作用[J]. 南京农业大学学报, 1998, 21(2): 54–58.

[28] 周 航, 曾 敏, 刘 俊, 等. 施用碳酸钙对土壤铅、镉、锌交换态含量及在大豆中累积分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 123–126.

[29] 王 萍. 不同钝化剂对重金属污染土壤长期稳定化效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

[30] 董善辉, 李 军, 赵 梅. 磷对镉污染土壤中水稻吸收积累镉的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 39–42.