

改良剂对重金属污染红壤的修复效果及评价

徐明岗, 张青, 王伯仁, 李菊梅, 孙楠

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了施用改良剂—石灰、有机肥、海泡石对红壤上小油菜生物产量、镉锌吸收量、pH、吸收系数的影响。结果表明, 施用改良剂, 连续种植 3 季小油菜 (*Brassia campestris* L.) 的生物产量都显著提高, 石灰、有机肥和海泡石配施的产量是对照的 15 倍。改良剂能不同程度提高红壤的 pH, 以石灰的效果最好, 土壤 pH 平均升高了 2 个单位; 而且小油菜对镉锌的吸收也较低。小油菜对镉的吸收系数大于对锌的吸收系数, 说明镉容易在土壤—植物体系中迁移, 施用改良剂后吸收系数降低。施石灰的小油菜中锌含量达到食品卫生标准。改良剂对提高土壤 pH 的后效逐渐减弱, 对抑制小油菜吸收锌的后效不如抑制镉的后效好。

关键词: 改良剂; 红壤; 重金属污染; 修复

中国分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)01-0121-06

Evaluation the remediation effects of amendments in heavy metal polluted red soil

XU Ming-gang, ZHANG Qing, WANG Bai-ren, LI Ju-mei, SUN Nan

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture of China, Beijing 100081, China)

Abstract: A pot experiment was carried out in greenhouse to observe the yield, the absorption amount of cadmium and zinc of rape (*Brassia campestris* L.), and soil pH responses to different amendments (lime, manure and sepiolite) applied in red soil, a typical soil of China. The results indicated that the biomass yield of rape increased after amendments application. The treatment of lime, manure and sepiolite co-application showed the highest yield, which increased 15 times comparing with no amendments application. The soil pH was increased in various degrees with different amendments or their co-application. Application lime could increase soil pH around 2 units. This made the absorption amount of cadmium and zinc was very low. The uptake coefficient of Cd was bigger than that of Zn, which implied that Cd was easy move from soil to plant. The uptake coefficient was decreased with application lime especially. The content of Zn in rape decreased lower than the food standard after application of lime to red soil. The after-effect of amendments on soil pH was worn off with time. The aftereffect of amendments to Cd was better than that of Zn.

Key words: amendment; red soil; heavy metal pollution; remediation

红壤是我国南方典型的地带性土壤, 分布广泛、酸性强, 有机质含量低。当重金属进入该土壤时, 由于其 pH 比较低、吸附力弱、阳离子交换量小, 因而重金属离子的活性较高, 容易被作物吸收, 通过食物链进入人体, 危害人们的健康。因此, 需要采用多种方法来降低重金属的危害, 减少作物的吸收。主要的方法有物理工程措施、生物措施和农业措施。在重金属中轻度污染的耕地上, 农业措施应用比较广

泛, 施用改良剂是农业措施中效果好、操作简单的方法之一。丁园等^[1]研究表明, 污染红壤增施石灰石能改善黑麦草的生长, 降低黑麦草的重金属含量。Walker 等^[2-3]研究认为, 施入有机肥可以降低重金属的有效性, 不但能提高植物的产量, 还能降低植株中 Cu、Zn、Mn 的含量, 提高土壤的 pH。

据报道, 天然沸石是一种带阴离子的有空隙的铝硅酸盐物质, 能够降低土壤中 Pb、Cd、Zn 的生物有

收稿日期: 2007-12-03

接受日期: 2008-05-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB410809); 国家科技支撑计划项目(2006BAD05B09, 2008BADA7B03)资助。

作者简介: 徐明岗(1961—), 男, 研究员, 长期从事土壤肥力与污染土壤环境的修复研究。E-mail: mgxu@caas.ac.cn

效性^[4];污染土壤中加入石灰,能降低重金属的溶解性^[5-6];还有研究指出,污染土壤中施入无机改良剂如石灰,天然沸石和红泥能降低重金属的活性,还能影响土壤中微生物的组成^[7-8]。目前,对改良剂改善土壤性质和提高作物产量的研究较多,而对改良剂修复不同重金属污染土壤的效果及其后效研究的较少。本研究在种植多季小油菜的基础上,分析讨论改良剂原位钝化修复重金属污染土壤的效果,对改良剂的修复效果进行评价。

1 材料与方法

盆栽试验在中国农业科学院土壤肥料研究所网室进行。所用土壤为红壤,取自湖南祁阳中国农业科学院红壤试验站(N 26°45'36", E 111°52'12"),是典

型的酸性土。土壤基本性质为:pH 5.42,碱解氮 71.7 mg/kg,全氮 0.87 g/kg,速效磷(Olsen-P) 6.0 mg/kg,全磷 0.44 g/kg,速效钾(中性醋酸铵浸提) 70 mg/kg,有机质 14.9 g/kg,全镉 0.119 mg/kg,全锌 86.5 mg/kg。供试作物为小油菜(*Brassia campestris* L.)。试验采用3种性质不同的改良剂:石灰、有机肥和海泡石;有机肥由中国农科院畜牧研究所提供。改良剂的性质和用量见表1。

试验设8个处理,分别为:1)不施改良剂作对照(CK);2)施用石灰(L);3)施用有机肥(OM);4)施用海泡石(S);5)施用石灰和有机肥(LOM);6)施用石灰和海泡石(LS);7)施用有机肥和海泡石(OMS);8)施用石灰、有机肥和海泡石(LOMS)。4次重复。

表1 试验用3种改良剂的基本性质

Table 1 Basic properties of different amendments used

改良剂 Amendment	用量 Dosage	全 N	全 P	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni
		Tot. N	Tot. P					
		(g/kg)			(mg/kg)			
石灰 Lime	3	0.02	0.004	0.16	1.23	0.58	0.02	0.93
有机肥 Manure	20	19.54	27.60	0.28	67.3	4.32	149.8	6.69
海泡石 Sepiolite	4	0.02	0.06	0	2.69	0	2.745	3.35

人工培育成三级镉锌污染土壤(加入硝酸盐使重金属量达到 Cd 1 mg/kg, Zn 500 mg/kg),放置一个月后装盆。每盆装土 2 kg,施入相应的改良剂,按每千克土 N、P₂O₅、K₂O 分别为 0.15、0.18、0.12 g 的用量施入底肥,种植小油菜,每盆留苗 5 株。连续种 3 季,每季的管理一致。整个生长过程用去离子水浇灌,生长 50 d 后收获,取土壤样品。

小油菜(*Brassia campestris* L.)中镉、锌含量的测定采用王水和高氯酸消解;土壤样品采用盐酸、硝酸和高氯酸消解^[9];用美国产 ICP-OES(电感耦合等离子体发射光谱仪)测定溶液中镉、锌浓度。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对小油菜生物产量的影响

不施改良剂的土壤上,第1季小油菜出苗后 10 d 叶片发黄,生长缓慢,再过 10 d 后,小油菜死亡,可能是由于重金属的活性太高所致。施入改良剂不同程度地提高了其生物产量。其中,3种改良剂配施处理小油菜的生物产量最大,比单施石灰、有机肥和海泡石分别增产 138.6%、62.3%和 171.1%,但与石灰和有机肥配施处理没有显著差异(表2)。改良

剂单施以有机肥的效果最好,这可能是因为红壤的基础肥力较低,有机肥在提高肥力的同时,能降低重金属的毒性,提高生物产量。这与华珞等^[10]的有机肥明显提高了镉-锌污染土壤上小麦产量的研究结果一致。

种植第2季,由于重金属的老化,活性降低,对照土壤上小油菜虽然成活,但生物产量仍很低。改良剂的施用提高了小油菜的生物产量,其中以3种改良剂配施的生物产量最大,比石灰、有机肥和海泡石单施分别增产 58.7%、5.2%和 359.5%。主要是因为改良剂的施用抑制了小油菜对 Cd、Zn 的吸收,提高了小油菜的产量。

第3季盆栽试验结果为石灰、有机肥和海泡石单施比对照分别增产 11.7、12.6 和 2.9 倍,这与陈晓婷等^[11]的研究结果一致,其在重金属污染的红壤上施入石灰,显著地增加了小白菜的株高和鲜重。

种植3季的结果都表明,提高小油菜生物产量的效果是:有机肥>石灰>海泡石。各处理中凡施有机肥的处理生物产量均高于不施有机肥的处理,因此,既考虑到经济因素,又考虑到修复效果,经济有效的方法是石灰和有机肥配施;在养分含量较低

表 2 不同处理对 3 季小油菜的生物产量的影响(g/pot, DW)

Table 2 Effect of different treatments on biomass of rape during three harvests

处理 Treatment	第 1 季 1st harvest	第 2 季 2nd harvest	第 3 季 3rd harvest
CK	—	0.058 a	0.102 a
L	0.585 a	0.550 b	1.302 b
OM	0.860 ab	0.830 de	1.386 b
S	0.515 a	0.190 a	0.398 a
LOM	1.236 c	0.848 e	1.929 cd
LS	0.622 a	0.600 bc	1.835 cd
OMS	0.982 b	0.798 d	1.646 c
LOMS	1.396 cd	0.873 e	2.124 cd

注 (Note): L—石灰 Lime; OM—有机肥 Manure; S—海泡石 Sepiolite; LOM—石灰 + 有机肥 Lime + Manure; LS—石灰 + 海泡石 Lime + Sepiolite; OMS—有机肥 + 海泡石 Manure + Sepiolite; LOMS—石灰 + 有机肥 + 海泡石 Lime + Manure + Sepiolite. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平,下同。Different letters in each row mean significant at 5% level. The same below.

的土壤上,单施有机肥也是抑制作物对重金属吸收比较好的方法。

2.2 不同改良剂对小油菜吸收镉、锌的影响

重金属污染的红壤中,施入不同的改良剂后小油菜吸收重金属数量也不同。随着时间的延长,改良剂对降低小油菜吸收重金属的作用也在改变(图 1)。

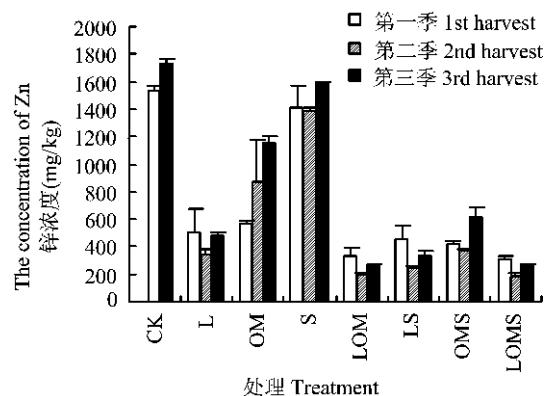
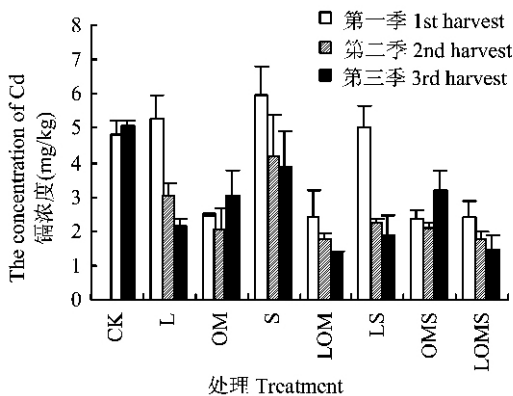


图 1 施入改良剂后三季小油菜的镉、锌吸收量

Fig. 1 The absorption amount of Cd and Zn by rape growing in red soil with application of different amendments

2.3 施入改良剂对土壤 pH 的影响

有研究表明,土壤中重金属离子的生物有效性随 pH 的升高而下降^[14]。降低土壤 pH 会减弱土壤有机/无机胶体及土壤粘粒对金属离子的吸附能力,使土壤溶液中有效态和交换态重金属离子数量增加

第一季对照土壤上由于重金属有效性高,小油菜不能成活。加入改良剂都能降低小油菜对镉、锌的吸收,3 种改良剂单施时,以施用石灰的效果最好,其次是有机肥,海泡石的效果最差。李明德等^[12]的研究表明,污染土壤中施入高量海泡石能明显降低空心菜对镉的吸收;王凯荣等^[13]的研究认为,污染土壤中施入石灰性改良剂能够有效抑制水稻对 Pb、Cd 的吸收,而且有机物料(稻草和猪厩肥)的改良效果不如石灰性物质好,与本试验结果一致。

第 3 季盆栽,3 种改良剂单施小油菜对镉的吸收比对照分别降低 58%、40%、24%,对锌的吸收分别降低 72%、33%、8%。改良剂配施的效果比单施效果好,有石灰的比没有石灰的好。3 种改良剂配施的效果最好,但和石灰与有机肥配施效果没有显著差异。

改良剂抑制小油菜对镉、锌的吸收随着时间的延长效果也在变化。小油菜对镉的吸收第 2 季低于第 1 季,第 3 季大部分低于第 2 季,说明改良剂对镉的抑制后效能持续 3 季以上。小油菜体内锌含量第 2 季低于第 1 季,第 3 季高于第 2 季,与第 1 季相差不大,说明改良剂抑制小油菜对锌的吸收能持续 2 季。在锌污染的土壤上要持续抑制作物对锌的吸收,则可以隔 1 季施加 1 次改良剂,而镉污染的土壤上抑制作物对镉的吸收可以隔 2 季施加 1 次改良剂。

从而增加植物对重金属的吸收;反之,土壤 pH 增加,植物对金属的吸收量将降低^[15]。

施入改良剂能显著提高土壤的 pH (图 2),其提高土壤 pH 的效果是石灰 > 有机肥 > 海泡石,比对照分别提高 2.0、1.3 和 1.1,这与陈晓婷等^[11]、孙健

等^[16]、丁凌云等^[17]、王凯荣等^[13]的研究结果一致。改良剂对土壤 pH 的影响随着时间的延长而减弱。种植第二季,各处理的土壤 pH 都低于第一季,第三季低于第二季,但都高于未施改良剂的土壤。这可能是由于土壤的缓冲作用所致,也说明改良剂对提高土壤 pH 存在一定的后效。

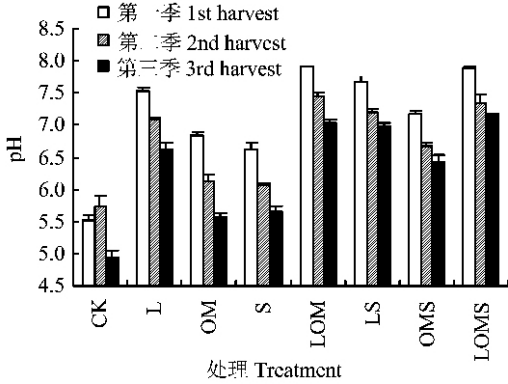


图 2 施用不同改良剂的三季盆栽土壤的 pH

Fig.2 pH of red soil with application of different amendments

2.4 不同改良剂处理小油菜对镉、锌的吸收系数

吸收系数是指作物某一部位中某一元素的浓度与土壤中元素浓度之比,可代表土壤-作物体系元素迁移的难易程度。吸收系数越高,这种元素在土壤-作物体系中越易迁移;反之,吸收系数越低,这种元素就越难以迁移。

不同改良剂对红壤中小油菜镉、锌吸收系数影响(表 3)表明,单施海泡石的小油菜对镉的吸收系

数最大,其次是单施有机肥的,施用石灰的作物对镉的吸收系数较低;3 种改良剂配合施用,镉的吸收系数最低。说明海泡石对抑制镉向地上部分迁移的效果较差,即海泡石对有效态镉的固定作用不如其它改良剂;而石灰能有效地抑制镉的移动和吸收。

第二季小油菜对镉的吸收系数普遍低于第一季,对照吸收系数最高,加入改良剂后吸收系数都有不同程度的下降。3 种改良剂比较,作物吸收系数仍以施石灰的最低,施有机肥次之,单施海泡石的较高。第三季小油菜镉的吸收系数有不同程度的改变,施用石灰的处理作物吸收系数比第二季有所升高,而单施有机肥或海泡石的作物镉的吸收系数降低,说明石灰在第二季时后效仍较好,第三季时后效逐渐变差。有机肥和海泡石的后效作用较长,但是其改良效果比石灰的差。

红壤中锌的作物吸收系数比镉低,说明锌在土壤-作物体系中的迁移性比镉差。这是因为镉在土壤中主要是非专性吸附,移动性比较大^[18]。丁凌云等^[17]用重金属的有效态与总量的比值来判断重金属在土壤中的迁移能力,比值越大,说明越容易在土壤中迁移,得出的结论是 Cd > Zn > Pb,与本试验的研究结论一致。表 3 还可看出,不同改良剂影响小油菜对锌的吸收系数的规律与对镉的吸收系数的规律是一致的,而且石灰的后效不如有机肥和海泡石的长;但是,石灰在当季抑制小油菜吸收重金属的效果最好。

表 3 红壤上施用不同改良剂后小油菜对镉、锌的吸收系数

Table 3 The uptake coefficient of Cd and Zn from rape growing in red soil with application of various amendments

处理 Treatment	镉 Cd			锌 Zn		
	第一季 1st harvest	第二季 2nd harvest	第三季 3rd harvest	第一季 1st harvest	第二季 2nd harvest	第三季 3rd harvest
CK		3.86 e	4.16 e		2.61 e	2.95 f
L	2.03 a	1.74 abc	2.10 c	1.03 d	0.57 b	0.94 c
OM	2.87 d	1.84 c	1.72 b	1.03 d	1.52 c	1.47 d
S	3.82 e	3.54 d	3.36 d	2.31 e	2.37 d	2.31 e
LOM	2.16 b	1.67 ab	1.47 a	0.62 ab	0.33 a	0.52 b
LS	2.19 bc	1.79 bc	1.95 c	0.84 c	0.42 a	0.65 b
OMS	2.31 c	1.82 c	3.45 d	0.75 bc	0.61 b	0.54 b
LOMS	2.01 a	1.63 a	1.55 ab	0.56 a	0.31 a	0.3 a

2.5 施用不同改良剂植株中重金属含量达到食品卫生标准的情况

表 4 看出,3 季小油菜中镉的含量都大于食品

卫生标准(0.05 mg/kg),但是施入改良剂能不同程度降低小油菜中的镉含量。3 种改良剂单施时,以施石灰处理的小油菜体内镉含量最低,其次是有机

肥处理,海泡石对抑制小油菜镉的吸收效果最差;3种改良剂同时施用,小油菜体内镉的含量最低,其次是有机肥与海泡石配施,改良剂配施效果好于单施。

改良剂对抑制小油菜吸收镉有较好的后效。第二季盆栽小油菜中镉的含量普遍低于第一季植株中镉的含量;第三季单施石灰和海泡石的小油菜中镉的含量继续降低,但单施有机肥的小油菜中镉的含量比第二季升高,有机肥与海泡石配施的镉含量也升高,其他处理镉的含量比第二季低。

改良剂对小油菜中锌的含量比对镉的影响大。第一季小油菜中锌含量都大于食品卫生标准(20 mg/kg),第二季施用了石灰的小油菜中锌的含量低于食品卫生标准;而没有施石灰的高于食品卫生标准,对照土壤小油菜锌含量最高。第三季盆栽只有石灰与有机肥配施和3种改良剂配施的锌含量低于食品卫生标准,其它处理都比第二季升高,且都高于食品卫生标准,这可能是由于改良剂对抑制小油菜吸收锌的后效减弱的结果。

表4 红壤施用不同改良剂后小油菜鲜样体内镉、锌含量(mg/kg)

Table 4 Cd and Zn content in fresh rape with application of different amendments to red soil

处理 Treatment	镉 Cd			锌 Zn		
	第一季 1st harvest	第二季 2nd harvest	第三季 3rd harvest	第一季 1st harvest	第二季 2nd harvest	第三季 3rd harvest
CK		0.507 f	0.504 f		117.1 f	119.6 d
L	0.219 d	0.186 c	0.152 c	29.5 ab	18.8 b	24.2 a
OM	0.264 e	0.258 d	0.260 d	38.1 bc	45.4 d	97.9 c
S	0.342 f	0.318 e	0.312 e	151.5 e	103.7 e	120.1 d
LOM	0.181 b	0.095 a	0.083 a	24.7 a	9.4 a	15.8 a
LS	0.201 c	0.137 b	0.131 b	42.9 cd	13.5 ab	22.7 a
OMS	0.168 ab	0.110 a	0.239 d	51.3 d	35.8 c	46.0 b
LOMS	0.156 a	0.096 a	0.092 a	22.3 a	9.1 a	16.5 a

食品卫生标准 The food sanitary standard : Cd 0.05 mg/kg, Zn 20 mg/kg.

3 结论

1) 施入改良剂后能显著提高小油菜的生物产量,其作用大小顺序为有机肥 > 石灰 > 海泡石。改良剂能明显降低小油菜对重金属的吸收量,3种改良剂降低小油菜吸收重金属的顺序为:石灰 > 有机肥 > 海泡石;3种改良剂配施的效果最好,与石灰和有机肥配施的效果相近。改良剂抑制作物对镉的吸收后效好于对锌的吸收。

2) 施入不同改良剂后,能不同程度提高土壤 pH,从而降低植物对重金属的吸收。改良剂对提高土壤 pH 的效果随时间的延长逐渐减弱。

3) 植物对镉的吸收系数大于对锌的吸收系数,说明镉比锌容易迁移到植物。施有石灰的吸收系数小于未施石灰的,施用海泡石的吸收系数最大。石灰对抑制作物对镉、锌的吸收后效不如有机肥和海泡石长,但是石灰在当季的抑制效果最好。

4) 施用改良剂虽能不同程度降低小油菜中镉的含量,但镉的含量仍然超过国家食品卫生标准;

施用石灰的处理镉的含量低于未施。第一季小油菜中锌的含量都超过国家食品卫生标准;第二季和第三季施用石灰的小油菜中锌含量低于食品卫生标准。

参考文献:

- [1] 丁园,刘继东. 重金属复合污染红壤增施石灰对黑麦草生长的影响[J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版),2003,17(1):22-25.
Ding Y, Liu J D. Impacts of heavy metals contamination in red soil on the ryegrass growth under the treatments of calcareousness[J]. J. Nanchang Inst. Aeronaut. Tech. (Nat. Sci.), 2003, 17(1):22-25.
- [2] Walker D J, Clemente R, Roig A, Bernal M P. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soil[J]. Environ. Poll., 2003, 122: 303-312.
- [3] Walker D J, Clemente R, Bernal M P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste[J]. Chemosphere, 2004, 57: 215-224.
- [4] Castaldi P, Santona L, Cozza C et al. Thermal and spectroscopic studies of zeolites exchanged with metal cations[J]. J. Mol. Struct., 2005, 734: 99-105.

- [5] Castaldi P, Santona L, Melis P. Heavy metals immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth[J]. *Chemosphere*, 2005, 60 : 365-371.
- [6] Chlopecka A, Adriano D C. Mimicked in-situ stabilization of metals in a cropped soil : bioavailability and chemical form of zinc[J]. *Environ. Sci. Tech.*, 1996, 30 : 3294-3303.
- [7] Bertocchi A F, Ghiani M, Peretti R, Zucca A. Red mud and fly ash for remediation of mine sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb and Zn[J]. *J. Hazard. Mater.*, 2006, 134 : 112-119.
- [8] Gray C W, Dunham S J, Dennis P G *et al.* Fields evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud [J]. *Environ. Poll.*, 2006, 142 : 530-539.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京 : 中国农业科技出版社 2000.
Lu R K. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Beijing : China Agricultural Sciencetech Press, 2000.
- [10] 华珞, 白铃玉, 韦东普, 陈世宝. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响[J]. *中国环境科学*, 2002, 22 (4) : 346-350.
Hua L, Bai L Y, Wei D P, Chen S B. Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn on Cd, Zn formation in soil and wheat growth [J]. *China Environ. Sci.*, 2002, 22 (4) : 346-350.
- [11] 陈晓婷, 王果, 张潮海, 方玲. 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 X T, Wang G, Zhang C H, Fang L. Effects of lime and peat on the growth and element uptake of *Brassica chinensis* in Cd, Pb, and Zn contaminated soil[J]. *Soil Environ. Sci.*, 2001, 11 (1) : 17-21.
- [12] 李明德, 童潜明, 汤海涛, 何英豪. 海泡石对镉污染土壤改良效果的研究[J]. *土壤肥料*, 2005 (1) : 42-44.
Li M D, Tong Q M, Tang H T, He Y H. Study on the amelioration effect of meerscham in Cd contaminated soil[J]. *Soils Fert.*, 2005 (1) : 42-44.
- [13] 王凯荣, 张玉烛, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26 (2) : 476-481.
Wang K R, Zhang Y Z, Hu R G. Effects of different types of soil amelioration materials on reducing concentrations of Pb and Cd in brown rice in heavy metal polluted paddy soils[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2007, 26 (2) : 476-481.
- [14] Cotter-Howells J, Capom S. Remediation of contaminated land by formation of heavy metal phosphates[J]. *Appl. Geochem.*, 1996, 11 : 335-342.
- [15] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, Tiller K G. Ionic-strength and pH effects on the adsorption of cadmium and lead on the surface charge of soil[J]. *Eur. J. Soil Sci.*, 1994, 45 : 419-429.
- [16] 孙健, 铁柏清, 周浩, 等. 不同改良剂对铅锌尾矿污染土壤中灯心草生长及重金属积累特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25 (3) : 637-643.
Sun J, Tie B Q, Zhou H *et al.* Effect of different amendments on the growth and heavy metals accumulation of *Juncus effuses* grown on the soil polluted by lead/zinc mine tailings[J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2006, 25 (3) : 637-643.
- [17] 丁凌云, 蓝崇钰, 林建平, 束文圣. 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 L Y, Lan C Y, Lin J P, Shu W S. Effects of different ameliorations on rice production and heavy metals uptake by rice grown on soil contaminated by heavy metals[J]. *Ecol. Environ.*, 2006, 15 (6) : 1204-1208.
- [18] 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 M G, Li J M, Zhang Q. Effect of pH on desorption of heavy metals from yellow brown earth[J]. *Ecol. Environ.*, 2004, 13 (3) : 312-315.