

改良剂对黄泥土镉锌复合污染修复效应与机理研究

徐明岗, 张青, 曾希柏

(中国农业科学院土壤肥料研究所农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了镉锌复合污染黄泥土中施用石灰、有机肥、海泡石对小油菜生物产量、镉锌吸收量、土壤中镉锌形态转化、pH 等的影响。结果表明, 施用改良剂, 小油菜 (*Brassica chinensis* Linn) 连种 3 季的生物产量都显著提高, 对镉锌的吸收量降低, 其中以石灰和有机肥配施的效果最好, 增产 170% 以上; 改良剂单施降低小油菜对镉锌的吸收以石灰的效果较好, 海泡石的最差。这主要是因为施用改良剂后镉锌的交换态减少, 而对作物有效性低的碳酸盐结合态、铁锰氧化态和残渣态增加, 同时, pH 也有不同程度的升高。小油菜对镉的吸收系数大于锌的吸收系数, 说明镉在土壤中的移动性比锌大, 施用石灰降低吸收系数的效果最好。石灰与有机肥配施能够显著提高镉锌复合污染黄泥土的修复效率, 与对照相比, 修复镉污染的效率提高 13.5 倍; 修复锌污染的效率提高 2.4 倍。

关键词: 改良剂; 小油菜; 镉; 锌; 复合污染; 吸收系数

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1361-06

Effects and Mechanism of Amendments on Remediation of Cd-Zn Contaminated Paddy Soil

XU Ming-gang, ZHANG Qing, ZENG Xi-bai

(Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture of China, Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Amendments are widely applied in agricultural soils to improve soil quality and crop yield. Effects of three amendments, lime, manure, and sepiolite on cadmium (Cd) and zinc (Zn) bioavailability in contaminated paddy soils were studied by pot experiment with cultivating rape. There were eight treatments, including lime, manure, and sepiolite separately applied and combined with others in contaminated soil. The biomass yield of rape was investigated after harvest. The amounts of absorbed Cd and Zn in harvested rape with application amendments were determined. Besides soil pH, different forms of Cd and Zn in the conducted soils were also measured. Results showed that the yield of rape increased after amendments application. The treatment of lime and manure co-application showed the highest increasing yield by more than 170% comparing with no amendments application in the eight treatments. The amount of absorbed Cd and Zn in rape decreased after the three amendments application. Lime application showed the best effect to decrease the heavy metal content in rape when amendments were separately applied. However, sepiolite could hardly decrease the content in rape after separately applied in contaminated soil. It was mainly due to the decrease of exchangeable Cd and Zn, which was available for rape, after lime application. Soil pH in these treatments increased in response. Accordingly, the carbonate combined and the Fe-Mn oxide fractions, which were unavailable in soil for rape, increased greatly. The uptake coefficient of Cd was higher than that of Zn. It indicated that Cd was more movable in soil and lime application could obviously decrease the uptake coefficient. The remediation efficiency was significantly improved in the treatment of co-application with lime and manure in Cd-Zn contaminated paddy soil. Compared with control (CK), it increased 13.5 times for Cd and 2.4 times for Zn, respectively.

Key words: amendment; rape; Cd; Zn; combined contamination; uptake coefficient

近年来,随着工农业生产的发展,废弃物的增多及其处理不当,许多农田受到重金属的污染^[1,2],这些重金属可能会通过植物吸收并经食物链进入人体,严重威胁人体健康^[3,4]。因此,必须采取措施对重金属污染的土壤进行治理。目前,治理重金属污染农田的方法很多,有物理措施、生物措施和农业措施等。

改良剂作为农业增产的一项措施,已经得到了较普遍的应用,如在酸性土壤上,施用石灰、有机肥可以克服土壤酸、瘦等特性,实现作物高产。近年来的研究表明,石灰、有机肥和海泡石等除可改良土壤不良特性外,还可以降低重金属的生物有效性,从而

实现土壤改良与修复的联合,即通过合理施用改良剂,达到对污染农田重金属的修复与调控。

石灰能提高土壤 pH,降低重金属有效性^[5,6];有机肥中的胡敏酸和胡敏素等能络合污染土壤中的重金属离子并生成难溶的络合物^[7,8];海泡石有大的内外表面积,能吸附重金属离子,降低植物的吸收^[9~11]。目前,就这 3 种改良剂对土壤重金属生物有

收稿日期: 2006-06-21; 修订日期: 2006-08-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB410809)

作者简介: 徐明岗(1961~),男,研究员,主要研究方向为土壤肥力及污染土壤环境的修复, E-mail: mgxu@caas.ac.cn

效性虽有一些研究,但对它们配施的效果和机制还鲜见报道;此外,改良剂对单一重金属污染土壤的效应研究较多,但对目前普遍存在的重金属复合污染或混合污染的研究也鲜见报道.本实验对这 3 种改良剂单一和配合施用对镉锌复合污染黄泥土修复效应与机理进行研究,以期为轻、中度重金属复合污染农田的联合修复措施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤和改良剂

供试土壤为采自浙江嘉兴(N30°51'35",E120°42'36")的黄泥土(1 种典型的水稻土,按中国土壤系统分类名为人为土),近 10 a 改种蔬菜,采样深度 0~20 cm.土壤基本性质为:pH 6.4,碱解氮 212 mg•kg⁻¹,全氮 2.33 g•kg⁻¹,速效磷 243 mg•kg⁻¹,全磷 2.01 g•kg⁻¹,速效钾 120 mg•kg⁻¹,有机质 43.1 g•kg⁻¹,全镉 0.266 mg•kg⁻¹,全锌 127.2 mg•kg⁻¹.

选用 3 种不同性质的常用改良剂:石灰、有机肥(猪粪)和海泡石.改良剂的用量和基本性质见表 1.

1.2 试验设计

表 1 供试 3 种改良剂的基本性质
Table 1 Basic properties of the three kinds amendments used

改良剂	用量/g•kg ⁻¹	全 N/g•kg ⁻¹	全 P/g•kg ⁻¹	Cd/mg•kg ⁻¹	Zn/mg•kg ⁻¹	Ph/mg•kg ⁻¹	Cu/mg•kg ⁻¹	Ni/mg•kg ⁻¹
石灰	3	0.02	0.004	0.16	1.23	0.58	0.02	0.93
有机肥	20	19.54	27.60	0.28	673.9	4.32	149.8	6.69
海泡石	4	0.02	0.06	0	2.69	0	2.745	3.35

试验设 8 个处理,分别为:①CK(对照:不施改良剂);②L(施石灰);③OM(施有机肥);④S(施海泡石);⑤LOM(施石灰和有机肥);⑥LS(施石灰和海泡石);⑦OMS(施有机肥和海泡石);⑧LOMS(施石灰、有机肥和海泡石).为了研究 3 种改良剂对土壤肥力的影响,另设了 4 个无污染土壤上施加 3 种不同改良剂的处理,除不加重金属外,其它都与上述操作一样.

1.3 试验过程

人工培育成镉、锌 3 级污染土壤(土壤加入硝酸镉和硝酸锌,使镉、锌含量分别达到 1 mg•kg⁻¹和 500 mg•kg⁻¹),放置 1 个月进行稳定化.然后进行盆栽试验,每盆装土 2 kg,以大田作物施肥量的 2 倍施入底肥,N、P₂O₅、K₂O 用量分别为 0.15、0.18、0.12 g•kg⁻¹,施入相应的改良剂,种植小油菜(*Brassica chinensis* Linn),该品种小油菜耐寒性稍差,低温干旱情况下易发生抽薹,适宜生长的时间是每年 5 月初~9 月底,适宜生长在中等肥力以上的土壤.每盆定植 5 株,4 次重复.收获后 1 个月施入和第 1 次同量的底肥,不施改良剂,种植第 2 季小油菜,如此种植第 3 季.试验在中国农业科学院土壤肥料研究所网室进行.

1.4 测定方法

本研究中测定的土壤重金属形态是 2004-10-20 采自第 2 季盆栽的土壤,土壤采集后风干,磨细,过 1 mm 筛,备用.重金属形态提取采用 Tessier 的方

法^[12],植株消煮方法参见文献[13].溶液中重金属的测定采用原子吸收方法.

称取过 1 mm 风干土壤 1.000 g,放入离心管内,以下列方法连续提取不同形态.

(1)交换态 加入 8 mL 1 mol/L MgCl₂(pH 7),在室温下连续振荡 1 h,然后在 10 000 r/min 离心 30 min.

(2)碳酸盐结合态 向第(1)步残渣中加入 8 mL 去离子水,离心 30 min 后清液倒掉.再加入 8 mL 1 mol/L NaOAC(用 CH₃COOH 调 pH 到 5.0),室温下连续振荡 5 h,于 10 000 r/min 离心 30 min.

(3)铁-锰氧化物结合态 向第(2)步残渣中加入 8 mL 去离子水,离心 30 min 后清液倒掉.再加入 20 mL 0.04 mol/L NH₂OH•HCl(在体积分数为 25% HOAC 中),在(96±3)℃的水浴锅中持续 6 h,并偶尔搅拌.冷却后于 10 000 r/min 离心 30 min.

(4)有机质结合态 向第(3)步残渣中加入 8 mL 去离子水,离心 30 min 后清液倒掉.再加入 3 mL 0.02 mol/L HNO₃ 和 5 mL 30% H₂O₂(用 HNO₃ 调至 pH 2),然后在(85±2)℃的水浴锅中持续加热 2 h,并偶尔搅拌.再加入 3 mL 30% H₂O₂(用 HNO₃ 调至 pH 2),在(85±2)℃的水浴锅中持续加热 3 h,并偶尔搅拌.然后冷却,冷却后加入 5 mL 3.2 mol/L NH₄Ac(在体积分数为 20% HNO₃ 中),稀释到 20 mL 并连续搅拌 30 min,于 10 000 r/min 离心 30 min.

(5)残渣态 将(4)步后的土壤用去离子水清洗,转移到三角瓶中蒸干,采用总量分析方法进行消

解和分析.

2 结果与讨论

2.1 不同改良剂施用下小油菜的生物产量

第1季盆栽,不施改良剂的土壤上,小油菜出苗后15 d,叶片发黄,生长缓慢,再过15 d后,小油菜死亡,这可能是由于重金属的活性太高导致小油菜中毒.施入改良剂不同程度地提高了其生物产量.其中,石灰和有机肥配施下生物产量最大,比单施石灰和有机肥分别增产 23.1%和 20.9%,比海泡石单施增产 235.1%(表 2).海泡石单施下生物产量最低,改良效果最差,这与李支援等的研究不一致^[10],可能是因为该土壤有机质含量高,基础肥力较高.因此,在污染的黄泥土上,石灰和有机肥配施是较好的改良方法,单施石灰或单施有机肥的效果也比较好.

第2季盆栽,由于重金属的老化,活性降低,对照土壤上小油菜虽成活,但生物产量仍较低.改良剂的施用不同程度地提高了小油菜的生物产量,其中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 37.9%、50.9%和 156.8%.这可能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,石灰、有机肥和海泡石单施比对照分别增产 102%、45.9%和 8.7%.3季的结果都表明,提高小油菜生物产量的顺序是石灰>有机肥>海泡石,而且最经济有效的方法是石灰和有机肥配施,在养分含量比较高的土壤上,单施石灰也是抑制作物对重金属吸收比较好的方法.

表 2 3季小油菜的生物产量¹⁾/g·pot⁻¹

Table 2 Dry weight of rape (three harvests)/g·pot ⁻¹			
处理	第 1 季	第 2 季	第 3 季
CK	—	0.345a	0.479a
L	2.206a	0.698b	2.577cd
OM	2.245a	0.638b	1.701bc
S	0.810d	0.375a	0.502a
LOM	2.715a	0.883cd	2.491cd
LS	2.114b	0.803bcd	2.760d
OMS	1.297c	0.640b	1.474b
LOMS	2.133b	0.963d	2.427cd

1)同列数字后不同字母表示 5%显著水平差异显著,下同

无污染土壤中施有机肥、石灰和海泡石的生物产量与不施改良剂的无显著差异(表 3),说明在试验的黄泥土上施入几种改良剂对土壤肥力影响不大.在污染土壤上几种改良剂对小油菜生物产量增加的原因,主要是改良剂施入后通过与土壤中重金

属相互作用,能抑制小油菜对重金属的吸收,从而增加产量.

表 3 无污染土壤上小油菜的生物产量/g·pot⁻¹

Table 3 Dry weight of rape in uncontaminated soil/g·pot ⁻¹			
处理	第 1 季	第 2 季	第 3 季
不加重金属,不施改良剂	2.315b	0.925b	2.661b
不加重金属,施有机肥	2.367b	0.950b	2.958b
不加重金属,施石灰	2.168ab	0.897ab	2.489ab
不加重金属,施海泡石	2.206ab	0.912ab	2.830b

2.2 施用不同改良剂后小油菜的重金属含量

小油菜对镉、锌的吸收量与土壤中镉、锌含量特别是有有效态镉、锌含量有关,施用不同的改良剂后小油菜对镉、锌的吸收量也不同(图 1).对照土壤由于有效态重金属的含量较高,第 2、3 季小油菜镉含量比其它处理的高(第 1 季小油菜死亡);施用改良剂能降低小油菜对镉的吸收,第 2 季施用石灰、有机肥和海泡石小油菜吸收镉分别降低 28.9%、23.9%和 2.1%,改良剂配施时,以石灰和有机肥配施效果最好,镉的吸收降低 38.6%,3 种改良剂配施的效果与石灰和有机肥的效果没有显著差异[图 1(a)].施入土壤中的有机肥虽然本身含有一定量的镉、锌,但是因为施加有机肥的量比较少,即施入有机肥带进土壤的镉为0.005 6 mg·kg⁻¹,锌为 13 mg·kg⁻¹,与外加土壤的镉锌量相比(Cd: 1 mg·kg⁻¹, Zn: 500 mg·kg⁻¹),可以忽略不计.第3季改良剂对降低小油菜吸收镉的规律与第2季相同.

第2季小油菜镉含量低于第1季,第3季与第2季相差不大,有小部分处理高于第2季,说明改良剂对降低小油菜对镉的吸收有一定的后效,但后效在逐渐减弱.

改良剂对降低小油菜吸收锌的效果比对镉的效果好,如图 1(b)所示.对照土壤小油菜体内锌含量很高,施用改良剂大幅度降低了小油菜体内锌含量.施用石灰对降低小油菜锌的吸收效果最好,其次是有机肥,海泡石的效果最差.施用石灰、有机肥和海泡石小油菜锌的吸收量分别降低 85.0%、52.5%和 15.9%,施有石灰降低小油菜吸收锌都在 80%以上,主要是因为石灰能大幅度提高土壤 pH, pH 对锌的形态影响比较大.改良剂对降低第3季小油菜吸收锌的规律与前2季一样.

第2季小油菜体内锌含量大部分处理都低于第1季,而第3季各处理小油菜体内锌含量稍高于第2季,但低于第1季,这说明改良剂对锌的修复后效较好,但效果逐渐减弱,要维持高能力的修复效果,则

需继续施加改良剂.

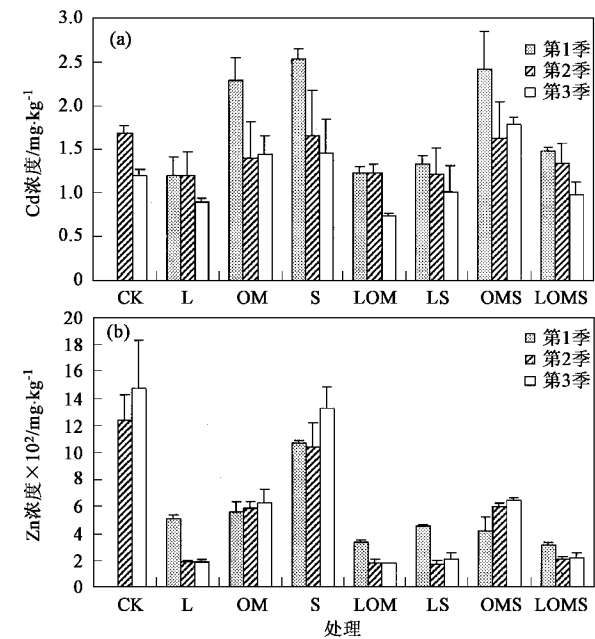


图1 施用不同改良剂的3季小油菜体内镉(a)和锌(b)含量

Fig.1 Absorption content of Cd (a) or Zn (b) in rape after applying various amendments

2.3 施用不同改良剂土壤 pH 的变化

未施改良剂的土壤 pH 较低,施用改良剂后 pH 有不同程度的提高(图 2),这也是施用改良剂后植物对重金属的吸收量降低的一个原因,与 Cotter-Howells 等^[14]和 Naidu 等^[15]的研究结果一致.土壤 pH 增加,植物对金属的吸收量将降低,这主要是因为土壤 pH 升高会减弱土壤有机/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减少从而降低植物对重金属的吸收.

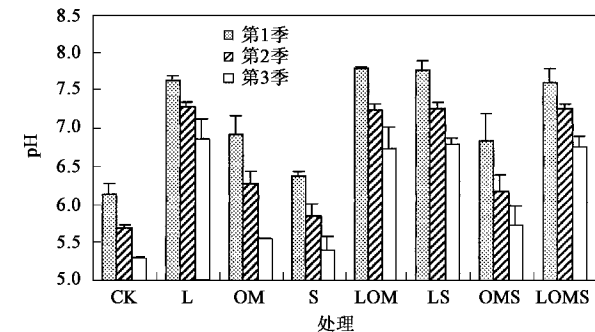


图2 黄泥土施用不同改良剂3季盆栽土壤的 pH

Fig.2 Soil pH with different amendments on paddy soil

其中施用石灰对土壤 pH 影响比较大,可使土壤 pH 提高 1.5 个单位,有机肥和海泡石分别提高土

壤 pH 0.8 和 0.2 个单位,所有施石灰的土壤 pH 都提高 1.5 个单位以上,有机肥和海泡石配施的土壤 pH 提高了 0.7 个单位,与有机肥单施的效果相近.第 2 季盆栽各处理的土壤 pH 都低于第 1 季,第 3 季又低于第 2 季,但比未施改良剂土壤的 pH 高,这可能是由于土壤的缓冲作用,使 pH 向未施改良剂之前的值变化,改良剂对提高土壤 pH 的效果逐渐减弱.

2.4 施用不同改良剂重金属形态的变化

尽管许多学者对于土壤中重金属的连续提取法中形态间的严格划分还存在许多疑虑,但对于土壤中重金属形态的连续提取却能定性地区分重金属在土壤多相体系中的结合状态及其结合的能量大小以及相应的生物有效性^[16].因此,测定土壤中重金属的形态,可以定性区分其生物有效性.

对照土壤中镉形态主要以植物可吸收利用的交换态存在(约为 50%),而有机态和残渣态占的比例比较小(表 4).因为其交换态所占的比例较大,对植物产生危害,致使生物产量大幅度降低,这也验证了重金属的形态是决定重金属植物有效性的基础^[17,18].施用改良剂,明显降低了交换态镉的量,促使镉向对植物无害的形态转化,特别是施用石灰后交换态镉的量降低了 21.4%,碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态占的比例增加,使镉向无效态转化.施用海泡石交换态镉的量只降低了 5.8%,同时碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态也增加.还可看出,施石灰可以使土壤交换态镉的含量显著降低.所以,施用石灰对降低交换态镉效果比较好,主要是因为石灰能提高土壤 pH.因此,在酸性及中性偏酸性土壤上,石灰是一种良好的重金属污染土壤的修复剂.

Zn 与 Cd 不同,Zn 进入土壤后主要以植物不易吸收利用的铁锰氧化物结合态(约 66%)存在(表 4),其次为碳酸盐结合态(约 21%)、有机结合态(约 6%),交换态和残渣态占的比例较低.施用石灰,使交换态锌的比例降低了 4.8%,对植物有效性低的铁锰氧化物结合态和有机态的锌增加.施用有机肥,使交换态和碳酸盐结合态锌的量分别降低 3.7%和 1.8%,铁锰氧化物结合态和有机态锌的量增加.石灰和有机肥配施或 3 种改良剂配施,其效果与石灰单施的效果相近.海泡石对降低交换态锌的效果最差.

2.5 施用改良剂小油菜的镉锌吸收系数

吸收系数(作物某一部位中某一元素的浓度与土壤中元素浓度之比)表征了重金属由土壤向植物

表 4 黄泥土上施入改良剂后镉锌各形态比例¹⁾/%

Table 4 Speciation of Cd and Zn in paddy soil after application different amendments/%										
处理	Cd					Zn				
	Exch	Carb	FeMnOX	OM	Res	Exch	Carb	FeMnOX	OM	Res
CK	50.5e	18.0ab	31.3a	0.1abc	0.1a	5.2e	20.6cd	65.7ab	5.8a	2.7a
L	29.1a	24.9c	45.4bc	0.5cd	0.1a	0.4a	16.9bc	74.1bc	6.1a	2.5a
OM	37.4bc	17.9ab	43.6abc	0.4d	0.6a	1.5b	15.1ab	75.0bc	6.2a	2.2a
S	44.7de	20.5bc	34.0ab	0.0bcd	0.8a	4.3d	24.3d	61.4a	6.5a	3.4a
LOM	33.6ab	16.0ab	46.8bc	0.0a	3.5b	0.3a	10.9a	80.5c	6.1a	2.3a
LS	37.2bc	16.0ab	46.6bc	0.1abc	0.2a	0.3a	11.1a	79.7c	6.1a	2.7a
OMS	42.0cd	14.6a	43.0abc	0.1ab	0.2a	2.5c	17.3bc	72.6bc	5.2a	2.4a
LSOM	32.4ab	18.0ab	48.6c	0.6bcd	0.3a	0.3a	11.6a	80.3c	5.4a	2.4a

1)Exch、Carb、FeMnOX、OM、Res 分别代表镉锌的交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、有机结合态和残渣态

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,这种元素就越难迁移.试验结果表明(表 5),①镉的吸收系数大于锌的吸收系数,说明镉在土壤-作物体系中比锌更容易迁移;②施用海泡石的土壤作物镉锌吸收系数较大,施用石灰的镉锌的吸收系数较低;③第 2 季作物镉锌的吸收系数低于第 1 季,第 3 季与第 2 季相近,各种改良剂中,石灰降低作物吸收的效果最好,其次是有机肥,海泡石的效果最差.改良剂对土壤的修复有好的后效,但是石灰的后效不如有机肥和海泡石的长.

2.6 施用不同改良剂对污染土壤修复效果的比较

3 季小油菜的生长情况和重金属吸收量不甚一样.本研究采用 3 季小油菜生物产量和吸收量的平均值,来粗略地比较施用改良剂与未施改良剂小油菜对镉、锌的吸收量,计算施用不同改良剂对污染黄泥土的修复速率(表 6).施用不同的改良剂,小油菜对重金属的吸收提取量也不同.以不施用改良剂污染土壤自然修复过程的吸收量为 1,则施用有机肥、

表 5 黄泥土上施用不同改良剂后小油菜对镉锌的吸收系数

Table 5 Uptake coefficients of Cd and Zn of rape in paddy soil applied different amendments						
处理	Cd			Zn		
	第 1 季	第 2 季	第 3 季	第 1 季	第 2 季	第 3 季
CK	—	1.39d	1.34c	—	2.00d	2.53d
L	1.13a	0.99ab	1.01b	1.03d	0.30a	0.35a
OM	2.16c	1.05ab	1.29c	1.03d	0.97b	0.91b
S	1.98c	1.26cd	1.20c	1.74e	1.73c	1.65c
LOM	1.11a	0.91a	0.66a	0.62ab	0.29a	0.32a
LS	1.11a	0.99ab	0.98b	0.84c	0.28a	0.39a
OMS	2.04c	1.35d	1.28c	0.75bc	0.99b	0.92b
LOMS	1.32b	1.11bc	1.01b	0.56a	0.36a	0.35a

石灰或有机肥与石灰配施的土壤 Cd 修复效率可以提高 11 ~ 13 倍;锌修复效率可以提高 1.9 ~ 3.8 倍.

单施海泡石修复污染黄泥土的效果没有单施石灰或有机肥的好,同时,施用石灰能使小油菜中重金属含量达到蔬菜卫生标准,因此,石灰和有机肥配施是比较好的修复方法.

表 6 施用不同改良剂修复污染黄泥土的效果

Table 6 Effect of different amendments on remediation of Cd-Zn contaminated paddy soil							
处理	Cd 吸收量 /mg•kg ⁻¹	Zn 吸收量 /mg•kg ⁻¹	生物量 /g•pot ⁻¹	Cd 吸收量 /μg•pot ⁻¹	Zn 吸收量 /μg•pot ⁻¹	Cd 吸收量 相对值	Zn 吸收量 相对值
CK	0.117	95.3	3.90a	0.457	371.7	1.00	1.00
L	0.080	11.6	62.46b	4.997	724.5	10.93	1.95
OM	0.131	36.4	38.26c	5.025	1 394.1	11.00	3.75
S	0.164	84.0	7.80d	1.279	654.9	2.80	1.76
LOM	0.081	11.5	76.24b	6.176	876.8	13.51	2.36
LS	0.090	12.5	66.90b	6.021	838.5	13.18	2.26
OMS	0.152	38.3	36.85c	5.602	1 412.7	12.26	3.80
LOMS	0.096	13.1	70.97b	6.789	932.1	14.86	2.51

3 结论

(1)施用改良剂能提高小油菜的生物产量,降低重金属的吸收量,其效果以石灰和有机肥配施的效果最好;改良剂单施,以石灰的效果最好,海泡石的效果最差.

(2)施用改良剂使重金属由对植物有效性大的交换态向对植物有效性小的碳酸盐结合态、铁锰氧化态和残渣态转化,施用石灰交换态镉降低了21.4%,交换态锌降低了4.8%,改良剂配施时以施有石灰的处理降低交换态金属的效果最好,降低的程度与单施石灰的效果相近.

(3)施用石灰的土壤 pH 均提高 1.5 个单位以上,比施用有机肥和海泡石的都高,这也是施用石灰的土壤交换态重金属降低的主要原因.改良剂对提高土壤 pH 的效果逐季减弱.

(4)镉的吸收系数大于锌.施用改良剂能降低小油菜对镉锌的吸收系数,其中以石灰与有机肥配施的效果最好;石灰与有机肥配施比未施改良剂缩短了土壤达到食品安全生产的时间.

参考文献:

[1] Grant C A, Buckley W T, Bailey L D, *et al.* Cadmium accumulation in crops [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1998, **78**: 1 ~ 17.

[2] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients-food safety issues [J]. *Field Crops Research*, 1999, **60**: 143 ~ 163.

[3] Brzóska M M, Moniuszko-Jakoniuk J. Interactions between cadmium and zinc in the organism [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2001, **39**: 967 ~ 980.

[4] Sponza D, Karaoglu N. Environmental geochemistry and pollution studies of Aliğa metal industry district [J]. *Environment*

International, 2002, **27**: 541 ~ 553.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Lee S Z, Allen H E, Huang C P, *et al.* Predicting soil-water partition coefficients for cadmium [J]. *Environ Sci Technol*, 1996, **30**(12): 3418 ~ 3424.

[8] 华璐,白铃玉,韦东普,等.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.

[9] 王新,吴燕玉,梁仁禄,等.各种改性剂对重金属迁移、积累影响的研究[J].*应用生态学报*, 1994, **5**(1): 89 ~ 94.

[10] 李支援,张强.镉污染土壤的改良研究[J].*工程设计与建设*, 2003, **35**(3): 42 ~ 45.

[11] 张强,李支援.海泡石对镉污染土壤的改良效果[J].*湖南农业大学学报*, 1996, **22**(4): 346 ~ 350.

[12] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844 ~ 850.

[13] 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, 2000.477 ~ 479.

[14] Cotter-Howells J, Capom S. Remediation of contaminated land by formation of heavy metal phosphates [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11**: 335 ~ 342.

[15] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, *et al.* Ionic-strength and pH effects on the adsorption of cadmium and lead on the surface charge of soils [J]. *Euro J Soil Sci*, 1994, **45**: 419 ~ 429.

[16] Tessier A, Campbell P G C. Partitioning of trace metals in sediments [A]. In: *Metal Speciation, Theory, Analysis and Application*[C]. Lewis: Kramer J R, Allen H E, 1988. 183 ~ 199.

[17] Leeper G W. Managing the heavy metals on the land[M]. New York and Baser: Marcel Dekker Inc., 1978.

[18] 熊毅.土壤中重金属的缔合方式和机制[J].*土壤农化*, 1975, **2**: 8 ~ 19.