

石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响

代允超, 吕家珑*, 曹莹菲, 刘克, 张瑞龙

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过土培试验研究了添加不同改良剂(鸡粪、泥炭和石灰)对我国不同性质土壤(云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土)镉污染的改良差异。结果表明,不同改良剂 0~60 d 内对四种镉污染土壤的改良效果均较为显著。鸡粪对云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土镉污染的固定率分别为 37.0%、52.7%、29.3%和 49.6%,显示鸡粪对这四种不同性质镉污染土壤的改良效果是江西红壤≈内蒙栗钙土>云南赤红壤>吉林黑土;泥炭对云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土镉污染的固定率分别为 33.1%、51.7%、30.5%和 51.2%,显示泥炭对这四种不同性质镉污染土壤的改良效果是江西红壤≈内蒙栗钙土>吉林黑土≈云南赤红壤;石灰对云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土镉污染的固定率分别为 60.7%、55.5%、40.7%、41.7%,显示石灰对这四种不同性质镉污染土壤的改良效果是云南赤红壤>江西红壤>吉林黑土≈内蒙栗钙土。综上可知,在对镉污染的酸性土壤改良上,石灰好于有机质,而对镉污染的中性和碱性土壤改良上,有机质则好于石灰。

关键词:石灰;有机质;不同性质土壤;镉污染;有效镉

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)03-0514-06 **doi:**10.11654/jaes.2014.03.017

Effects of Lime and Organic Amendments on Cd Availability in Cd-Contaminated Soils with Different Properties

DAI Yun-chao, LÜ Jia-long*, CAO Ying-fei, LIU Ke, ZHANG Rui-long

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: A incubation experiment was carried out to examine the effects of different amendments(chicken manure, peat and lime) on Cd availability in four different types of Cd contaminated soils(Yunnan lateritic red soil, Jiangxi red soil, Jilin black soil and Neimeng chestnut soil). All treatments significantly reduced available Cd contents in all soils. After 60 days of incubation, immobilization rate of available Cd by chicken manure were 37.0%, 52.7%, 29.3% and 49.6% for Yunnan lateritic red soil, Jiangxi red soil, Jilin black soil and Neimeng chestnut soils, respectively. Peat amendment reduced Cd availability by 33.1%, 51.7%, 30.5% and 51.2% in Yunnan lateritic red soil, Jiangxi red soil, Jilin black soil and Neimeng chestnut soils respectively. Lime had greater rates of Cd immobilization, which were 60.7%, 55.5%, 40.7% and 41.7% for Yunnan lateritic red soil, Jiangxi red soil, Jilin black soil and Neimeng chestnut soils, respectively. In conclusion, lime is a better immobilizer of Cd in acidic Cd-contaminated soils, but organic amendments perform better than lime in both neutral and alkaline soils.

Keywords: lime; organic amendment; soil type; Cd contamination; available Cd

土壤是人类赖以生存和农业发展的基础,但随着城市化进程的加快和工农业的快速发展,土壤污染特别是土壤重金属污染日趋严重^[1-2]。Cd 是在土壤中移动性很强的一种重金属,过量的 Cd 被植物吸收后会降低农作物的产量和品质,一旦进入食物链,会在人体

内积累,危害人体健康^[3]。目前我国约有 1.3 万 hm^2 耕地受到 Cd 污染,涉及 11 个省市的 25 个地区^[4]。镉污染土壤的修复和治理措施主要有物理措施、化学措施、生物措施、生态措施等^[5-6],其中化学措施因成本较低、对土壤环境扰动小、容易实施且不会带来二次污染,是一种常用的修复措施。常用的化学改良剂有碱性物质和有机物等。石灰能提高土壤 pH 值,促进重金属形成碳酸盐、氢氧化物沉淀等,降低土壤中镉的生物有效性,从而抑制作物对 Cd 的吸收。廖敏等^[7]的研究表明,随着石灰用量的增加,土壤水溶态 Cd 含

收稿日期:2013-06-15

基金项目:农业部公益性行业专项(200903015)

作者简介:代允超(1988—),男,河南夏邑人,硕士研究生,主要从事土壤重金属污染及修复研究。E-mail:dai_xi_good@126.com

*通信作者:吕家珑 E-mail:ljlll@nwsuaf.edu.cn

量急剧下降,Albasel 等^[8]研究发现,施用石灰能降低重金属的活性,促进作物的生长。很多研究表明,有机物料对土壤重金属的有效性也具有一定的抑制效果,同时还具有改善土壤结构、调节土壤养分的功能^[9-13]。目前,采用不同改良剂对一种镉污染土壤的修复研究较多,但关于同一改良剂对不同性质土壤镉污染修复的研究较少。因此,本试验主要探究不同改良剂对不同性质镉污染土壤的修复差异,为适宜的改良剂选择和土壤污染修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

根据土壤的酸碱性和有机质含量高低,选择我国 4 个省区具有代表性的农田土壤,分别为云南赤红壤(Y)、江西红壤(J)、吉林黑土(L)和内蒙古栗钙土(N)。采样深度为 0~20 cm 耕层,风干去除杂物,首先过 5 mm 尼龙筛,按使土壤全镉含量达到 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的量添加 $\text{CdSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 试剂(即每盆装 8 kg 土,添加含 4.8 mg 镉的 $\text{CdSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 试剂),混合均匀并老化 3 个月后种植小麦,收获小麦后取盆栽剩余的土壤,研磨并过 1 mm 尼龙筛,供基本理化性质测定及培养试验使用。土壤 pH 值、有机质(OM)、阳离子交换量(CEC)以及全量氮、磷、钾的测定参照《土壤农化分析》^[14]。土壤基本性质见表 1,4 种土壤全镉含量均超过国家二级标准(GB 15618—1995),即 pH 值 <6.5 时是 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $6.5 < \text{pH}$ 值 <7.5 时是 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; pH 值 >7.5 时是 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。属于镉污染土壤。

1.1.2 供试改良剂

鸡粪, pH 值为 8.01(水:鸡粪=5:1),全碳为 $265 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 泥炭, pH 值为 5.45(水:泥炭=2.5:1),含有机碳 32%;石灰(化学纯), pH 值为 13.00。所有改良剂中镉均未检测出。

1.2 试验设计

分别取 4 种供试土壤 10 g 分别与适量的改良剂混合均匀于塑料瓶中,各改良剂添加量依据文献添加

量综合考虑^[10,15-17],其中鸡粪 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土)、泥炭 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土)、石灰 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土)。不加改良剂的处理为空白对照(CK)。共 16 个处理,各处理重复 15 次(设置 5 个取样时间,分别是第 5、10、15、30 和 60 d,每个时间每个处理取 3 个重复),每个处理加水至田间持水量的 70%,恒温(25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 培养,各处理随机排列,隔天调整一次位置,培养过程中用称重法补水维持田间持水量的 70%,分别于第 5、10、15、30、60 d 取样,测定其有效镉含量。

1.3 测定项目和方法

有效态镉测定采用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 EDTA 浸提,土水比 1:5,置于振荡机上 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 往复振荡 2 h,然后取于离心机 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min,取上清液经过滤、萃取,然后用原子吸收分光光度计火焰法测定。全镉测定采用 EPA 3052 方法消解(硝酸-氢氟酸消煮),萃取,然后用原子吸收分光光度计火焰法测定^[18]。所得数据用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件进行数据的计算、统计与处理。采用的统计方法为 LSD 法,差异显著水平为 5%。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对镉污染土壤中有效镉影响的差异

2.1.1 云南镉污染赤红壤

由表 2 可以看出,在各个改良时期,石灰对云南镉污染赤红壤的改良效果明显好于鸡粪和泥炭;而鸡粪和泥炭在前 10 d 对云南镉污染赤红壤的改良效果差异不显著,15 d 之后表现出一定的差异性,其原因可能是鸡粪较易分解,而泥炭改良前期较稳定。60 d 后,鸡粪、泥炭和石灰各处理非有效态镉含量(碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态的总和)由起始的 $0.697 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加至 0.725、0.722、0.743 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,施入鸡粪、泥炭和石灰 60 d 后,有效态镉向非有效态镉的转化量分别是 0.028、0.025、0.046 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即施入鸡粪、泥炭和石灰 60 d 后对云南镉污染赤红壤有效镉的固定率分别为 37.0%、33.1%和 60.7%,可以看出对云南镉污染赤红

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

土壤编号 Number	pH 值	有机质 OM/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾 Total K/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效镉 Available Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全镉 Total Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Y 云南赤红壤	5.44	34.26	11.1	2.01	0.81	4.77	0.076	0.773
J 江西红壤	6.42	11.69	8.70	0.51	0.52	9.96	0.108	0.701
L 吉林黑土	7.24	32.85	31.11	1.75	0.35	24.58	0.157	0.649
N 内蒙古栗钙土	8.48	16.30	11.61	0.96	0.38	26.40	0.189	1.366

表 2 不同改良剂对云南赤红壤有效镉的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 Available Cd contents in the Yunnan lateritic red soil treated with different amendments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	0 d	5 d	10 d	15 d	30 d	60 d	0~60 d 固定率/%
空白	0.076a	0.073a	0.074a	0.072a	0.073a	0.074a	3.0
鸡粪	0.076a	0.066b	0.060b	0.054b	0.050b	0.048b	37.0
泥炭	0.076a	0.066b	0.060b	0.056c	0.052b	0.051c	33.1
石灰	0.076a	0.058c	0.048c	0.041d	0.032c	0.030d	60.7

注:同列中相同字母表示在 5%的水平上没有显著差异,下同。

Note: Different letters within a column mean significant difference at 0.05 level, the same bellow.

壤修复效果是石灰>鸡粪≈泥炭。其原因可能是云南赤红壤高有机质、低 pH 值的性质决定的,添加石灰有利于提高云南赤红壤的 pH 值。

由表 2 还可以看出,0~60 d 内,随着改良时间的增加,鸡粪、泥炭和石灰均是在 0~30 d 各时期改良效果差异显著,而 30~60 d 之后达到相对稳定状态。

2.1.2 江西镉污染红壤

由表 3 可以看出,在各个改良时期,石灰对江西镉污染红壤的改良好于鸡粪和泥炭,而鸡粪和泥炭的改良效果差异不显著。60 d 后,鸡粪、泥炭和石灰各处理非有效态镉含量由初始的 $0.593 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别增加至 0.650 、 0.649 、 $0.653 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,施入鸡粪、泥炭和石灰 60 d 后有效态镉向非有效态镉的转化量分别是 0.057 、 0.056 、 $0.060 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,即施入鸡粪、泥炭和石灰 60 d 后对江西镉污染红壤的有效镉固定率分别为 52.7% 、 51.7% 和 55.5% ,可以看出对江西镉污染红壤修复效果是石灰>鸡粪≈泥炭。其原因可能是江西红壤含有机质较低且土壤呈弱酸性,添加石灰有利于提高土壤的 pH 值,而添加鸡粪和泥炭虽可以提高其有机质含量,但 pH 值对镉有效性的影响大于有机质。

由表 3 还可以看出,0~60 d 内,随着改良时间的增加,鸡粪、泥炭和石灰在 0~60 d 内各时期改良效果差异均显著,与云南赤红壤 30 d 后即达到平衡相比,该结果可能是由江西红壤有机质含量较低、缓冲能力较差引起的。

2.1.3 吉林镉污染黑土

由表 4 可以看出,在各个改良时期,石灰对吉林镉污染黑土的改良好于鸡粪和泥炭,而鸡粪和泥炭的改良效果差异不显著。60 d 后,鸡粪、泥炭和石灰各处理非有效态镉含量由起始的 $0.492 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别增加至 0.538 、 0.540 、 $0.556 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,施入鸡粪、泥炭和石灰 60 d 后有效态镉向非有效态镉的转化量分别是 0.046 、 0.048 、 $0.064 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,即施入鸡粪、泥炭和活性炭 60 d 后对吉林镉污染黑土有效镉的固定率分别为 29.3% 、 30.5% 和 40.7% ,可以看出对吉林镉污染黑土修复效果是石灰>鸡粪≈泥炭。原因可能是吉林黑土有机质含量较高、而 pH 值相对不高,因此添加有机质效果不如添加石灰效果明显。

由表 4 还可以看出,0~60 d 内,随着改良时间的延长,鸡粪在 0~30 d 内各时期改良效果差异显著,而

表 3 不同改良剂对江西红壤有效镉的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Available Cd contents in Jiangxi red soil treated with different amendments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	0 d	5 d	10 d	15 d	30 d	60 d	0~60 d 固定率/%
空白	0.108a	0.107a	0.108a	0.106a	0.106a	0.107a	7.0
鸡粪	0.108a	0.092bc	0.079b	0.070b	0.060b	0.051b	52.7
泥炭	0.108a	0.093b	0.078b	0.071b	0.060b	0.052b	51.7
石灰	0.108a	0.090c	0.075c	0.064c	0.054c	0.048c	55.5

表 4 不同改良剂对吉林黑土有效镉的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 4 Available Cd contents in Jilin black soil treated with different amendments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	0 d	5 d	10 d	15 d	30 d	60 d	0~60 d 固定率/%
空白	0.157a	0.157a	0.156a	0.156a	0.155a	0.155a	1.2
鸡粪	0.157a	0.140b	0.129b	0.121b	0.114b	0.111b	29.3
泥炭	0.157a	0.142b	0.130b	0.121b	0.113b	0.109b	30.5
石灰	0.157a	0.132c	0.120c	0.109c	0.101c	0.093c	40.7

30~60 d 改良效果不显著,原因可能是鸡粪较易分解,容易使土壤达到平衡状态;泥炭和石灰在 0~60 d 内各时期改良效果差异均显著。

2.1.4 内蒙镉污染栗钙土

由表 5 可以看出,在各个改良时期,鸡粪和泥炭对内蒙镉污染栗钙土的改良好于石灰,而鸡粪和泥炭的改良效果差异不显著(60 d 时除外)。60 d 后,鸡粪、泥炭和石灰各处理非有效态镉含量由起始的 $1.177 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别增加至 1.271 、 1.274 、 $1.256 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,施入鸡粪、泥炭和石灰 60 d 后有效态镉向非有效态镉的转化量分别是 0.094 、 0.097 、 $0.079 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即施入鸡粪、泥炭和石灰 60 d 后对内蒙镉污染栗钙土有效镉的固定率分别为 49.6% 、 51.2% 和 41.7% ,可以看出对内蒙镉污染栗钙土修复效果鸡粪 $\approx$ 泥炭 $>$ 石灰。原因可能是内蒙栗钙土有机质含量较低、而 pH 值相对较高(pH 值 8.48),呈强碱性,因此添加有机质的改良效果明显好于添加石灰的效果。

由表 5 可以看出,0~60 d 内,随着改良时间的延长,鸡粪、泥炭和石灰在 0~30 d 内各时期改良效果差异显著,而 30~60 d 改良效果不显著,可能原因是内蒙栗钙土缓冲能力较强,很快就能达到修复平衡。

对于南方镉污染的酸性土壤,施用石灰改良效果较好,因为施用石灰能显著提高土壤 pH 值,降低土壤中 Cd 的有效性;对于北方镉污染的中性和碱性土壤,施用石灰改良效果则不如有机质。另外,有研究报道,石灰和有机质配施,对改良镉污染的土壤效果更好^[15-16]。因此,针对不同镉污染的土壤,应根据土壤性质选择适宜的改良剂。

2.2 同一改良剂对 4 种不同性质土壤有效镉含量的影响

2.2.1 鸡粪对 4 种土壤有效镉含量的影响

由图 1 可以看出,鸡粪在 0~60 d 内对 4 种不同性质镉污染的土壤改良效果均较好,鸡粪对云南赤红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土的修复效果在 0~30 d 内每个改良时期差异均较显著,30~60 d 时差异不显著,只有江西红壤在 0~60 d 各个改良时期差异均较显著。原因

可能是由鸡粪的性质决定的,其主要成分是粗蛋白、碳水化合物等,更易分解,分解产物能很快地与镉络合并形成难溶的络合物,降低了土壤中镉的生物有效性。另外,60 d 内,鸡粪对云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土有效镉的固定率分别为 37.0% 、 52.7% 、 29.3% 和 49.6% ,鸡粪对这 4 种不同性质镉污染土壤的修复效果是江西红壤 $\approx$ 内蒙栗钙土 $>$ 云南赤红壤 $>$ 吉林黑土。其原因可能是鸡粪含有机质较高,对有机质含量不高的江西、内蒙土壤改良效果较好。

2.2.2 泥炭对 4 种土壤有效镉含量的影响

由图 2 可以看出,泥炭在 0~60 d 内对 4 种不同性质镉污染的土壤改良效果均较好,云南赤红壤和内蒙栗钙土在 0~30 d 内各个时期差异均较显著,30~60 d 达到平衡,而江西红壤和吉林黑土在 0~60 d 各个改良时期差异均较显著。原因可能是泥炭比鸡粪难分解,其主要成分是纤维素、半纤维素、木质素、沥青物质等,不易达到修复平衡,因此在用泥炭等不易分解的有机物作为镉污染土壤改良剂时,需要较长的时间。另外,60 d 内,泥炭对云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土有效镉的固定率分别为 33.1% 、 51.7% 、 30.5% 和 51.2% ,泥炭对这 4 种不同性质镉污染土壤的修复效果是江西红壤 $\approx$ 内蒙栗钙土 $>$ 吉林黑土 $\approx$ 云南赤红壤。其原因可能是泥炭有机质含量较高,有助于增加低有机质的江西红壤、内蒙栗钙土中的有机质含量,改良效果较有机质含量高的吉林黑土和云南赤红壤显著。

2.2.3 石灰对 4 种土壤有效镉含量的影响

由图 3 可以看出,石灰在 0~60 d 内对四种不同性质镉污染的土壤改良效果均较好,云南赤红壤和内蒙栗钙土在 0~30 d 内各改良时期差异较显著,30~60 d 内改良差异不显著,而对江西红壤和吉林黑土的改良在 0~60 d 内各时期差异均较显著。另外,60 d 内,石灰对云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土有效镉的固定率分别为 60.7% 、 55.5% 、 40.7% 、 41.7% ,石灰对这 4 种不同性质镉污染土壤的修复效果是云南赤红壤 $>$ 江西红壤 $>$ 吉林黑土 $\approx$ 内蒙栗钙土。

表 5 不同改良剂对内蒙栗钙土有效镉的影响($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 5 Available Cd contents in Neimeng chestnut soil treated with different amendments($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

编号	0 d	5 d	10 d	15 d	30 d	60 d	0~60 d 固定率/%
空白	0.189a	0.187a	0.186a	0.184a	0.184a	0.182a	3.5
鸡粪	0.189a	0.157c	0.131c	0.109c	0.101c	0.095d	49.6
泥炭	0.189a	0.160c	0.135c	0.112c	0.101c	0.092c	51.2
石灰	0.189a	0.165b	0.140b	0.126b	0.114b	0.110b	41.7

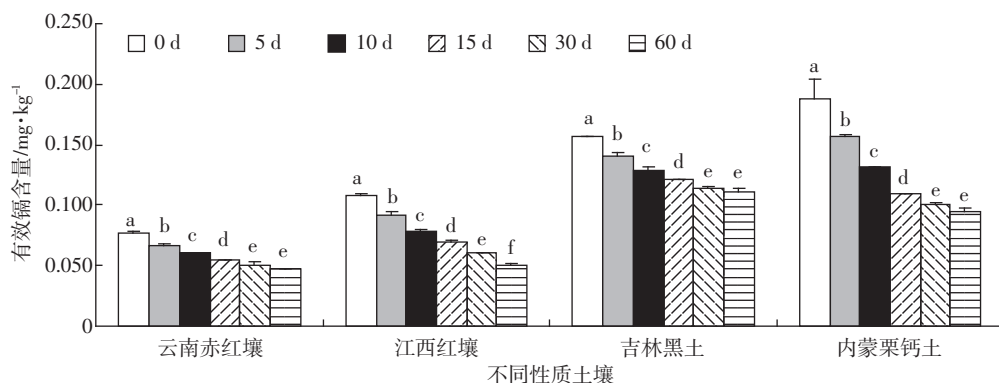
其原因可能是石灰 pH 值较高,对低 pH 值的云南赤红壤、江西红壤改良效果较显著。

石灰对镉污染土壤的改良,主要是通过提高土壤 pH 值,降低 Cd 的有效性,从而减少作物对 Cd 的吸收,李晓婷等、郭利敏等^[17,19]都曾作过类似报道。有机物料对镉污染土壤的改良可以归结为以下两方面原因:通过增加土壤 pH 值来降低土壤 Cd 的有效性,如鸡粪;通过腐殖质的络合作用来降低土壤 Cd 的有效

性,这在 Hsieh 等^[20]的研究中也有证实。所以对于含有机质不高的酸性土壤,施用有机物料改良效果较好。

3 结论

(1)对于像云南赤红壤、江西红壤和吉林黑土等 pH 值不高(甚至呈酸性)且有机质含量较高的镉污染土壤,鸡粪、泥炭和石灰对其都有较好的改良效果,但石灰的效果要好于鸡粪和泥炭,就鸡粪和泥炭相比,



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同
Different letters in a soil type mean significant difference at 0.05 level, the same below.

图1 鸡粪在 0~60 d 内对 4 种不同性质土壤有效镉含量的影响

Figure 1 Effect of chicken manure on available Cd contents of 4 soils during 60 days

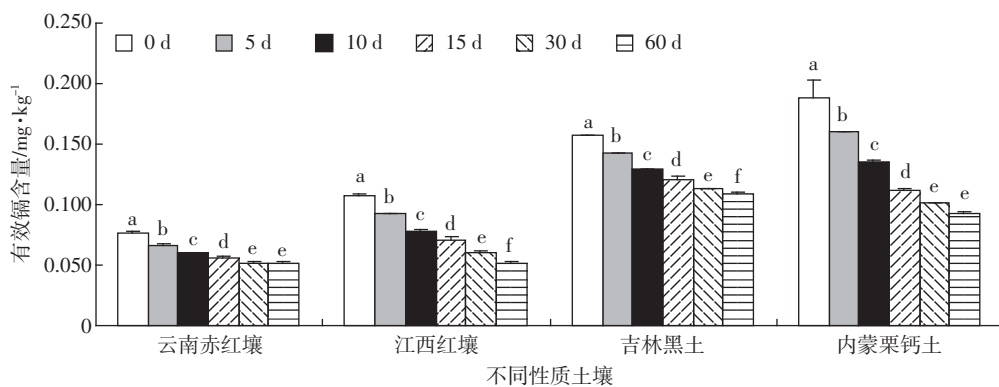


图2 泥炭在 0~60 d 内对 4 种不同性质土壤有效镉含量的影响

Figure 2 Effect of peat on available Cd contents of 4 kinds of soils during 60 days

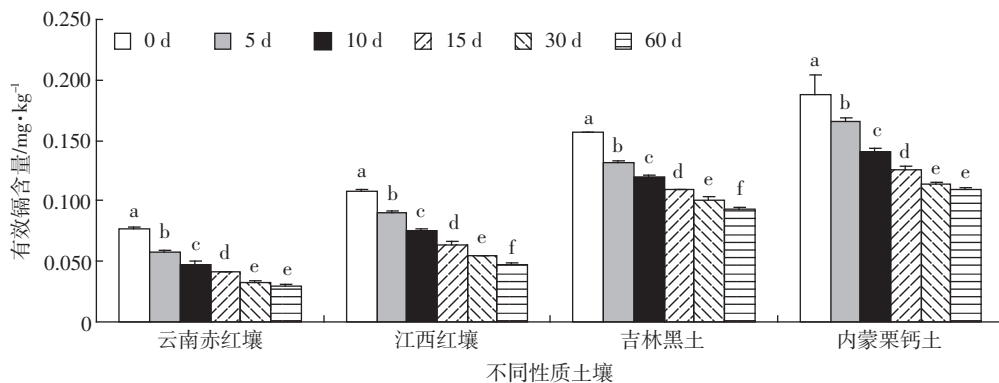


图3 石灰在 0~60 d 内对 4 种不同性质土壤有效镉含量的影响

Figure 3 Effect of lime on available Cd contents of 4 soils during 60 days

在改良前期,鸡粪的改良效果略好于泥炭;对于像内蒙栗钙土这种高 pH 值、低有机质的镉污染土壤,鸡粪、泥炭和石灰对其都有较好的改良效果,但鸡粪和泥炭的效果要好于石灰。

(2)鸡粪和泥炭因为其自身有机质含量较高,所以对像内蒙栗钙土和江西红壤等有机质含量较低的土壤改良效果较好,但由于鸡粪较泥炭更易分解,所以鸡粪处理的土壤比泥炭更易达到平衡状态;而石灰则对云南赤红壤、江西红壤等酸性镉污染土壤改良效果较好,对吉林黑土和内蒙栗钙土等中性或碱性土壤次之。

总之,在有机质含量较低的镉污染土壤改良上,有机物料的改良效果好于石灰;在酸性和中性镉污染土壤改良上,石灰的改良效果好于有机物料。因此,在对镉污染土壤进行修复改良时,要根据不同土壤的理化性质,选择对应的改良剂,做到因地制宜。

参考文献:

- [1] Jones K S, Jackson A, Johnston A E. Evidence for an increase in the Cd content of herbage since the 1860s[J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, 26: 834-836.
- [2] He Z L, Yang X E, Stoffella P J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 19: 125-140.
- [3] 赵其国. 土壤与环境问题国际研究概况及发展趋势[J]. 土壤, 1998, 30(6): 281-290.
ZHAO Qi-guo. International research survey and trends of soil and environmental issues[J]. *Soils*, 1998, 30(6): 281-290.
- [4] 王庆仁, 刘秀梅, 董艺婷. 典型重工业区与污灌区植物的重金属污染状况及特征[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2): 115-118, 149.
WANG Qing-ren, LIU Xiu-mei, DONG Yi-ting. Contamination and characters of vegetation polluted by heavy metals in typical industrial regions subjected to sewage as irrigation[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(2): 115-118, 149.
- [5] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. The principle and method of remediation of contaminated soil[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [6] 茹淑华, 苏德纯, 王激清. 土壤镉污染特征及污染土壤的植物修复技术机理[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 29-33.
RU Shu-hua, SU De-chun, WANG Ji-qing. Characteristics of Cd pollution in soil and the mechanisms of phytoremediation for soil contamination[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2006, 14(4): 29-33.
- [7] 廖敏, 谢正苗. Cd 在红壤中的吸附特征[J]. 浙江农业大学学报, 1998, 24(2): 199-202.
LIAO Min, XIE Zheng-miao. Adsorption characteristics of cadmium in red soils[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1998, 24(2): 199-202.
- [8] Albasel N, Cottenie N. Heavy metals uptake from contaminated soils as affected by peat, lime, and chelates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49: 386-390.
- [9] 苏天明, 李杨瑞, 江泽普, 等. 泥炭对菜心-土壤系统中重金属生物有效性的效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 339-344.
SU Tian-ming, LI Yang-rui, JIANG Ze-pu. Effect of peat on heavy metal bioavailability in soil system and flowering Chinese cabbage[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 339-344.
- [10] 邵孝侯, 胡霁堂, 秦怀英. 添加石灰、有机物料对酸性土壤 Cd 活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 1993, 16(2): 47-52.
SHAO Xiao-hou, HU Ai-tang, QIN Huai-ying. Effects of application of lime and organic materials on acidic soil Cd availability[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1993, 16(2): 47-52.
- [11] 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.
ZHANG Qing, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Effects of amendments on bioavailability of cadmium and zinc in compound contaminated red soil[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2006, 25(4): 861-865.
- [12] Park J, Choppala G. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals[J]. *Plant and Soil*, 2011, 348(1): 439-451.
- [13] Sung E L, Mahtab A, Adel A, et al. Effects of biochar on soil quality and heavy metal availability in a military shooting range soil in Korea[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in South Korea*, 2011, 44(1): 67-77.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [15] 李瑞美, 王果, 方玲, 等. 石灰与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 293-296.
LI Rui-mei, WANG Guo, FANG Ling, et al. Effects of lime complexation organic manure on uptake of Cd, Pb by crops[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2003, 22(3): 293-296.
- [16] 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.
CHEN Shao-jun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of different organic material and lime on soil pH and available cadmium[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(3): 999-1003.
- [17] 陈晓婷, 王果, 张潮海, 等. 石灰、泥炭对镉、铅、锌污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响[J]. 腐植酸, 2005(2): 46-46.
CHEN Xiao-ting, WANG Guo, ZHANG Chao-hai, et al. Influence of lime and peat on growth and element adsorption of cabbage on soil polluted by cadmium and lead[J]. *Humic Acid*, 2005(2): 46-46.
- [18] Smith C J, Hopmans P, Cook F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94: 317-323.
- [19] 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.
GUO Li-min, AI Shao-ying, TANG Ming-deng, et al. Effect of different amendments on translocation and accumulation of cadmium in the soil-Brassica chinensis system[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2010, 29(8): 1520-1525.
- [20] Hsieh C F, Hsu K N. An experiment on the organic farming of sweet corn and vegetable soybeans[J]. *Bulletin of Taichung District Agricultural Improvement Station*, 1993, 39: 29-39.