

调控剂对锌镉污染土壤植物修复效率及后茬蔬菜重金属吸收的影响^①

任 婧^{1,2}, 吴龙华^{1*}, 刘鸿雁^{1,3}, 骆永明¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 贵州省土壤肥料研究所, 贵阳 550025; 3 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550003)

摘 要: 采用盆栽试验, 在连续 12 年高量施用污泥有机肥引起的 Zn、Cd 污染土壤上种植伴矿景天, 并向土壤中添加亚氨基二琥珀酸(IDS)、乙二胺二琥珀酸三钠(EDDS)、硫磺等化学调控剂及稳定剂钙镁磷肥, 研究调控剂对伴矿景天吸收 Zn、Cd 及施用钙镁磷肥对后茬蔬菜重金属污染风险的影响, 以期探索出既可提高超积累植物重金属吸取修复效率又能降低后茬农作物重金属污染风险的植物修复模式。结果表明, 施用 120 mmol/kg 硫粉(Sed+S)处理可显著增加伴矿景天地上部生物量, 分别比未加调控剂的对照处理伴矿景天(Sed)、伴矿景天添加有机调控剂(Sed+OE)处理增加 34.7% 和 47.9%。施用 3 mmol/kg IDS 则显著降低了伴矿景天地上部 Cd 浓度, 比 Sed 处理降低了 35.5%。施用钙镁磷肥稳定剂可有效降低后茬蔬菜蔬菜体内 Zn、Cd 浓度, 降幅为 57%、63%, 施用 4 g/kg 钙镁磷肥后土壤醋酸铵提取态 Zn、Cd 分别较对照降低 66.1%、72.4%。可见, 适当施用硫肥能促进伴矿景天的生长, 添加钙镁磷肥降低土壤有效态重金属浓度, 减少后茬作物污染风险。

关键词: 调控剂; 伴矿景天; 苋菜; Zn; Cd

中图分类号: X53

超积累植物修复重金属污染土壤受到众多环境领域研究者的日益关注^[1-2]。修复效率的高低是植物修复成败的关键, 影响修复效率的关键因素是超积累植物的生物量及体内重金属浓度。超积累植物修复重金属污染土壤周期长, 且经多次修复之后的土壤重金属有效性下降会导致修复效率降低^[3]。因此, 旨在不影响超积累植物生物量的前提下施用调控剂增加土壤重金属的有效性以达到提高修复效率的目的尤为重要。添加硫肥及毒性低、降解快的螯合剂亚氨基二琥珀酸(IDS)和乙二胺二琥珀酸三钠(EDDS)^[4-6]可增大植物地上部生物量或提高土壤中重金属的有效性, 以此提高修复效率。但由于植物种类、土壤性质差异及调控剂浓度等因素对调控剂活化重金属的效率有较大影响^[7-8], 所以有必要探索适合伴矿景天^[9]的调控剂类型和施用量, 以提高其对长期重金属污染土壤的修复效率。

植物修复不仅要考察超积累植物的修复效率, 更应考察植物修复后的土壤质量的恢复状况及调控剂

的使用所带来的生态环境风险^[10]。通常高浓度的调控剂处理后的土壤将影响后续植物的生长^[11], 而钙镁磷肥不仅可以降低土壤中重金属的活性, 且可以增加植物地上部的生物量, 常作为一种有效的稳定剂对土壤进行稳定修复。因此, 本文利用在种植伴矿景天的土壤上添加 IDS、EDDS、硫粉, 而后再在土壤中施用钙镁磷肥以降低因超积累植物种植所引起的后茬作物重金属吸收性增大的不利作用, 以期探索出既能快速修复重金属污染土壤, 且土壤中重金属修复结束后重金属活性快速降低的植物修复模式, 达到提高修复效率、减少后茬作物重金属吸收性和安全生产的目的, 为我国重金属轻污染土壤的植物修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自浙江宁波, 为长期施用污泥的锌镉污染土壤, 采集 0~15 cm 表层土壤, 经风干、过 2 mm 尼龙筛, 备用, 其基本理化性质为 pH 6.7, 有机质为

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-G053)和教育部 211 重点学科建设项目(211kst200902)资助。

* 通讯作者(lhwu@issas.ac.cn)

作者简介: 任婧(1985—), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 研究方向为土壤污染与植物修复。E-mail: soil2009@163.com

62.1 g/kg, 全量氮磷钾分别为 2.86、4.36、29.4 g/kg; 总镉 0.57 mg/kg, 总锌 606 mg/kg, 醋酸铵提取态镉 8.02 μg/kg、锌 10.6 mg/kg。

供试锌镉超积累植物伴矿景天采自浙江淳安, 将野外植株移至温室生长繁殖, 通过 Hoagland 营养液水培方式培育新植株, 选择大小一致, 长势良好的幼苗, 备用。盆栽用苋菜品种为改种港种圆叶白苋菜, 种子购于梅州市吉丰种业发展有限公司, 直接播种。

试验所用硫粉为分析纯硫磺, IDS 为实验室合成, EDDS 为 30% Na₃EDDS 水溶液, 购自 Sigma-Aldrich 公司, 钙镁磷肥为商品肥料, 购自浙江杭州一农资公司。

1.2 试验设计与实施

盆栽试验于 2010 年 6 月至 2011 年 11 月在中国科学院南京土壤研究所温室进行, 设 3 个处理, 5 次重复, 每盆装土 1 kg(烘干基), 分别是: 种植伴矿景天, 以“Sed”表示; 种植伴矿景天, 第一至第三季时与处理一相同, 第四季时加硫粉 120 mg/kg 作基肥, 以“Sed+S”表示; 种植伴矿景天, 在第三季收获前一周分两次施用 IDS, 第四季收获前一周分两次施用 EDDS, 以“Sed+OE”表示。伴矿景天采用枝条直接扦插方式种植, 选择大小一致的伴矿景天枝条, 每盆种植 6 棵。IDS 溶于去离子水中, 以溶液形式于 2011 年 3 月 1 日、7 日分两次加入, 每次施加 1.5 mmol/kg, 总施加量 3 mmol/kg; EDDS 分别于 2011 年 5 月 11 日、17 日分两次施入, 总施加量也是 3 mmol/kg。植物苗移栽后一周施用尿素 0.7 g/盆, 磷酸二氢钾 0.35 g/盆, 之后每间隔 1 月施用 1 次, 施用量与基肥同。分别在 2010 年 9 月 2 日和 10 月 27 日、2011 年 3 月 7 日和 5 月 17 日收获伴矿景天地上部 4 次。2010 年 11 月 4 日和 2011 年 5 月 30 日, 即第 2、第 4 次收获伴矿景天后采集土壤样品, 风干后过 10 目尼龙筛, 待测。

2011 年 7 月 11 日将上述处理 2 和处理 3 的土样混合, 并分为两个处理: 不施钙镁磷肥(NCa-P);

施用 4 g/kg 钙镁磷肥(Ca-P)。两个处理均种植苋菜, 以探索污染土壤植物吸取修复后对后茬蔬菜重金属吸收的影响。苋菜于 8 月 15 日直接播种, 待出苗 5 天后定苗 4 株。每天用去离子水浇灌, 保持含水量为土壤最大田间持水量的 70%, 并定期松土, 施肥方式同伴矿景天, 9 月 20 日收获。

1.3 样品处理与分析测定

收获的植物地上部样品分别用自来水、去离子水洗净, 105 °C 杀青 30min, 85 °C 烘干至恒重并测定生

物量, 然后用不锈钢粉碎机磨碎, 备测。采用 HNO₃-HClO₄(v/v, 3:2)进行消化, 原子吸收分光光度计(Varian SpectrAA 220FS(火焰)、220Z(石墨炉))测定 Zn、Cd。消化过程用国家参比物质(GBW07603)进行分析质量控制。

采用 1 mol/L NH₄OAc (pH 7.0)提取态重金属按 1:5 的土液比连续震荡 16 h, 3000 r/min 离心 5 min, 将上清液过滤, 用火焰原子吸收法测定重金属。

1.4 数据分析与统计

采用 SPSS13.0 软件进行相关数据统计, 用最小显著性差异法(LSD)进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 伴矿景天地上部生物量及锌镉浓度

Sed+S 处理于第四季施入 120 mmol/kg 硫粉, 伴矿景天地上部生物量与 Sed、Sed+OE 处理相比显著升高, 分别比 Sed、Sed+OE 处理增加了 34.7%、47.9% (表 1)。与前三季未加硫的处理相比也显著增高, 说明加硫利于伴矿景天地上部的生长。许多研究结果表明添加硫肥有利于植物地上部生物量增加^[12-15], 但也有报道施用硫粉显著降低植物地上部生物量, 这可能与植物种类和土壤类型等不同有关。Sed+OE 处理于第三次收获前一周施用 3 mmol/kg IDS, 于第四次收获前一周施入 3 mmol/kg EDDS。由于施用时间仅 7 天, 两种有机整合剂未显著影响伴矿景天地上部生物量。施入 IDS 后, 伴矿景天生长未出现中毒现象, 而刘玲^[16]分两次共加入 2 mmol/kg IDS 后, 伴矿景天出现叶片零落等中毒现象并最终导致生物量显著降低, 这可能是由于供试土壤的重金属污染类型与程度不同所致, 刘玲^[16]的供试土壤 Zn、Cd 浓度分别为 3 179 ~ 4 343 mg/kg 和 1.97 ~ 10.6 mg/kg, 而本试验 Zn、Cd 浓度分别为 606 mg/kg、0.57 mg/kg。因此, 应根据土壤的重金属污染类型与程度调节 IDS 的施入量。施入 EDDS 7 天后, 伴矿景天叶片出现叶片缩水中毒现象, 这与李柱^[17]的研究结果一致; 宋静等^[18]研究也表明, 施用 3 mmol/kg EDDS 2 天后芥菜出现了叶片脱水等明显的中毒现象。

同一处理的 4 季伴矿景天, 以第三次收获的伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度最高, Sed、Sed+S 和 Sed+OE 三处理 Zn 浓度分别达 5 790、5 076、5 563 mg/kg (图 1), 比第一次收获伴矿景天地上部 Zn 浓度增加 26.9%、32.2%、29.1%; Cd 分别达 54.6、53.9、35.2 mg/kg, 比第一次收获增加 60.8%、60.4%、25%。这一季生长时间为 125 天, 根据伴矿景天生活习性, 冬季处于

表 1 伴矿景天地上部生物量 (g/株)
Table 1 Shoot biomass of *Sedum plumbizincicola*

处理	第一次收获	第二次收获	第三次收获	第四次收获	总计
Sed	0.13 ± 0.01 a	0.40 ± 0.04 a	1.40 ± 0.11 a	0.79 ± 0.06 b	2.19 ± 0.15 a
Sed+S	0.18 ± 0.04 a	0.37 ± 0.06 a	1.38 ± 0.05 a	1.21 ± 0.09 a	2.63 ± 0.15 a
Sed+OE	0.14 ± 0.03 a	0.49 ± 0.06 a	1.19 ± 0.12 a	0.63 ± 0.05 b	2.05 ± 0.22 a

注: 同列不同字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著, 下同。

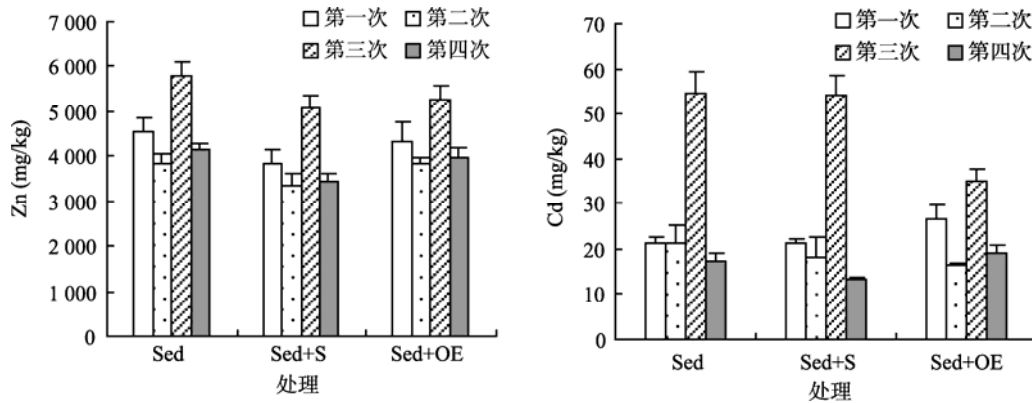


图 1 伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度

Fig. 1 Zn and Cd concentrations in *Sedum plumbizincicola* shoot

生长停滞期,但置于温室内(25 ± 3),伴矿景天能继续进行营养生长,因此,冬季增温也有助于提高伴矿景天的修复效率,并实现冬季修复。

加 120 mmol/kg 硫粉后,即 Sed+S 处理第 4 次收获伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度略低于 Sed 处理,但差异不显著。前人对施用硫粉对植物体内重金属影响的研究结果并不一致,郑小真和刘锦秀^[14]施用硫磺后蔬菜上海青 As、Pb、Cd 含量分别下降 42.5%、40.2%、52%;白萝卜 As、Pb、Cd 含量分别下降 29.1%、67.4%、14%。也有报道加入硫粉后增加了玉米地上部 Zn、Cd 浓度^[8,12]。施用 3 mmol/kg IDS 后,即 Sed+OE 处理收获的第三季,促进伴矿景天地上部吸收 Zn、Cd 效果不佳,其原因可能有两个,一是经过前两次的伴矿景天吸取修复后,土壤重金属有效性下降,导致 IDS 活化重金属效率降低;刘玲^[16]连续修复 6 季后土壤 Zn、Cd 浓度为 3 179 mg/kg、1.97 mg/kg,在此基础上施用 IDS,发现施用 IDS 对提高伴矿景天地上部的 Zn、Cd 浓度效果不佳,而未修复对照处理施用 IDS,则伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度有显著上升,其供试土壤全量 Zn、Cd 为 4 343 mg/kg、10.6 mg/kg。本试验供试土壤的 Zn、Cd 浓度为 606 mg/kg、0.57 mg/kg。因此,可能土壤重金属总量下降时其有效性也相对较低,而致使 IDS 活化重金属的量不大;施用 3 mmol/kg EDDS,对伴矿景天地上部 Zn、Cd 吸收也没有显著影响。

2.2 伴矿景天地上部锌镉吸取量

伴矿景天地上部吸取量等于伴矿景天地上部生物量与 Zn、Cd 浓度的乘积。由表 2 可见,加入 120 mmol/kg 硫粉及 3 mmol/kg IDS、EDDS 后 Zn 吸取量并未有显著变化,表明 3 种调控剂的施加并未对伴矿景天地上部 Zn 浓度产生明显的影响。不同处理的伴矿景天地上部 Zn 总吸取量差异也不显著。添加硫粉后,因其增大地地上部生物量而使伴矿景天地上部 Cd 吸取量略有增加。加入 3 mmol/kg IDS 后 Cd 吸取量显著低于 Sed、Sed+S 处理;加 EDDS 后,对伴矿景天地上部 Cd 吸取量影响不大。Sed+OE 处理伴矿景天地上部 Cd 总吸取量显著低于 Sed、Sed+S 处理,这是由于施加 IDS 显著降低伴矿景天 Cd 吸收之故。

2.3 土壤醋酸铵提取态重金属变化

施用 EDDS 和硫后,即第二次取土,两处理的土壤醋酸铵提取态 Zn 浓度的变化规律不同(图 2)。Sed 处理第二次未取土壤样品,但可以从第一次和第三次所取土壤的 $\text{NH}_4\text{OAc-Zn}$ 浓度佐证,第二次所取土壤的 $\text{NH}_4\text{OAc-Zn}$ 浓度应与之相差不大。加 EDDS 后 $\text{NH}_4\text{OAc-Zn}$ 高达 32.8 mg/kg,是 Sed 处理的 3 倍,比 Sed+OE 处理前一次所取土壤增加了 71%,差异达极显著水平,说明 EDDS 处理能显著提高土壤中重金属浓度^[19-20],尤其是 Cu 和 Zn^[21,17],但对 Cd 效果不明显^[22-24]。Sed+OE 处理由第三次所取土壤与第二次相比, $\text{NH}_4\text{OAc-Zn}$ 有效态一个月后变为正常水平,

表 2 伴矿景天地上部 Zn、Cd 吸收量
Table 2 Zn and Cd uptake by *Sedum plumbizincicola* shoot

金属吸收量	处理	第一次收获	第二次收获	第三次收获	第四次收获	总计
Zn (mg/盆)	Sed	3.59 ± 0.32 a	8.94 ± 0.63 a	23.5 ± 1.2 a	19.8 ± 2.17 a	66.3 ± 6.8 a
	Sed+S	4.05 ± 0.73 a	7.83 ± 1.66 a	17.7 ± 2.9 ab	24.8 ± 1.7 a	54.4 ± 5.2 a
	Sed+OE	3.48 ± 0.53 a	11.40 ± 1.69 a	17.8 ± 0.8 b	17.5 ± 2.33 a	45.3 ± 4.5 a
Cd (μg/盆)	Sed	16.9 ± 1.3 a	48.6 ± 3.3 a	208 ± 19 a	83.1 ± 14.2 a	435 ± 13 a
	Sed+S	23.0 ± 4.5 a	37.0 ± 4.9 a	193 ± 28 a	94.7 ± 4.6 a	348 ± 26 a
	Sed+OE	20.0 ± 1.0 a	47.0 ± 4.8 a	39.9 ± 17.1 b	82.2 ± 9.4 a	170 ± 8 b

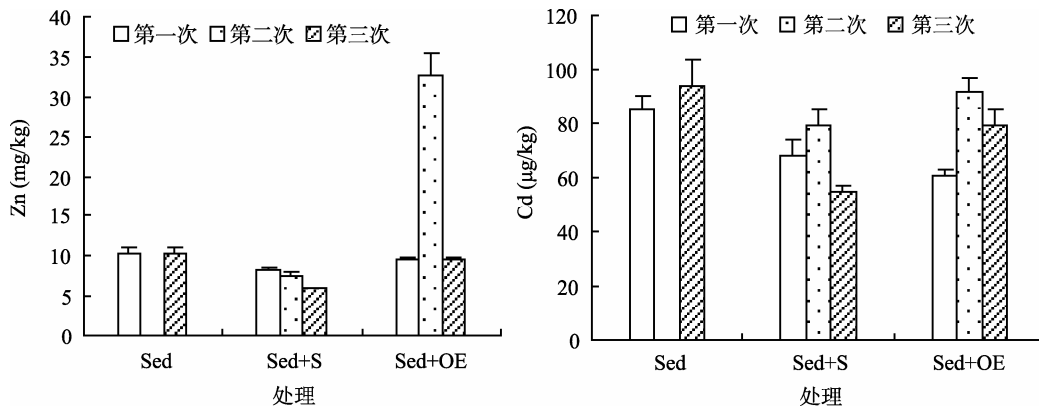


图 2 土壤醋酸铵提取态 Zn、Cd 浓度
Fig. 2 Soil NH₄OAc-extractable Zn and Cd concentrations

表明施加 EDDS 后可能会对后茬蔬菜有一定污染风险。有研究表明, EDDS 完全降解需要 30 天以上^[17, 25-26]。施用硫 67 天后, 与第一次所取土壤醋酸铵 Zn、Cd 浓度相比略有降低, 但差异不显著。有研究报道土壤添加硫后, NH₄OAc-Zn 增加了 2 倍, NaNO₃-Zn、NaNO₃-Cd 分别提高了 8 倍和 35 倍^[4, 8]。本试验结果与之不同, 元素硫对土壤中重金属生物有效性的改变还可能与添加硫元素的量、土壤性质和重金属含量、提取剂类型不同有关^[27]。

2.4 施加调控剂对后茬蔬菜的影响

由于在本试验条件下施加硫肥及有机调控剂未对伴矿景天 Zn、Cd 吸收性有显著影响, 且每盆的土样量有限, 试验开始时每盆装土 1 kg, 试验过程中 2 次取土样分析后每盆所剩土壤不足 900 g。将原试验处理 2(Sed+S)和处理 3(Sed+OE)的土样混合, 一个月后再种植苋菜, 以便有较多的土样量继续开展维持有每处理 4 次的下一组试验, 该组试验的主要目标是考

察施用碱性肥料钙镁磷肥是否可降低土壤重金属有效性, 以降低后茬蔬菜的重金属吸收性。由表 3 可见, 施用 4g/kg 钙镁磷肥可促进后茬蔬菜的生长, 但差异不显著; 苋菜地上部 Zn、Cd 浓度在施用钙镁磷肥后均有显著下降, 降幅分别为 56%、60%。苋菜收获后, 土壤醋酸铵 Zn、Cd 浓度表现出 Ca-P 处理显著低于 NCa-P 处理, 钙镁磷肥稳定土壤中 Zn、Cd 效果良好, 这与许多研究结果一致^[28-31]。

醋酸铵提取态 Zn、Cd 与苋菜地上部 Zn、Cd 浓度有极显著的相关关系。施用钙镁磷肥后 Ca-P 处理醋酸铵提取态 Zn 浓度由原来的 14.2 mg/kg 降低为 4.8 mg/kg, 降幅为 66.1%。钙镁磷肥对降低 Cd 的有效性更为显著, 施用后由原来 94 μg/kg 降低为 25.9 μg/kg, 降幅为 72.4%。这是由于磷肥能够通过吸附、沉淀作用, 降低重金属毒性, 另由于 P 与 As、Zn 的交互作用^[32-33], 稳定剂的施用可使土壤中 Cd 的水溶态、可交换态和碳酸盐结合态减少, 而有机结合态和

表 3 苋菜地上部生物量及 Zn、Cd 浓度
Table 3 Biomass, Zn and Cd concentrations of *Amaranthus spinosus* L.

处理	生物量(干重) (g/株)	地上部 Zn、Cd 浓度(干重)		地上部 Zn、Cd 浓度(鲜重)		土壤醋酸铵提取态 Zn、Cd 浓度	
		Zn(mg/kg)	Cd(mg/kg)	Zn(mg/kg)	Cd(mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (μg/kg)
NCa-P	1.31 ± 0.27 a	282 ± 12 a	0.86 ± 0.01 a	14.6 ± 1.2 b	0.10 ± 0.00 a	7.75 ± 0.25 a	44.4 ± 2.1 a
Ca-P	1.68 ± 0.16 a	121 ± 10 b	0.34 ± 0.02 b	33.9 ± 1.5 a	0.04 ± 0.00 b	4.80 ± 0.10 b	25.9 ± 0.7 b

残渣态增加^[30], 其重要机制是促进重金属从有效态向缓效态/迟效态转化^[31], 因此钙镁磷肥可用于对 Zn、Cd 污染土壤的稳定修复。

3 结论

加入 120 mmol/kg 硫粉对伴矿景天地上部生物量增加有一定促进作用, 但降低了伴矿景天地上部 Zn、Cd 浓度; 加入 3 mmol/kg IDS 对伴矿景天无毒害作用, 而施用 3 mmol/kg EDDS 后伴矿景天出现中毒现象, 因此, 根据土壤重金属污染类型与程度, 调节调控剂的施入量才会有效提高修复效率。添加调控剂后土壤质量的恢复所需时间约为一个月, 施入钙镁磷肥可缓解重金属对后茬作物的毒害作用, 并能有效降低后茬蔬菜的地上部重金属浓度。因此, 在本研究条件下, 添加钙镁磷肥降低土壤有效态重金属浓度, 减少后茬作物重金属污染风险的修复模式可行。而两种螯合剂及硫粉对伴矿景天体内 Zn、Cd 浓度的增加并未有显著效果, 可能与在该土壤上其施用时期、施入量不合适有关, 也或因伴矿景天自身对土壤 Zn、Cd 的吸取能力相当强, 施用各种有机络合剂或土壤 pH 调控剂均对其无显著效果, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Kumar PBAN, Dushenkov V, Motto H, Raskin I. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(5): 1 232-1 238
- [2] Epelde L, Becerril JM, Allica JH, Barrutia O, Garbisu C. Functional diversity as indicator of the recovery of soil health derived from *Thlaspi caerulescens* growth and metal phytoextraction[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 39(3): 299-310
- [3] Jiang JP, Wu LH, Li N, Luo YM, Liu L, Zhao QG, Zhang L, Christie P. Effects of multiple heavy metal contamination and repeated phytoextraction by *Sedum plumbizincicola* on soil microbial properties[J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(1): 18-26
- [4] Kayser A, Wenger K, Keller A, Attinger W, Felix HR, Gupta SK, Schulin R. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: The use of NTA and sulfur amendments[J]. Environmental Science and Technology, 2000, 34(9): 1 778-1 783
- [5] Reinecke F, Groth T, Heise KP, Joentgen W, Muller N, Steinbuchel A. Isolation and characterization of an *Achromobacter xylosoxidans* strain B3 and other bacteria capable to degrade the synthetic chelating agent iminodisuccinate[J]. Fems Microbiology Letters, 2000, 188(1): 41-46
- [6] Meer E, Tack FMG, Verloo MG. Degradability of ethylene diaminedisuccinic acid (EDDS) in metal contaminated soil: Implications for its use soil remediation[J]. Chemosphere, 2008, 70(3): 358-363
- [7] 丁竹红, 胡忻, 尹大强. 螯合剂在重金属污染土壤修复中应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 777-782
- [8] 崔岩山, 王庆仁, 董艺婷, 李海峰. 硫磺对土壤中 Pb 和 Zn 形态的影响[J]. 环境化学, 2004, 23(1): 46-50
- [9] 吴龙华, 周守标, 毕德, 郭新弧, 秦卫华, 王辉, 王春景, 骆永明. 中国景天科植物一新种——伴矿景天[J]. 土壤, 2006, 38(5): 632-633
- [10] 胡亚虎, 魏树和, 周启星, 詹杰, 马丽辉, 牛荣成, 李云萌, 王姗姗. 螯合剂在重金属污染土壤植物修复中的应用研究进展[J]. 农业科学学报, 2010, 29(11): 2 055-2 063
- [11] 黄细花, 卫泽斌, 郭晓芳, 史学峰, 吴启堂. 套种和化学淋洗联合技术修复重金属污染土壤[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 3 067-3 074
- [12] Cui YS, Dong YT, Li HF, Wang QR. Effect of elemental sulphur on solubility of soil heavy metals and their uptake by maize[J]. Environment International, 2004, 30: 323-328
- [13] 张建丽, 何盈, 蔡顺香, 张朝海, 罗涛. 含硫钝化剂对抑制芥菜 Pb、Cd 富集的效果研究[J]. 福建农业学报, 2007, 22(3): 293-297
- [14] 郑小真, 刘锦秀. 不同改良剂对土壤环境中重金属污染浓度原位钝化效应[J]. 海峡科学, 2008(6): 27-28
- [15] 王建旭, 冯新斌, 商立海, 包正铎, 仇广乐. 添加硫代硫酸铵对植物修复汞污染土壤的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1 998-2 002
- [16] 刘玲. 连续植物修复对污染土壤锌镉有效性影响及有机调控初探(硕士学位论文)[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2009
- [17] 李柱. 铜对伴矿景天锌镉吸收性影响及其生理机制研究(硕士学位论文)[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2011
- [18] 宋静, 钟继承, 吴龙华, 王国庆, 李晨曦, 骆永明, 钱薇. EDTA 与 EDDS 螯合诱导印度芥菜吸取修复重金属复合污染土壤研究[J]. 土壤, 2006, 38(5): 619-625
- [19] Evangelou MWH, Ebel M, Schaeffer A. The influence of EDDS and EDTA on the uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*[J]. Chemosphere, 2007, 68(6): 989-1 003
- [20] Cao A, Carucci A, Lai T, Colla PL. Effect of biodegradable chelating agents on heavy metals phytoextraction with *Mirabilis jalapa* and on its associated bacteria[J]. European Journal of Soil Biology, 2007, 43(4): 200-206
- [21] 钱猛, 沈振国, 魏岚. 螯合剂 EDDS 和 EDTA 诱导海州香薷积累土壤重金属的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 113-118
- [22] Wu LH, Sun XF, Lou YM, Xing XR, Christie P. Influence of [S, S]-EDDS on phytoextraction of copper and zinc by *Elsholtzia splendens* from metal-contaminated soil[J]. International Journal of Phytoremediation, 2007, 9: 228-241

- [23] Quartacci MF, Irtelli B, Baker AJM, Navari-Izzo F. The use of NTA and EDDS for enhanced phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by *Brassica carinata*[J]. Chemosphere, 2007, 68(10): 1 920–1 928
- [24] Liu D, Islam E, Li TQ, Yang YE, Jin XF, Mahmood Q. Comparison of synthetic chelators and low molecular weight organic acids in enhancing phytoextraction of heavy metals by two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 153: 114–122
- [25] Tandy S, Schulin R, Nowack B. Biodegradation and speciation of residual S, S'- ethylene diaminedisuccinic acid (EDDS) in soil solution left after soil washing[J]. Environmental Pollution, 2006, 142(2): 191–199
- [26] Meer E, Tack FMG, Verloo MG. Degradability of ethylene diaminedisuccinic acid (EDDS) in metal contaminated soils: Implications for its use soil remediation[J]. Chemosphere, 2008, 70(3): 358–363
- [27] 崔岩山. 硫杆菌和元素硫在治理重金属污染中的应用研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 404–408
- [28] 李瑞美, 王果, 方玲. 钙镁磷肥与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 348–351
- [29] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克. 3种改良剂对不同土壤-水稻系统中Cd行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 834–840
- [30] 李佳华, 林仁漳, 王世和, 孙媛媛, 郭红岩, 王晓蓉. 改良剂对土壤-芦蒿系统中镉行为的影响[J]. 环境化学, 2009, 28(3): 350–354
- [31] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 韩晓日, 骆永明, 欧阳由男, 金千瑜, 蒋玉根. 伴矿景天-水稻轮作及磷素调控对锌镉污染土壤的修复研究[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2 952–2 958
- [32] 张磊, 宋凤斌, 崔良. 化肥施用对土壤中重金属生物有效性的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 122–125
- [33] 孙琴, 倪吾钟, 杨肖娥, 丁士明. 磷对超积累植物-东南景天生长和积累锌的影响[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 818–824

Effect of Amendments on Phytoextraction Efficiency and Metal Uptake of Following Vegetable in Heavy Metal Contaminated Soil

REN Jing^{1,2}, WU Long-hua^{1*}, LIU Hong-yan^{1,3}, LUO Yong-ming¹

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Guiyang 550025, China; 3 College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: High amount of organic manure made from sewage sludge was applied continuously within 12 years which resulted in soil zinc (Zn) and cadmium (Cd) contamination. This kind of Zn and Cd contaminated soil was collected to conduct the pot experiment for phytoextraction using Zn and Cd hyperaccumulator, *Sedum plumbizincicola*. Organic chelates, such as iminodisuccinic acid sodium salt (IDS), ethylene diaminedisuccinic acid (EDDS) were applied, elemental sulphur (S) and calcium magnesium phosphate fertilizer (CaMgP) was also added to the soil in this experiment in order to find out a good enhanced remediation model that can enhance the extraction efficiency when growing hyperaccumulator and reduce the heavy metal concentrations in vegetables after phytoextraction. The results showed that compared to control or EDDS treatments, the shoot biomass of *S. plumbizincicola* was increased significantly by adding 120 mmol/kg sulphur, and the increase rates were 34.7%, 47.9%, respectively. Cd concentration in *S. plumbizincicola* plant shoot decreased significantly in treatment of 3 mmol/kg IDS, the decrease rate was 35.5% compared with the control. 4 g/kg of CaMgP fertilizer could reduce heavy metals' bioavailability, then decreased Zn and Cd concentrations in following vegetable *Amaranthus spinosus* by 57% and 63%, respectively. The soil ammonia acetate extractable Zn and Cd decreased by 66.1% and 72.4% respectively compared to control after application CaMgP fertilizer. Therefore, appropriate application of sulphur fertilizer could promote the growth of *Sedum plumbizincicola* and the addition of CaMgP fertilizer could reduce the concentration of the active heavy metals in the soil and the pollution risk of the later vegetables.

Key words: Amendments, *Sedum plumbizincicola*, *Amaranthus spinosus*, Zinc, Cadmium