

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

代允超, 吕家珑*, 刁展, 刘金, 安伟强, 陈曦

(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:采用盆栽试验,研究了施用石灰、鸡粪、泥炭、石灰+鸡粪、石灰+泥炭处理对4种外加镉污染土壤上小白菜生物量、镉吸收量以及土壤有效镉含量和pH的影响。结果表明,各改良剂单施和有机物料+石灰配施均可以显著提高小白菜生物量,小白菜生物量较对照提高11.76%~59.38%,且改良剂配施效果优于单施;改良剂单施处理对小白菜的增产效果是鸡粪>泥炭>石灰,单施石灰能显著提高南方酸性土上小白菜生物量,对北方碱性土小白菜生物量影响不显著。与不施改良剂的对照相比,施用改良剂的处理明显降低了小白菜对镉的吸收量和土壤有效镉含量,且改良剂配施的效果好于单施,土壤有效镉含量较对照降低31.2%~67.0%;比较单施有机物料或单施石灰,在南方酸性土壤上,单施石灰效果好于单施有机物料,在北方碱性土上,单施有机物料效果则好于单施石灰。另外,在对土壤pH的影响上,单施鸡粪或石灰,鸡粪+石灰和泥炭+石灰四个处理均可以显著提高土壤pH,增幅在0.15~2.16个单位,且石灰、鸡粪+石灰和泥炭+石灰效果好于鸡粪处理,泥炭处理对南方酸性土pH影响不大,但可以降低北方碱性土的pH。

关键词:改良剂;土壤;小白菜;镉;pH

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)01-0080-07 doi:10.11654/jaes.2015.01.012

Effects of Soil Amendments on Cd Bioavailability to and Uptake by *Brassia chinensis* in Different Cd-contaminated Soils

DAI Yun-chao, LÜ Jia-long*, DIAO Zhan, LIU Jin, AN Wei-qiang, CHEN Xi

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

Abstract: Reducing bioavailability of heavy metals in soils is crucial to prevent heavy metal from entering the food chain. A pot experiment was conducted to evaluate the effects of five amendments, lime (L), chicken manure (F), peat (T), lime+chicken manure (LF), lime+peat (LT), on biomass and Cd uptake of *Brassia chinensis*, soil pH and available Cd in 4 different Cd contaminated soils including Yunnan lateritic red soil, Jiangxi red soil, Jilin black soil and Neimeng chestnut soil. The results indicated that all treatments except L significantly promoted the biomass of *B. chinensis* by 11.76%~59.38%, compared with the control treatment. Lime could significantly promote the *B. chinensis*'s growth only in acidic soil. The growth promotion of amendments was in order of F>T>L. Soil available Cd and Cd uptake by *Brassia chinensis* were significantly decreased by applying amendments. Soil available Cd was decreased by 31.2%~67.0%. These inhibitory effects were greater in mixed amendments (LF and LT) than in single amendment (F, T, L). Among three amendments, lime was the best for acidic soils, while chicken manure and peat were superior for alkaline soils. Treatments of LF, LT, F and L significantly increased soil pH by 0.15~2.16 units, while applying T significantly decreased the pH of alkaline soil.

Keywords: amendment; soils; *Brassia chinensis*; Cd; pH

收稿日期:2014-08-08

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,博士研究生,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: ljll@nwsuaf.edu.cn

土壤是不可或缺、不可再生的自然资源,是人类生存的物质基础。世界范围内土壤的重金属污染不断加重,特别是镉对土壤的污染尤为突出,镉具有毒性强、移动性强、易被植物吸收等性质,它不仅抑制农作物生长发育、降低产量,而且土壤中的镉可以随食物链传递最终危害人体健康^[1-4]。土壤重金属污染的修复难度较大,目前,对土壤重金属污染常用的修复方法有物理措施、化学措施、生物措施和生态修复等^[4-5],其中化学措施因其实施简单方便、费用较低、效果较好等优点而成为当今研究热点^[6-7]。常用的化学改良剂有石灰和有机物料等。有研究表明,施用石灰能够提高土壤 pH,促进重金属形成碳酸盐、氢氧化物沉淀,降低土壤重金属的有效性,进而降低作物体内镉含量^[8-10];还有研究表明,有机物料不仅可以提高土壤有机质含量,调节土壤养分,改善土壤理化性质,还可以对重金属在土壤中的有效性起到一定的抑制作用^[11-12]。目前,采用多种改良剂对同一种镉污染土壤的修复研究较多,但关于同一改良剂改良不同性质镉污染土壤的研究较少,为了探究不同改良剂对不同性质镉污染土壤的改良差异,本试验根据有机质含量和 pH 不同选取我国 4 种不同性质土壤,以小白菜(*Brassia chinensis*)为研究对象,采用盆栽试验,研究施用改良剂对这 4 种外加镉污染土壤上小白菜生物量、镉吸收量以及土壤有效镉含量和 pH 的影响,为镉污染土壤的改良及农产品的无公害化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 土壤

根据土壤的酸碱性和有机质含量高低,选择了我国 4 个省区具有代表性的农田土壤,分别为云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙古栗钙土。采样深度为 0~20 cm 耕层,风干去除杂物,首先过 5 mm 尼龙筛,然后外源添加镉($\text{CdSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$),添

加量为国家二级标准 GB 15618—1995(土壤 pH 值小于 7.5 时是 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值大于 7.5 时是 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 2 倍即云南赤红壤、江西红壤和吉林黑土添加量是 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,内蒙栗钙土添加量是 $1.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。混合均匀后老化 3 个月,然后种植小麦,收获小麦后取盆栽剩余的土壤,自然风干,研磨并过 1 mm 尼龙筛,供进行基本理化性质测定及培养试验使用。土壤基本性质见表 1,上述四种土壤全镉含量均超过国家二级标准。

1.1.2 改良剂

鸡粪,pH8.01(水:鸡粪=5:1),全碳为 $265 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;泥炭,pH5.45(水:泥炭=2.5:1),含有机碳 32%;石灰(化学纯),pH13.00,所有改良剂中均未检测出镉(检测限 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.1.3 小白菜

金早生小白菜(*Brassica chinensis*),购于陕西秦兴种苗有限公司。

1.2 试验设计

试验所用改良剂为鸡粪、泥炭、石灰,各改良剂添加量依据文献[14-16]添加量综合考虑,试验处理及物料添加量见表 2。每个处理重复 3 次。

每种供试土壤取 1 kg,按表 2 改良剂添加用量进行添加,混合均匀后装盆,每个处理加水至田间持水量的 70%,平衡三个月后直播小白菜种子。肥料在装盆前以基肥加入,用量为: $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}=0.2+0.3+0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,以尿素和磷酸二氢钾(化学纯)施入,待种

表 2 镉污染土壤培养试验处理及物料添加量

试验处理	物料添加量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土
对照(CK)	0
鸡粪	10
泥炭	10
石灰	7
鸡粪+石灰	7+10
泥炭+石灰	7+10

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

土壤 Soil	pH	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/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
云南赤红壤	5.44	34.26	11.10	2.01	0.81	4.77	0.076	0.773
江西红壤	6.42	11.69	8.70	0.51	0.52	9.96	0.108	0.701
吉林黑土	7.24	32.85	31.11	1.75	0.35	24.58	0.157	0.649
内蒙古栗钙土	8.48	16.30	11.61	0.96	0.38	26.40	0.189	1.366

子发芽一周后,根据小白菜幼苗大小和长势情况,定苗3株,整个生长过程用去离子水灌溉,生长45 d后收获地上部分。

1.3 测定项目和方法

土壤风干后过20目(0.841 mm)尼龙筛备用,对于植物样品先用去离子水洗净,擦干,称鲜重,90℃杀青后65℃烘干至恒重,粉碎备用。土壤pH、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》^[13],土壤有效态镉测定方法为用0.05 mol·L⁻¹的EDTA浸提,土水比1:5,置于振荡机上200 r·min⁻¹往复振荡2 h,然后取于离心机4000 r·min⁻¹离心20 min,取上清液过滤、萃取,然后用原子吸收分光光度计火焰法测定,全镉测定方法为用EPA3052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^[17];土壤pH值采用电位法(水土比为2.5:1)测定。植株镉含量采用HNO₃-HClO₄(V₁:V₂=4:1)消解,原子吸收分光光度计石墨炉法测定(Hitachi Z-5000)。

所得数据先求平均值,然后用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 施用改良剂对小白菜生物量的影响

由图1可以看出,除了单施石灰对吉林黑土和内蒙栗钙土小白菜生物量提高不显著外,其他处理均能够显著提高小白菜生物量。有机物料和石灰配施效果要好于单施有机物料和石灰,石灰+鸡粪增产效果略好于石灰+泥炭,但两配施处理间差异不显著,其中石灰和鸡粪配施可使江西红壤和内蒙栗钙土上小白菜

生物量增幅将近60%;三种改良剂单施处理对小白菜的增产效果依次是鸡粪>泥炭>石灰。与对照处理相比,添加改良剂的各项处理对云南赤红壤小白菜生物量增幅达11.76%~47.06%,对江西红壤小白菜生物量增幅达18.52%~59.26%,对吉林黑土小白菜生物量增幅达19.44%~44.44%(石灰处理除外),对内蒙栗钙土小白菜生物量增幅达15.63%~59.38%(石灰处理除外)。由图1还可以看出,单施石灰对增加南方酸性土壤(云南赤红壤和江西红壤)小白菜生物量效果显著,对增加北方碱性土壤(吉林黑土和内蒙栗钙土)小白菜生长没有抑制作用。其原因可能是石灰含有的营养物质较少,且对北方碱性土上小白菜生长环境改善效果不明显。但施用石灰可以提高南方酸性土的pH,改善小白菜的生长环境,有助于小白菜产量的提高。

2.2 施用改良剂对小白菜地上部分镉含量的影响

由表3可以看出,无论是单施石灰或有机物料还是石灰和有机物料配施均可以显著降低小白菜地

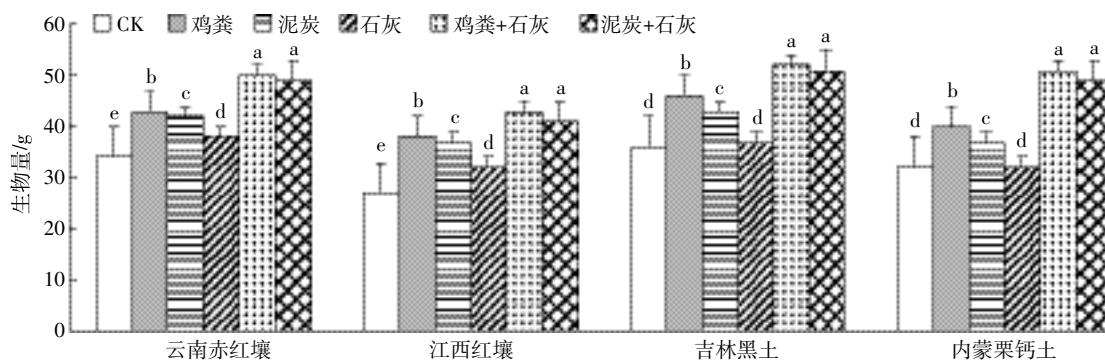
表3 改良剂对不同性质土壤小白菜地上部分镉含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 3 Effects of different amendments on Cd concentrations in *Brassica chinensis* shoots in different soils (mg·kg⁻¹)

处理	云南赤红壤	江西红壤	吉林黑土	内蒙栗钙土
CK	0.032a	0.040a	0.064a	0.066a
鸡粪	0.010bc	0.014b	0.031b	0.024bc
泥炭	0.013b	0.014b	0.029b	0.022c
石灰	0.008c	0.013b	0.023c	0.028b
鸡粪+石灰	0.005d	0.008c	0.015d	0.017d
泥炭+石灰	0.006d	0.009c	0.016d	0.019d

注:同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters within one column mean significant difference at 0.05 level. The same below.



字母不同表示同种土壤的不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different letters for the same soil mean significant difference between different treatments at 0.05 level. The same below

图1 不同改良剂对不同类型土壤小白菜生物量的影响

Figure 1 Effects of different amendments on biomass of *Brassica chinensis* in different soils

上部分镉含量,且石灰和有机物料配施效果好于单施,其中鸡粪+石灰处理使云南赤红壤小白菜地上部分镉含量降低 84.38%,说明添加改良剂能降低土壤中镉的毒性,减少作物对重金属的吸收。由表 3 还可以看出,单施鸡粪与单施泥炭两个处理对降低小白菜地上部分镉含量差异均不显著,而单施石灰或单施有机物料在对每种土壤纵向比较时均表现出一定的差异性:对于云南赤红壤和吉林黑土,单施石灰效果略好于单施有机物料,对于江西红壤,单施有机物料或单施石灰对降低小白菜地上部分镉含量差异不显著,而对于内蒙栗钙土,单施有机物料效果则略好于单施石灰。其原因可能是:云南赤红壤和吉林黑土 pH 值较低且有机质含量较高,施用石灰提高了其 pH 值;江西红壤 pH 值低且有机质含量也低,所以添加石灰或有机物料均能显著降低小白菜地上部分镉含量,单施石灰或有机物料直接效果差异不显著;而内蒙栗钙土 pH 值较高且有机质含量较低,施用有机物料可以提高土壤有机质含量,有机物料效果略好于石灰。

2.3 施用改良剂对土壤 Cd 有效性的影响

由图 2 可以看出,与施用改良剂对小白菜地上部分镉含量的影响相似,对于这 4 种不同性质的土壤,无论是单施有机物料或石灰还是有机物料和石灰配

施均可以显著降低土壤中有效镉含量,且有机物料和石灰配施效果好于单施。与对照相比,不同改良剂处理使云南赤红壤、江西红壤、吉林黑土和内蒙栗钙土上有效镉含量分别下降 37.9%~66.7%、47.4%~67.0%、31.2%~58.4%和 35.6%~60.7%。由图 2 还可以看出,单施鸡粪或单施泥炭对降低土壤有效镉含量差异均不显著,而单施石灰或单施有机物料在不同性质土壤上表现出一定的差异性:在云南赤红壤、江西红壤和吉林黑土上,单施石灰效果好于单施有机物料;而在内蒙栗钙土上,则是单施有机物料效果好于单施石灰。

2.4 施用改良剂对土壤 pH 值的影响

由表 4 可以看出,无论是单施鸡粪或石灰的处理,还是石灰+鸡粪、石灰+泥炭的处理,均显著提高土壤 pH,单施石灰和石灰+鸡粪、石灰+泥炭 3 个处理间对土壤 pH 的提高差异不显著,但这 3 个处理较单施鸡粪处理对各土壤 pH 的提高效果显著,其中:单施石灰和石灰与有机物料配施的处理能使云南赤红壤的 pH 值提升 2.0 左右;单施泥炭对云南赤红壤和江西红壤的 pH 值影响不大,但可以降低吉林黑土和内蒙栗钙土的 pH 值,这可能是泥炭本身的 pH 值 (5.45) 较低导致的。

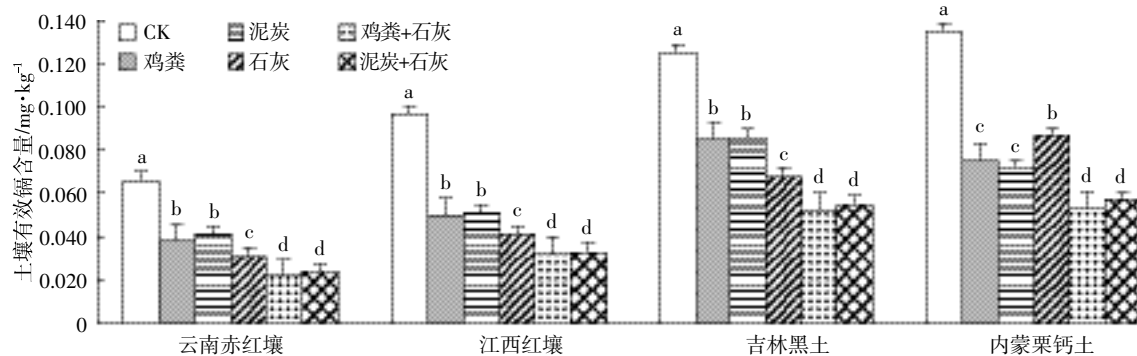


图 2 改良剂对不同性质土壤有效镉含量的影响

Figure 2 Effects of different amendments on available Cd content in different soils

表 4 不同改良剂对不同性质土壤 pH 的影响

Table 4 Effects of different amendments on pH in different soils

处理	云南赤红壤	增减	江西红壤	增减	吉林黑土	增减	内蒙栗钙土	增减
CK	5.44c	—	6.42c	—	7.24c	—	8.48c	—
鸡粪	6.82b	1.38	7.16b	0.74	7.88b	0.64	8.63b	0.15
泥炭	5.34c	-0.10	6.44c	0.02	7.03d	-0.21	8.25d	-0.23
石灰	7.40a	1.96	8.15a	1.73	8.87a	1.63	9.13a	0.65
鸡粪+石灰	7.60a	2.16	8.25a	1.83	8.90a	1.66	9.15a	0.67
泥炭+石灰	7.30a	1.86	8.11a	1.69	8.62a	1.38	9.04a	0.56

3 讨论

一般认为,添加土壤改良剂是降低土壤重金属有效性和植物吸收量的有效途径之一^[18-19],施入改良剂后,土壤理化性质会发生改变,从而改变重金属在土壤中的形态,进而影响其迁移活性。

研究表明,添加石灰可以增加镉污染土壤上作物生物量^[20-22],这些研究的污染土壤均为酸性土壤,但郭利敏等^[23]研究表明,石灰处理对小白菜生物量影响不大(供试土壤 pH 值 6.82)。本研究结果是添加石灰可以显著增加南方酸性土壤上小白菜生物量,而对北方碱性土壤上小白菜生物量增加不显著,原因可能是石灰对南方酸性土和北方碱性土有效镉的钝化效果不同,其中单施石灰使云南赤红壤和江西红壤中有效镉含量下降 53.0%和 57.7%,而使吉林黑土和内蒙栗钙土中有效镉含量下降 45.6%和 35.6%,表明添加石灰对南方酸性土小白菜生物量的增加效果好于北方碱性土。

植物对重金属的吸收及土壤有效态重金属含量受土壤性质的影响,如 pH 值、有机质含量、CEC 等。研究表明,土壤 pH 值是影响土壤中重金属有效态和植物吸收的最主要原因^[24-25]。徐明岗等^[26]和 Naidu 等^[27]的研究均表明土壤中镉的生物有效性随 pH 升高而降低。邱静等^[28]研究表明,添加石灰和磷肥对籽粒苋吸收镉有明显的降低作用;陈宏等^[29]研究也表明,随着石灰用量的增加,土壤有效态镉含量下降,植物各器官镉含量降低。另有研究表明,添加有机物料可以降低土壤重金属污染对作物的危害,如姚丽贤等^[30]研究结果表明,施用鸡粪整体上降低了菜心 Cd 和 Cr 的含量。本研究中添加的改良剂,或是通过提高土壤 pH,或是通过增加有机质,使土壤有效镉和地上部镉含量显著降低,与以上研究结果一致。

无论单施石灰还是石灰与有机物料配施均显著提高了 4 种土壤 pH,土壤中带负电荷颗粒表面的羟基基团和铁的氧化物都可以吸附 Cd,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^[31-32]。石灰中所含一定量的硅、铁离子,对镉的吸收也会产生拮抗作用,因而降低了土壤有效镉和小白菜镉含量,特别是对 pH 值较低的云南赤红壤和江西红壤,改良效果较吉林黑土和内蒙栗钙土更好。有机物料的添加也可以降低土壤镉的生物有效性,其中鸡粪由于其自身呈碱性,能够提高土壤 pH 值,可以促使土壤有效态镉形成沉

淀,特别是对云南赤红壤和江西红壤提高较明显,原因可能是鸡粪还可以在土壤中分解为腐植酸,其中的羧基、羟基、酚羟基等具有对镉的螯合功能,这些基团还可以刺激作物生长。本试验中泥炭处理虽然降低了内蒙栗钙土的 pH,但对 4 种供试土壤的 pH 整体影响不大,它降低了土壤有效镉含量和小白菜对镉的吸收量,其原因可能是泥炭主要成分是有有机质、腐植酸、纤维素等,且比表面积大,有较强的离子交换和盐分平衡控制力^[33],主要通过和镉形成难溶的螯合物来降低镉的毒性。另外,改良剂的添加使小白菜生物量增加,从而对镉产生稀释作用也可能使得作物体内重金属浓度降低。

不同改良剂对土壤有效镉含量和作物对镉的吸收影响不尽一致,可能与改良剂自身的性质以及添加量有关,如石灰主要通过提高土壤 pH 来降低镉的有效性,固其对酸性土改良效果较好,如本试验中,单施石灰使云南赤红壤有效镉含量降低 53.0%,而单施鸡粪和泥炭使云南赤红壤有效镉含量分别降低 42.4%和 37.9%。因为鸡粪和泥炭主要通过提高土壤有机质含量来降低镉的有效性,所以它们对有机质含量低的土壤改良效果较好,如本试验中,单施石灰使内蒙栗钙土有效镉含量降低 35.6%,而单施鸡粪和泥炭使内蒙栗钙土有效镉含量分别降低 44.4%和 46.7%。单施石灰、单施鸡粪、单施泥炭、石灰+鸡粪和石灰+泥炭 5 种处理使 pH 低且有机质含量也低的江西红壤有效镉含量分别下降 57.7%、48.5%、47.4%、67.0%和 66.0%,可见本试验中复合改良剂的效果优于改良剂单施,但不优于两种单施处理之和。现在单一改良剂和复合改良剂研究均较多,但不同改良剂之间可能存在一定的交互作用,机理也更加复杂,有待今后深入的研究。

4 结论

(1)添加改良剂均能提高小白菜生物量,其中有机物料和石灰配施效果要好于单施,两种配施处理之间石灰+鸡粪略好于石灰+泥炭,但差异不显著;单施石灰对增加南方酸性土壤上小白菜生物量效果显著,对增加北方碱性土壤上小白菜生物量效果不显著。

(2)添加改良剂均可以显著降低小白菜中镉含量和土壤中有效镉含量,且有机物料和石灰配施效果好于单施;比较单施有机物料和单施石灰处理,在南方酸性土壤上,单施石灰效果好于单施有机物料,在北方碱性土上,单施有机物料效果则好于单施石灰。

(3)单施鸡粪、单施石灰、鸡粪+石灰和泥炭+石灰4个处理均可以显著提高土壤pH,且石灰、鸡粪+石灰和泥炭+石灰效果好于鸡粪处理;泥炭处理对南方酸性土(云南赤红壤和江西红壤)pH影响不大,但可以降低北方碱性土(吉林黑土和内蒙栗钙土)的pH。

总之,在有机质含量较低的北方镉污染土壤改良上,施用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改良时,要根据不同土壤的理化性质,选择对应的改良剂。

参考文献:

- [1] 陈涛,常庆瑞,刘京,等.长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2152-2159.
CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2152-2159.
- [2] 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.
- [3] Varalakshmi L R, Ganeshamurthy A N. Phytotoxicity of cadmium in radish and its effects on growth, yield, and cadmium uptake[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(9):1444-1456.
- [4] 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.
ZHOU Jian-bin, DENG Cong-jing, CHEN Jin-lin, et al. Remediation effects of cotton stalk carbon on cadmium contaminated soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5):1857-1860.
- [5] 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.
- [6] 郭晓方,卫泽斌,周建利,等.废料碳酸钙对低累积作物玉米吸收重金属的影响:田间实例研究[J].土壤学报,2010,47(5):888-895.
GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, ZHOU Jian-li, et al. Effect of waste CaCO_3 on heavy metals uptake of low-accumulating maize: Field study[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):888-895.
- [7] Cheng S F, Zeng Y H. In-situ immobilization of cadmium and lead by different amendments in two contaminated soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 140:73-81.
- [8] 陈怀满.土壤-植物系统中重金属污染[M].北京:科学出版社,1996.
CHEN Huai-man. Heavy metal pollution of soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [9] 张建新,纳明亮,徐明岗.土壤Cu、Zn、Pb污染对蔬菜根伸长的抑制及毒性效应[J].农业环境科学学报,2007,26(3):945-949.
ZHANG Jian-xin, NA Ming-liang, XU Ming-gang. Inhibition and toxicity of Cu, Zn, Pb on root elongation of vegetable in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):945-949.
- [10] Lee T M, Lai H Y, Chen Z S. Effect of chemical amendments on the concentration of cadmium and lead in long-term contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2004, 57:1459-1471.
- [11] Sally B, Chancy R, Judith H, et al. In situ treatment to reduce the phyto and bioavailability of lead, zinc and cadmium[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33:522-531.
- [12] 郝秀珍,周东美,王玉军,等.泥炭和化学肥料处理对黑麦草在铜尾矿砂上生长影响的研究[J].土壤学报,2004,41(4):645-648.
HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei, WANG Yu-jun, et al. Study of ryegrass growth in copper mine tailing treated with peat and chemical fertilizer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):645-648.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
ZHAN Shao-jun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of different organic material and lime on soil pH and available cadmium[J]. *South-west China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(3):999-1003.
- [16] 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].土壤与环境,2001,11(1):17-21.
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]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 11(1):17-21.
- [17] 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.
- [18] 贾乐,朱俊燕,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.
JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1992-1998.
- [19] 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.
DING Ling-yun, LAN Chong-yu, LIN Jian-ping, et al. Effects of different ameliorations on rice production and heavy metals uptake by rice grown on soil contaminated by heavy metals[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6):1204-1208.
- [20] 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. Effect of amendments on bioavailability of cadmium and zinc in compound contaminated red

- soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 861-865.
- [21] 陈晓婷, 王果, 张亭旗, 等. 石灰与泥炭配施对重金属污染土壤上小白菜生长和营养元素吸收的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 453-455.
- CHEN Xiao-ting, WANG Guo, ZHANG Ting-qi, et al. Incorporation of lime with peat on growth and nutrient elements uptake of pakchiao grown in heavy metal contaminated soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5): 453-455.
- [22] 杜志敏, 郝建设, 周静, 等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的田间原位修复研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 508-517.
- DU Zhi-min, HAO Jian-she, ZHOU Jing, et al. Field in-situ remediation of Cu-Cd polluted soil by four amendments[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 508-517.
- [23] 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 chinesis system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1520-1525.
- [24] Li B, Zhang H T, Ma Y B, et al. Influences of soil properties and leaching on nickel toxicity to barley root elongation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(3): 459-466.
- [25] Eriksson J E. The influence of pH, soil type and time on adsorption and uptake by plants of Cd added to the soil[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1989, 48: 317-335.
- [26] 徐明岗, 李菊梅, 张青. pH 对黄棕壤重金属解吸特征的影响[J]. *生态环境*, 2004, 13(3): 312-315.
- XU Ming-gang, LI Ju-mei, ZHANG Qing. Effect of pH on desorption of heavy metals from yellow brown earth[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3): 312-315.
- [27] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, et al. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45: 419-429.
- [28] 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.
- QIU Jing, LI Ning-yu, HU Qun-qun, et al. Effects of lime and phosphate fertilizer application on the cadmium uptake by grain amaranth[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 187-192.
- [29] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Cd、Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5): 549-552.
- CHEN Hong, CHEN Yu-cheng, YANG Xue-chun. Regulation of phyto-availability of Hg, Cd, Pb in soil by limestone[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 549-552.
- [30] 姚丽贤, 李国梁, 何兆桓, 等. 连续施用鸡粪对菜心产量和重金属含量的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(5): 1113-1120.
- YAO Li-xian, LI Guo-dong, HE Zhao-huan, et al. Yield and heavy metal content of *Brassica parachinensis* influenced by successive application of chicken manure[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5): 1113-1120.
- [31] Tyler L D, McBride M B. Influence of Ca, pH and humid acid on Cd uptake[J]. *Plant and Soil*, 1982, 64: 259-262.
- [32] 陈杰华, 王玉军, 王汉卫, 等. 基于 TCLP 法研究纳米羟基磷灰石对污染土壤重金属的固定[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4): 645-648.
- CHEN Jie-hua, WANG Yu-jun, WANG Han-wei, et al. Assessment of remediation of soil heavy metals with nano-particle hydroxyapatite by toxicity characteristic leaching procedure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 645-648.
- [33] 陆长青, 朱熾婉. 腐植酸-镉化合物的稳定常数[J]. *环境化学*, 1982, 5(1): 365-368.
- LU Chang-qing, ZHU Yan-wan. Study on the stability constants of cadmium-humic acid complexes[J]. *Environmental Science*, 1982, 5(1): 365-368.