

不同改良剂对土壤-叶菜系统 Cd 迁移累积的调控作用

郭利敏^{1,2}, 艾绍英², 唐明灯², 李盟军², 王朝辉¹

(1.西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.广东省农业科学院土壤肥料研究所 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

摘要:为筛选适合在中轻度镉污染土壤上有效降低叶菜吸收镉的改良剂及用量,采用镉污染菜地土壤进行盆栽试验,研究不同用量的石灰、泥炭和碱渣对小白菜(*Brassica chinensis* L.)生物量、镉吸收量,土壤 pH 及有效态镉含量的影响。结果表明,3 种改良剂对小白菜生长均无显著的抑制作用;与不施改良剂的处理相比,石灰、泥炭显著抑制小白菜对镉的吸收,地上部镉含量与石灰和泥炭用量均呈显著负相关关系($R=-0.668$ 、 -0.785 , $P<0.05$),碱渣对小白菜地上部镉含量的影响不显著,但显著增加根系镉含量;改良剂均显著提高土壤 pH,但对 DTPA-Cd 影响不同,石灰显著降低 DTPA-Cd,泥炭、碱渣均有增加 DTPA-Cd 含量的趋势;泥炭对土壤-小白菜系统 Cd 迁移的调控效果最佳,其最佳用量为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,石灰次之,碱渣不适合。

关键词:改良剂;镉污染;化学固定;小白菜,镉含量

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1520-06

Effect of Different Amendments on Translocation and Accumulation of Cadmium in the Soil-*Brassica Chinesis* System

GUO Li-min^{1,2}, AI Shao-ying², TANG Ming-deng², LI Meng-jun², WANG Zhao-hui¹

(1.College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Fertilizer, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Cadmium (Cd) is one of the most toxic and serious environment polluting heavy metals. The application of amendments is an important approach to remediate Cd contaminated soils. A pot experiment was conducted to study the effects of three amendments (lime, peat, alkali slag) and their application dosage on biomass and Cd uptake of *Brassica chinensis*, soil pH, and DTPA-extracted Cd in a Cd contaminated horticultural soil, and to select the suitable amendments for remediating large areas of Cd contaminated farmland soil. The obtained results indicated that applications of three amendments did not inhibit the growth of *Brassica chinensis*. Lime and peat inhibited Cd uptake of *Brassica Chinesis* compared with the control treatment, and there was a positive correlation ($R=-0.668$, -0.785 , $P<0.05$) between the inhibitory effect and the application dosage. However, alkali slag showed no obvious effects on shoot Cd concentration, but significantly increased root Cd concentration of *Brassica chinensis*. Three amendments all improved soil pH, but they had different effects on the DTPA-extracted Cd. Lime greatly decreased DTPA-extracted Cd but alkali slag and peat had both tended to increase DTPA-extracted Cd. Among three amendments, the peat was showed to be the best one for decreasing the shoot Cd, and the optimum was $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Second one was lime. Alkali slag was not suitable to be used as an amendment to remediate Cd contaminated soil.

Keywords: amendment; Cd contamination; chemo-immobilization; *Brassica chinensis*; Cd concentration

镉是一种有毒重金属元素,在土壤中移动性很强,具有一定的致癌和致突变性,易被植物吸收进入

食物链,并在人体内富集^[1-2],严重危害人类健康。如何有效地控制和治理土壤中的镉污染,已成为亟待解决的环境现实问题。通过施用改良剂的化学钝化技术具有经济、方便、对土壤扰动小、容易实施等优点,成为重金属污染土壤修复的重要途径^[3]。我国人多地少的矛盾突出,粮食生产压力大,许多受轻度乃至中度污染的土壤难以休耕而长时间用于土壤修复,因此针对我国一些中轻度镉污染的农田土壤,采取边耕种边修

收稿日期:2010-02-24

基金项目:广东省社会发展计划项目(2006A36703005,2008A030202002);
广东省农业领域重点专项项目(2009A0201005);国家自然科学基金项目(30871596)

作者简介:郭利敏(1984—),女,在读硕士,主要从事农业环境保护与土壤重金属污染修复研究。E-mail:guolimin103@tom.com

通讯作者:艾绍英 E-mail:shaoyingai@21cn.com

复的化学措施,对我国农产品的安全生产及社会经济的可持续发展有着重要意义。

一般认为在镉污染土壤上施加石灰等碱性物质或一些有机物质均能降低作物体内镉含量^[4-6]。石灰能提高土壤的pH,促进重金属生成碳酸盐、氢氧化物沉淀,降低土壤中铅、镉等重金属的生物有效性,从而抑制作物对它们的吸收^[7-8]。邱静等^[9]研究表明,施用石灰使籽粒苋对镉的吸收量下降高达56%。泥炭是一种有机矿产资源,有机质、腐植酸含量高,比表面积大,吸附螯合能力强,能吸附土壤及废水中的 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Ni^{2+} 等重金属离子,并形成土壤有机-无机复合体及有机螯合物等,降低重金属离子活性^[10]。苏天明等^[11]研究表明,施用泥炭可减少土壤DTPA可提取态Cu、Pb、Cr含量,降低菜心根茎叶重金属含量。碱渣是制碱工业的副产品,呈碱性,含有大量的中微量元素,不仅可改良土壤酸性,提高土壤肥力,还可吸附钝化土壤重金属。研究表明,碱渣对溶液中的镉离子有较强的吸附能力^[12],将其作为治理镉污染土壤改良剂,可达到变废为宝,综合利用资源的效果。但这3种改良剂对中轻度镉污染菜田土壤的作用效果及施用量的多少等问题,仍缺乏较系统的研究。

本文针对广州市郊中轻度镉污染菜地土壤进行盆栽试验,以小白菜(*Brassica chinensis* L.)为指示植物,研究不同用量的石灰、泥炭和碱渣对小白菜生长、镉吸收量和土壤镉的生物有效性的影响,比较3种改良剂对土壤镉的钝化效果,探讨其作用机制,以期筛选出能有效降低中轻度镉污染菜地土壤上叶菜体内镉含量的改良剂及其用量,为蔬菜的安全生产及镉污染土壤的治理提供技术支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:广州市市郊某镉污染菜地耕层土壤,采样深度约0~20 cm,风干后过1 cm筛备用。基本理化性质:pH 6.82,有机质 $40.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $2.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $172 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $135 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $362 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全镉 $1.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,DTPA-Cd $0.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试土壤改良剂:石灰(化学纯),全镉未检出;泥炭(市售商品),有机质57.2%,腐植酸52.3%,全镉 $0.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;碱渣(市售商品),全盐15.9%,全镉 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试小白菜品种:上海青,种子购于广州市天河区广东省农业科学院种子市场。

1.2 试验设计与实施

试验所用改良剂为石灰(L)、泥炭(T)和碱渣(A),每种改良剂设4个用量水平,其中石灰为1.5、3、4.5、 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (风干土,下同);泥炭为10、15、20、 $25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;碱渣为3、6、9、 $12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。代号右标1、2、3、4表示改良剂从低到高添加水平,并以不施改良剂为对照(CK),共13个处理,每个处理4次重复。

盆栽试验于2009年8—9月在广东省农业科学院土壤肥料研究所网室进行。供试土壤与改良剂混匀后装盆,每盆装土1.5 kg,浇水至田间最大持水量的75%左右,平衡1 d后直播小白菜种子。肥料用量为N $0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土、 P_2O_5 $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土、 K_2O $0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土,以尿素和磷酸二氢钾(均为化学纯)施入。根据广州市市郊叶菜耕作方式不施基肥,整个生育期追肥3次,先后按设计施用量的30%、35%、35%浇施。每盆定苗3株,生长45 d后收获地上部和根部,先后用自来水、去离子水冲洗干净,擦干、称鲜重,65℃烘干,粉碎备用。同时采集盆栽土壤,风干后过20目尼龙网筛,备用。

1.3 测定方法

小白菜地上部和根系采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (V:V=4:1)消解,原子吸收分光光度法(Hitachi Z-5000)测定待测液镉含量,根据水分含量换算为植物鲜样镉含量进行数据分析;土壤有效态镉含量用DTPA浸提-原子吸收分光光度法(Hitachi Z-5000)测定^[13];土壤pH值采用电位法(水土比为2.5:1)测定。

1.4 计算公式

转运系数 = 植物地上部分镉含量/地下部分镉含量^[14](以鲜重计)

1.5 数据分析

应用Microsoft Excel和SPSS10.0进行有关数据的计算、统计与处理,统计方法采用LSD多重比较法,差异显著性水平为5%。

2 结果与分析

2.1 改良剂对小白菜生物量的影响

从图1可以看出,与不施改良剂的对照相比,石灰、泥炭和碱渣及其不同用量对小白菜生物量的影响不大,且变化规律不明显,均未显著降低小白菜生物量($P>0.05$),且碱渣用量 $3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理生物量显著增加($P<0.05$),这表明3种改良剂的施用不会抑制小白菜的生长。

2.2 改良剂对小白菜镉吸收和转运的影响

由表1可知,施用改良剂对小白菜地上部镉含量

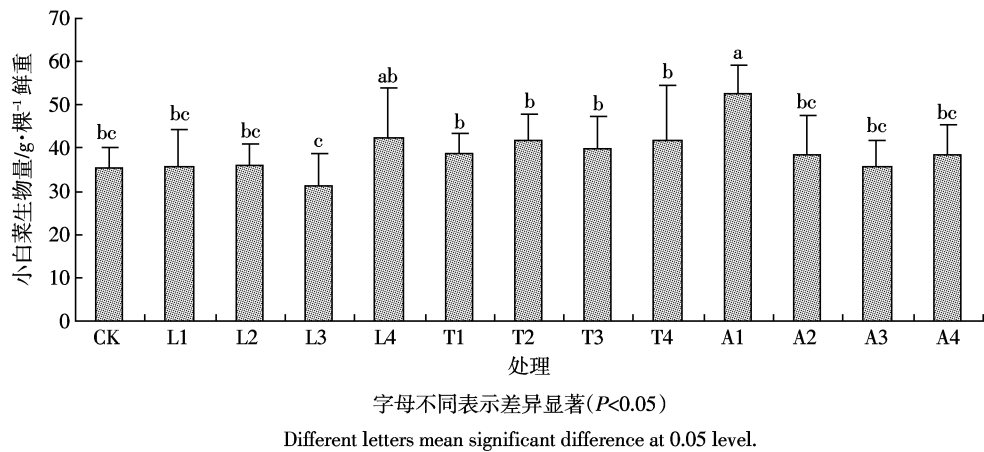


图 1 改良剂对小白菜生物量的影响

Figure 1 Effect of amendments on biomass of *Brassica chinensis*

产生影响。与对照相比,施用石灰、泥炭均降低小白菜地上部镉含量,且地上部镉含量与二者用量均呈显著负相关关系($R=-0.668$ 、 -0.785 , $P<0.05$), 4.5 、 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 石灰和 15 、 20 、 $25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 泥炭处理显著降低小白菜地上部镉含量,其中 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 石灰与 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 泥炭处理效果最好,分别比对照降低了 31.0% 、 42.6% ;与对照相比,碱渣对小白菜地上部镉含量没有显著影响($P>0.05$),但低用量(3 、 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)时有增加小白菜地上部镉含量的趋势,高用量(9 、 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)时镉含量呈降低趋势。

改良剂对小白菜根系镉含量亦有影响。由表 1 可见,与对照相比,石灰和泥炭处理小白菜根系镉含量均有降低趋势,但随着用量的增加变化规律不明显;碱渣处理与对照相比小白菜根系镉含量增加,用量为 3 、 6 、 $9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达显著水平($P<0.05$),不同用量间差异不显著。

转运系数可用来评价植物将重金属从根系向地上部的迁移能力,转运系数越大表明重金属在植物体内越容易向地上部迁移。与对照相比,石灰处理没有显著影响镉的转运系数,表明石灰不是通过影响转运系数来降低叶菜地上部镉含量;泥炭和碱渣处理镉的转运系数降低,其中 $25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 泥炭, 9 、 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碱渣降低显著($P<0.05$),表明泥炭、碱渣抑制镉从根系向地上部迁移(表 1)。

2.3 改良剂对土壤 pH 及有效态镉的影响

土壤 pH 是影响重金属有效性的重要因素之一。从图 2 可以看出,与对照相比,3 种改良剂处理均不同程度地显著提高土壤 pH 值,其中石灰效果最佳,pH 增加了 $0.32\sim 0.94$ 个单位;碱渣次之,pH 增加了

表 1 改良剂对小白菜地上部和根系镉含量的影响

Table 1 Effects of amendments on Cd concentration of *Brassica chinensis* shoots and roots

处理	地上部/ mg·kg ⁻¹	比对照 降低/%	根系/ mg·kg ⁻¹	比对照 降低/%	转运 系数
CK	0.050 6a	—	0.131 3a	—	0.39a
L1	0.042 6ab	15.81	0.108 6a	17.29	0.39a
L2	0.041 1ab	18.77	0.129 4a	1.47	0.32a
L3	0.036 0b	28.85	0.103 9a	20.89	0.35a
L4	0.034 9b	31.03	0.101 8a	22.45	0.34a
CK	0.050 6a	—	0.131 3a	—	0.39a
T1	0.038 9ab	23.12	0.120 2a	8.45	0.32a
T2	0.035 2bc	30.43	0.101 0a	23.06	0.35a
T3	0.029 1c	42.59	0.096 0a	26.92	0.30ab
T4	0.030 3bc	40.12	0.115 0a	12.44	0.26b
CK	0.050 6abc	—	0.131 3b	—	0.39a
A1	0.059 2ab	-16.90	0.199 5a	-51.93	0.30ab
A2	0.061 0a	-20.55	0.197 0a	-50.01	0.31ab
A3	0.035 9c	29.15	0.211 3a	-60.90	0.17c
A4	0.045 7bc	9.78	0.170 3ab	-29.71	0.27b

注:多重比较为同一改良剂不同用量间比较,字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Multiple comparison was taken among different doses of the same amendment. Different letters mean significant difference at 0.05 level. The same below.

$0.39\sim 0.55$ 个单位;泥炭影响较小,pH 升高 $0.21\sim 0.45$ 。对 3 种改良剂而言,土壤 pH 与其施用水平显著正相关($R=0.977$ 、 0.940 、 0.792 , $P<0.05$)。

植物对土壤镉的吸收富集主要取决于土壤有效态镉的含量。本研究采用 DTPA 提取态镉(DTPA-Cd)来表示土壤有效态镉的含量。从图 3 可以看出,3 种

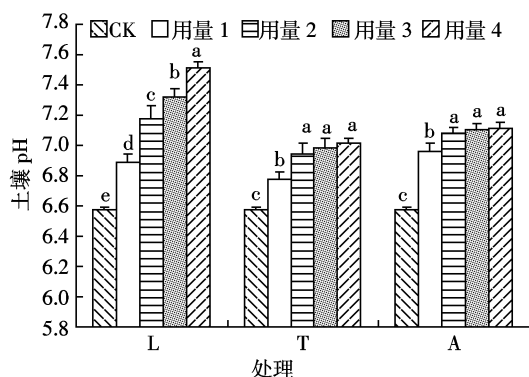


图2 改良剂对土壤 pH 的影响

Figure 2 Effect of amendments on soil pH

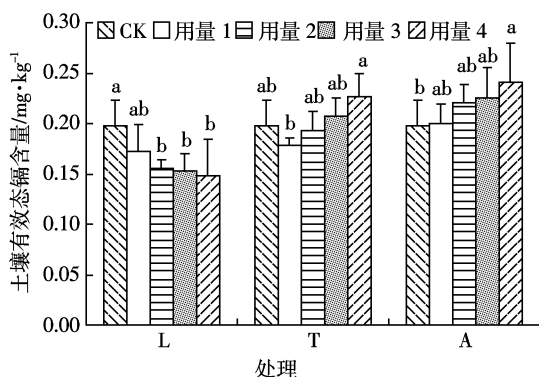


图3 改良剂对土壤 DTPA 提取有效态镉含量的影响

Figure 3 Effect of amendments on soil DTPA-Cd

改良剂对土壤有效态镉含量的影响不同。与对照比较,石灰降低了土壤 DTPA-Cd 含量,用量为 3、4.5、6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达显著水平,其中 6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 石灰处理降幅高达 25.4%;土壤 DTPA-Cd 含量随泥炭、碱渣施用量的增加而呈递增趋势,但泥炭各处理较对照无显著差异,碱渣处理与对照比较,用量为 12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达显著水平。相关分析结果表明,石灰处理的土壤 DTPA-Cd 含量与土壤 pH 呈显著负相关($R=-0.636, P<0.05$),泥炭、碱渣处理的土壤 DTPA-Cd 含量与土壤 pH 无负相关关系。

3 讨论

石灰、泥炭处理显著降低了小白菜对镉的吸收,且地上部镉含量与二者用量均呈显著负相关关系($R=-0.668, -0.785, P<0.05$)。但二者对土壤 pH 及 DTPA-Cd 的影响不同。施加石灰显著提高了土壤 pH 值,降低土壤有效态镉含量;泥炭提高土壤 pH,但土壤 DTPA-Cd 含量随着泥炭用量的增加而呈递增趋势。这表明二者抑制小白菜吸收镉的作用机制不同。

石灰提高土壤的 pH,促进重金属生成碳酸盐、氢

氧化物沉淀^[15],降低土壤中重金属的有效态镉含量,从而抑制作物对镉的吸收。陈宏等^[16]和高彬等^[17]研究也表明,随着石灰用量的增加土壤 pH 升高,土壤有效态镉含量下降,植物各部位镉的含量降低。本文石灰处理的效果与此一致。

泥炭有机质、腐植酸含量较高,可提高土壤对 Cd 的络合或螯合能力,降低土壤易溶态镉含量,增加有机结合态及残渣态镉含量(数据待发表)。Ham 等^[18]报道施用泥炭土壤有机结合态镉含量增加。李永涛等^[20]也报道 DTPA-Cd 包含了部分有机结合态镉及氧化物结合态镉,且 DTPA-Cd 含量随有机质含量的增加显著增加^[21-22],本文不同用量泥炭处理的土壤 DTPA-Cd 含量增加情况与此一致,其实质是 pH 升高使 DTPA-Cd 含量降低与有机质提高 DTPA-Cd 含量的共同效果,后者起主导作用。但有机结合态镉被认为是缓效性的形态,有效性低,且分子量较大的复杂有机结合态镉一般不能被植物吸收^[19],小白菜对镉的吸收因土壤镉的植物有效性降低而减少。这说明在本研究条件下 DTPA-Cd 不能很好地反映泥炭对小白菜吸收镉的影响。

碱渣提高土壤 pH,但增加小白菜地上部和根系镉含量及土壤 DTPA-Cd 含量,这可能与含有大量游离的盐基离子及较高量的 Cl^- 有关(Cl^- 含量为 5.36%)。研究显示, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子可与 Cd^{2+} 竞争土壤胶体上的吸附位点,导致土壤对镉的吸附量减少^[23];Escrig 等^[24]研究发现土壤添加 CaCl_2 的浓度由 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤对镉的吸附能力下降 1/3 左右。 Cl^- 存在对植物吸收镉有促进作用,Smolders 等^[25]采用溶液培养研究不同 Cl^- 浓度对瑞士甜菜吸收镉影响,发现甜菜茎叶及根系镉含量均显著增加。刘平等^[26]研究表明, Cl^- 存在时镉不易被土壤吸收,且吸附后易被解吸,使土壤有效态镉含量增加。这主要是因为 Cl^- 和 Cd^{2+} 易络合成 CdCl_n^{2-n} , 提高镉的有效性,且 Cl^- 可促进 Cd^{2+} 扩散到植物根系表面,以利于植物对镉的吸收^[27]。这说明碱渣由于离子成分多、盐分含量高,施入土壤后离子间的竞争吸附及协同吸收作用占主导地位,pH 对镉有效性的影响较之不显著,进而增加土壤镉的有效性,促进小白菜对镉的吸收。

4 结论

在镉污染菜田土壤上施用石灰、泥炭、碱渣对小白菜生长均没有显著的抑制作用,因此在生产当中不会显著降低叶菜产量。

石灰、泥炭显著抑制小白菜对镉的吸收,且地上部镉含量与二者用量均呈显著负相关关系($R=-0.668$ 、 -0.785 , $P<0.05$),碱渣对小白菜地上部镉含量的影响不显著,但显著增加根系镉含量。改良剂均显著提高土壤 pH,但对 DTPA-Cd 影响不同,石灰显著降低 DTPA-Cd,泥炭、碱渣均有增加 DTPA-Cd 含量的趋势。

从试验中 3 种改良剂对土壤-叶菜系统 Cd 吸收的抑制效果来看,泥炭最佳,其最佳施用量为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此可作为 Cd 污染农田土壤的参考施用量;石灰的作用效果次之,且随着用量的增加,抑制作用增强,在使用的过程中可结合土壤理化性质,特别是土壤 pH,在一定范围内选择较高的石灰用量,达到土壤镉污染修复的理想效果;碱渣有增加土壤镉有效性的趋势,促进小白菜对镉的吸收,不适宜作为镉污染土壤的改良剂。

参考文献:

- [1] 夏运生,王凯荣,张格丽.土壤镉生物毒性的影响因素研究进展[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3):272-275.
XIA Yun-sheng, WANG Kai-rong, ZHANG Ge-li. Research advances in influence factors of phytotoxicity of cadmium in soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(3):272-275.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Sally B, Chaney 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.
- [5] Urszula K, Rufus L C. Amelioration of nickel phytotoxicity in muck and mineral soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30:1949-1960.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 夏汉平.土壤-植物系统中镉研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(3):289-298.
XIA Han-ping. Studies on cadmium in soil-plant system[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1997, 3(3):289-298.
- [9] 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 Environment*, 2009, 18(1):187-192.
- [10] Pellegrino C, Anna A, Riccardo S, et al. Soil remediation: Humic acids as natural surfactants in the washings of highly contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135:515-522.
- [11] 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, et al. 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.
- [12] 金春姬,张鹏,曹焯,等.碱渣对 Cd^{2+} 的吸附特性研究[J]. 化工环保, 2008, 28(3):230-234.
JIN Chun-ji, ZHANG Peng, CAO Xuan, et al. Adsorption characteristics of cadmium ions on alkaline sludge[J]. *Environment Protection of Chemical Industry*, 2008, 28(3):230-234.
- [13] 王辉,王亮,都韶婷.土壤重金属元素生物有效性分析方法的研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(5):8-15.
WANG Hui, WANG Liang, DU Shao-ting. Research progresses in analytical method on bioavailability of heavy metals in soil[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2008, 15(5):8-15.
- [14] 聂发辉.关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境, 2005, 14(1):136-138.
NIE Fa-hui. New comprehensions of hyperaccumulator[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1):136-138.
- [15] 杜彩艳,祖艳群,李元.施用石灰对大白菜中 Cd, Pb, Zn 含量的影响[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(6):810-812, 818.
DU Cai-yan, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effect of lime on the contents of Cd, Pb, Zn in chinese cabbage[J]. *Journal of Yunnan Agriculture University*, 2005, 20(6):810-812, 818.
- [16] 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.
- [17] 高彬,王海燕.土壤 pH 对植物吸收镉、锌的影响试验[J]. 广西农业科学, 2003, 3:53-55.
GAO Bin, WANG Hai-yan. Effect of soil pH on absorption of cadmium and zinc by plant[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2003, 3:53-55.
- [18] Iskong Ham, 胡林飞,吴建军,等.泥炭对土壤镉有效性及镉形态变化的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(6):1436-1441.
Iskong Ham, HU Lin-fei, WU Jian-jun, et al. Effects of peat application on the DTPA extractable Cd and Cd fractions in two contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6):1436-1441.
- [19] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社, 2000:212.
HUANG Chang-yong. Soil Science[M]. Beijing: Agriculture Press of China, 2000:212.
- [20] 李永涛,刘科学,张池,等.广东大宝山地区重金属污染水田土壤

- 的 Cu、Pb、Zn、Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6):1110-1114.
- LI Yong-tao, LIU Ke-xue, ZHANG Chi, et al. Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal contaminated paddy soils of Dabaoshan, Guangdong[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1110-1114.
- [21] 黄德乾, 王全英, 朱浩文, 等. 苏南地区土壤和水稻籽粒镉污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):560-563.
- HUANG De-qian, WANG Quan-ying, ZHU Hao-wen, et al. Survey and assessment of Cd pollution paddy soil and rice grain in southern Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):560-563.
- [22] 万红友, 周生路, 赵其国, 等. 苏南经济快速发展区土壤有效态镉含量影响因素及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2):213-218.
- WAN Hong-you, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo, et al. Characteristics in the distribution of available cadmium in soil with analysis of its influential factors in fast economy developing region of south Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(2):213-218.
- [23] 宋正国, 徐明岗, 刘平, 等. 钙钾共存在赤红壤镉吸附的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5):993-996.
- SONG Zheng-guo, XU Ming-gang, LIU Ping, et al. Effects of co-existing cations, Ca, K and Zn on adsorption of cadmium in lateritic red soil[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5):993-996.
- [24] Escrig I, Morell I. Effect of calcium on soil adsorption of cadmium and zinc in some Spanish sandy soils[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1998, 105(3-4):507-520.
- [25] Smolders E, McLaughlin M J. Chloride increase cadmium uptake in Swiss chard in a resin-buffered nutrient solution[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60:1443-1447.
- [26] 刘平, 徐明岗, 宋正国. 伴随阴离子对土壤中铅和镉吸附-解吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):252-256.
- LIU Ping, XU Ming-gang, SONG Zheng-guo. Effects of accompanying anions on adsorption-desorption of Pb and Cd by two typical soils of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):252-256.
- [27] 黄益宗. 镉与磷、锌、铁、钙等元素的交互作用及其生态学效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2):92-97.
- HUANG Yi-zong. Interactions between cadmium and phosphorus, zinc, iron, calcium and their ecological effects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(2):92-97.