

土壤容重改变对锌/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响

杨勇^{1,2}, 江荣风^{1*}, 李花粉¹, 王巍¹, 郑瑞伦¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 农业部植物营养学重点实验室, 北京 100193;
2. 清华大学环境科学与工程系, 固体废物资源化及应急控制工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:为了探讨土壤容重的变化对锌/镉超累积植物遏兰菜(*Thlaspi caerulescens*)根系形态特征及吸收土壤中镉、锌的影响, 采用土壤盆栽方法, 研究了土壤结构改良剂(EB. a)对镉污染土壤($2.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的容重和遏兰菜提取镉/锌效率的影响. EB. a 用量分别为 0、0.1% 和 2%, 植物种植 100 d 后收获. 结果表明, EB. a 可有效地降低土壤容重, 2% EB. a 处理土壤容重从 $1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 降至 $1.09 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 土壤容重的降低, 促进了遏兰菜根系和地上部的生长; 植物的总根长、根毛长、根冠比均显著提高($p < 0.05$). 随着植物根长的增加, 遏兰菜地上部提取镉/锌总量均显著提高($p < 0.05$). 与对照相比, 2% EB. a 处理致使遏兰菜总根长增加了 2.6 倍, 植物地上部镉浓度和提取总量分别提高了 20% 和 30%, 镉提取效率由 15% 提高至 19%; 但遏兰菜的地上部锌浓度和提取总量并没有显著变化. 研究结果证实了改善土壤结构可以促进遏兰菜根系的生长从而提高植物对镉的提取效率.

关键词:镉; 土壤容重; 根系形态; 遏兰菜; 超累积植物

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-3043-07

Effect of the Soil Bulk Density on the Root Morphology and Cadmium Uptake by *Thlaspi caerulescens* Grown on Cd-Contaminated Soil

YANG Yong^{1,2}, JIANG Rong-feng¹, LI Hua-fen¹, WANG Wei¹, ZHENG Rui-lun¹

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition, Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Resources and Emergency Response of Control Engineering, Ministry of Education, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A pot experiment was conducted using a soil contaminated with $2.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd to study the effect of the variety of the soil bulk density on the Zn/Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the removal of Cd and Zn from the soil. The contaminated soil received 0, 0.1%, 2% of soil conditioner and the plants were harvested after 100 days. The results showed that soil amendment with the soil conditioner (EB. a) significantly decreased the soil bulk density. Compared to the control, the bulk density value decreased from $1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ to $1.09 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ at the level of 2% soil conditioner. The increased biomass of shoot and root was observed at the treatment of EB. a amendment. The total root length, root hair length and root/shoot ratio were all significantly enhanced ($p < 0.05$) by the addition of EB. a. The significant positive relationships between the total root length and the removed Cd/Zn from soil were determined ($p < 0.05$). Compared with the control, the total root length was increased by 2.6 folds at the addition of 2% soil conditioner; the Cd concentration and removal of Cd from soil were significantly elevated by 20% and 30% respectively. The phytoextraction efficiency of Cd was improved from 15% to 19%. However, the Zn concentration and removal of Zn were not significantly elevated by the addition of soil conditioner. The present results demonstrate that the decreased soil bulk density may improve the root system of *T. caerulescens* and enhance the phytoextraction efficiency of Cd.

Key words: cadmium; soil bulk density; root morphology; *Thlaspi caerulescens*; hyperaccumulator

从 1983 年 Chaney 提出了利用超累积植物清除土壤重金属污染的想法至今, 植物提取技术的研究已经历了 20 多年^[1], 并在超累积植物的筛选和植物吸收重金属镉的生理与分子机制方面取得了一定的进展^[2-4]. 近十几年来在田间实际修复试验与效果评价方面开展了大量研究^[5-7], 然而受制于复杂的土壤环境和植物自身的因素, 在田间条件下植物

对土壤中重金属镉的提取效率一直比较低, 在实际中仍然没能广泛应用.

收稿日期: 2009-12-29; 修订日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871153); 国家科技支撑计划项目(2008BADA4B01)

作者简介: 杨勇(1976~), 男, 博士, 主要研究方向为土壤污染修复和固体废物处理, E-mail: yangyongcau@163.com

* 通讯联系人, E-mail: rfjiang@cau.edu.cn

为了提高超累积植物对土壤中重金属的吸收量,以前更多的研究是集中在如何提高土壤中重金属的溶解性和移动性即提高重金属的化学有效性^[8,9],而忽略了植物根系的作用,植物根系的形态包括根长、根直径、根毛长和侧根数量等对其吸收水分、养分乃至重金属都具有重要的作用^[10~13],特别是锌镉超累积植物遏兰菜(*Thlaspi caerulescens*),其根系具有很强的锌镉吸收能力^[2,14,15].因此,通过调控植物根系的生长,使其接触更多土体从而扩大植物的根际区域,同样也有利于提高植物对重金属镉的吸收,从而达到提高其修复效率的目的.

除了矿质营养元素外,土壤的物理性状也可以影响植物根系在土壤中的分布.机械阻力是影响根系生长的最主要的物理因子之一,而土壤结构决定了整个植物根系生长所会遇到的机械阻力大小.相关的研究表明,土壤的紧实度可以影响到植物

的根系形态^[16~18]和地上部的生长^[19],以及植物对水分和养分的吸收利用^[20].因此,在研究中假设通过改变土壤容重,降低土壤的机械阻力,可以有效地促进植物根系生长,从而提高植物对土壤中重金属的吸收.本研究旨在为改进植物提取技术措施提供一定的借鉴作用.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自湖南省株洲某冶炼厂附近农田 0~20 cm 的表层土壤,由于冶炼厂三废的排放,致使土壤中镉含量达到 2.12 mg·kg⁻¹,已超过我国土壤三级环境质量标准 1.0 mg·kg⁻¹.供试土壤基本理化性状见表 1.供试植物选取锌镉超累积植物遏兰菜 *T. caerulescens*(Ganges 生态型).

土壤结构改良剂为日本林化学工业株式会社产

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Properties of the soil used in the pot experiment

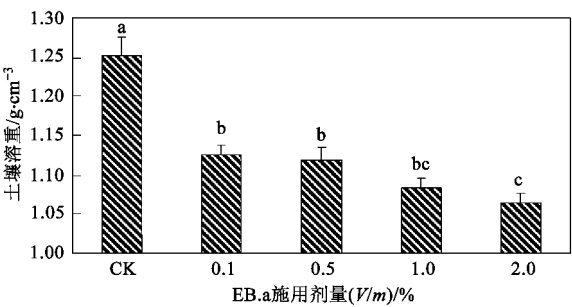
测定项目	pH	总镉 /mg·kg ⁻¹	总锌 /mg·kg ⁻¹	有机碳 /g·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	氨氮 /mg·kg ⁻¹	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
含量	5.68	2.12	316	33.9	9	12	46	50	4

品 EB. a (由德国霍恩海姆大学 Römheld 教授提供);EB. a 在欧洲和日本被广泛应用于林地、果园、高尔夫球场、花园和盆栽花卉养护等,以改善土壤结构促进植物的生长,具有增加土壤表层颗粒间的凝聚力、维系良好的土壤结构、防止土壤结皮、减少地表径流量、防止土壤流失以及抑制土壤水分蒸发、促进植物根系生长等作用.

1.2 试验方法

首先将供试土壤风干后过 1 mm 筛,称取土壤 250 g 于塑料盆中.根据预备试验的结果(见图 1),从 5 个处理中选取 2 个可以显著降低土壤容重且不同处理之间具有显著差异的 EB. a 处理浓度,EB. a 的施用剂量分别为土壤质量的 0.1% 和 2% (见表 2).施入 EB. a 的土壤经混匀风干后,装入 10 cm × ϕ8 cm 塑料盆中,在盆中土壤的上表面放置一个 10 kg 重物,静置 10 min,对处理土壤进行压实处理,每个处理 4 个重复.每天利用称重法浇水,以保证土壤湿度维持在土壤质量的 20%,在 20~23 ℃ 开放的实验室条件下培养 14 d 后,采用环刀法测定土壤容重的变化.

同样将供试土壤按上述方法装盆、压实,施入底肥氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)、镁(MgO)分别为



图中不同字母表示处理之间差异显著($p < 0.05$)

图 1 EB. a 施用剂量对土壤容重的影响

Fig.1 Soil bulk density as affected by EB. a

200、120、200、100 mg·kg⁻¹.将培养 3 周后长势一致的遏兰菜幼苗从基质中移至盆中后,在表层土壤上覆 15 g 陶粒以防止水分蒸发.将移栽后的植物放在昼夜光照 14 h/10 h,光照度 18 830 lx 的条件下培养.去离子水浇灌,按称重法补充水量以保证土壤湿度维持在田间持水量的 70%.移栽 100 d 后收获植株地上部和根系.将收获的植物根系清洗干净后测定植物根系形态.植物总根长和直径测定采用根系扫描仪扫描方法,WinRhizo 软件分析定量^[21].采用 Leica DFC 体视镜(Leica Microsystems LAS)测量根毛长度并拍摄图像.

表 2 EB. a 的施用剂量

Table 2 EB. a treatment

处理	土重 /g	土壤湿度 /%	EB. a 处理 (V/m)/%	EB. a 剂量 /mL	去离子水 /mL
1	250	20	0(CK)	0	50
2	250	20	0.1	0.25	49.75
3	250	20	2	5	45

1.3 样品分析及数据处理

将收获的植物地上部样品洗净烘干后称重. 烘干的植物样品粉碎后,称取 0.2 g 左右,加 5 mL 硝酸浸泡过夜后,再加 2 mL 双氧水,置于高通量密闭微波消解系统(Mars,CEM)中消解,将消解液定容于 50 mL 容量瓶中. ICP-AES(PE3300DV)测定样品中镉、锌含量. 采用中国环境监测总站标准物质(NIST 1572)进行全程质量控制.

数据用 SAS8.02 软件进行统计分析,多重比较采用 Duncan 检验,相关性分析采用 Pearson 相关分析.

2 结果与分析

2.1 土壤改良剂对土壤容重的影响

土壤改良剂 EB. a 对土壤容重的影响见表 3. 可以看出,随着 EB. a 处理浓度的增加,土壤的容重显著下降.2% EB. a 处理时,土壤容重由 1.27 g·cm⁻³ 降至 1.09 g·cm⁻³,降幅达到 14.2%. 土壤改良剂改善土壤结构的作用机制主要是通过改良剂本身所带的正/负电荷与土粒上的负/正电荷相结合形成离子

键,从而促使分散的土壤颗粒团聚,形成团粒,增加土壤中水稳性团粒的含量和稳定性,改善通气透水性^[22].

表 3 EB. a 处理对土壤容重的影响¹⁾

Table 3 Soil bulk density as affected by EB. a

处理	土壤容重/g·cm ⁻³
CK	1.27 ± 0.00 a
0.1% EB. a	1.15 ± 0.01 b
2.0% EB. a	1.09 ± 0.02 c

1)表中数据为 4 个重复的平均值 ± 标准误差;不同的字母之间,表示处理之间差异显著 ($p < 0.05$),下同

2.2 土壤改良剂对遏兰菜生长的影响

土壤容重的变化对遏兰菜的生长产生了一定的影响. 从图 2 可以看出,与对照相比较,2 个不同浓度的 EB. a 处理均有效地促进了遏兰菜的生长. 表 4 为 EB. a 施用对遏兰菜地上部和根系参数的影响.

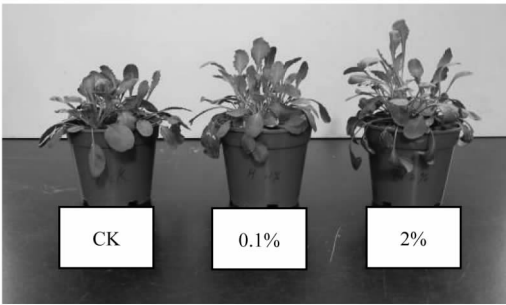


图 2 EB. a 施用对遏兰菜生长状况的影响
Fig. 2 Effect of EB. a addition on the growth of *T. caerulescens*

表 4 EB. a 施用对遏兰菜地上部和根系参数的影响

Table 4 Effect of EB. a addition on the parameters of shoot and root of *T. caerulescens*

处理	地上部生物量/g·pot ⁻¹	根生物量/g·pot ⁻¹	根冠比	根长/m·pot ⁻¹	根直径/mm	根毛长/mm
CK	1.29 ± 0.05 a	0.16 ± 0.01 b	0.12 ± 0.01 b	50 ± 11 b	0.15 ± 0.01 a	0.41 ± 0.02 c
0.1% EB. a	1.37 ± 0.06 a	0.22 ± 0.01 a	0.16 ± 0.01 a	109 ± 12 a	0.14 ± 0.00 a	0.87 ± 0.03 a
2% EB. a	1.37 ± 0.11 a	0.19 ± 0.01 ab	0.14 ± 0.03 ab	130 ± 9 a	0.13 ± 0.00 a	0.59 ± 0.07 b

与对照相比较,0.1% 和 2% 的 EB. a 处理致使遏兰菜地上部生物量由 1.29 g·pot⁻¹ 提高至 1.37 g·pot⁻¹. 此外,从表 4 可以看出,除了根直径的变化差异并不显著外,EB. a 处理对植物地下部的生物量、根冠比、总根长以及根毛长均表现出显著的促进作用($p < 0.05$).0.1% EB. a 处理时,遏兰菜根系生物量、根冠比、根毛长达到最大,分别是对照的 1.38、1.33 和 2.12 倍.2% EB. a 处理时植物的总根长达到最大,是对照的 2.6 倍;植物的根毛长度也显著提高. 从图 3 可以看出,对照处理的植物根毛短而稀疏,而 EB. a 处理的植物根毛长而密.

2.3 土壤改良剂对遏兰菜吸收镉锌的影响

表 5 为遏兰菜吸收镉锌情况的变化情况. 可以看出,遏兰菜地上部镉、锌浓度分别在 61.5 ~ 76.4 mg·kg⁻¹和2 040 ~ 2 384 mg·kg⁻¹之间,地下部镉、锌浓度在 39.8 ~ 46.9 mg·kg⁻¹和 428 ~ 570 mg·kg⁻¹之间. 尽管遏兰菜地上部镉、锌含量未达到超累积植物 Cd 100 mg·kg⁻¹和 Zn 10 000 mg·kg⁻¹的参考值^[23],但是遏兰菜仍然表现出能够超量吸收镉/锌的超累积特性,植物的地上部镉和锌的生物富集系数(植物地上部镉/锌含量与土壤中镉/锌含量比值)分别保持在 29 ~ 36 和 6.5 ~ 7.5 之间,而非超累积植物

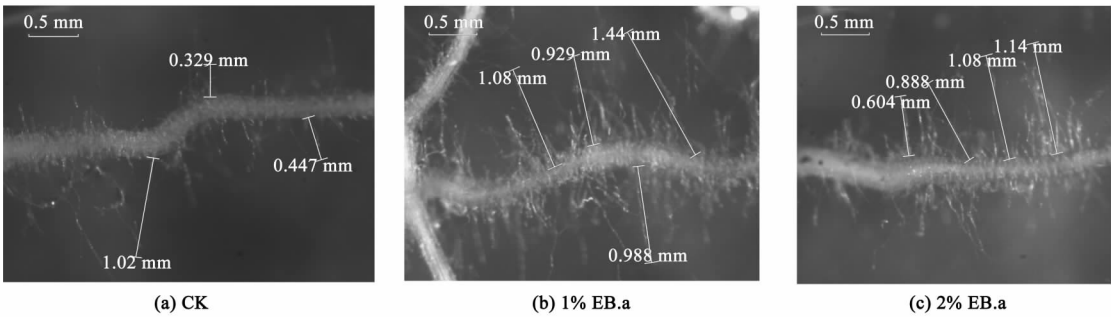


图 3 土壤容重对遏兰菜根毛长度的影响

Fig. 3 Root hair length of *T. caerulea* as affected by soil bulk density

的生物富集系数往往小于 1^[24]. 遏兰菜同样表现出了高效的转移重金属镉、锌的能力,在不同的处理状况下,镉的转移系数(地上部金属元素含量与地下部金属元素含量的比值)均大于 1.5,锌的转移系数则大于 4. 另外,遏兰菜地上部也表现出了较高的植物提取效率,试验周期仅经历 100d 的条件下,镉提取效率就达到了 15% 以上.

植物的地上部镉含量和提取总镉量分别由对照

的 61.5 mg·kg⁻¹ 和 79.5 μg·pot⁻¹ 提高到 2% EB. a 处理时的 76.4 mg·kg⁻¹ 和 103.2 μg·pot⁻¹, 二者分别是对照的 1.2 倍和 1.3 倍;镉提取效率也从 15% 提高至 19%. 3 个不同的处理之间,地下部镉浓度并没有表现出显著的差异. 尽管地上部和地下部的锌含量以及提取总锌量亦表现出增加趋势,但不同处理之间并没有表现出显著的差异. 植物对锌的提取效率也仅略有增加(见表 5).

表 5 遏兰菜镉/锌含量及镉/锌提取总量¹⁾

Table 5 Cd and Zn concentrations, removal of total Cd and Zn by *T. caerulea*

元素	指标	处理		
		CK	0.1% EB. a	2% EB. a
镉	地上部浓度/mg·kg ⁻¹	61.5 ± 1.2 b	66.4 ± 4.8 ab	76.4 ± 5.6 a
	地下部浓度/mg·kg ⁻¹	39.8 ± 5.0 a	46.9 ± 7.9 a	40.4 ± 4.7 a
	转移因子	1.62 ± 0.2 a	1.55 ± 0.27 a	1.91 ± 0.08 a
	提取总量/μg·pot ⁻¹	79.5 ± 3.8 b	91.0 ± 8.2 ab	103.2 ± 4.0 a
	提取效率/%	15	17	19
锌	地上部含量/mg·kg ⁻¹	2 040 ± 121 a	2 191 ± 78 a	2 384 ± 128 a
	地下部含量/mg·kg ⁻¹	428 ± 18 a	539 ± 74 a	570 ± 33 a
	转移因子	4.78 ± 0.3 a	4.37 ± 0.71 a	4.23 ± 0.34 a
	提取总量/μg·pot ⁻¹	2 653 ± 241 a	3 004 ± 186 a	3 229 ± 100 a
	提取效率/%	3.4	3.8	4.1

1) 提取总镉/锌量 = 地上部生物量 × 地上部镉/锌含量; 镉/锌提取效率 = 提取镉/锌量 ÷ (土壤镉/锌含量 × 土壤质量) × 100%; 镉/锌转移因子 = 地上部镉/锌含量 ÷ 地下部镉/锌含量

3 讨论

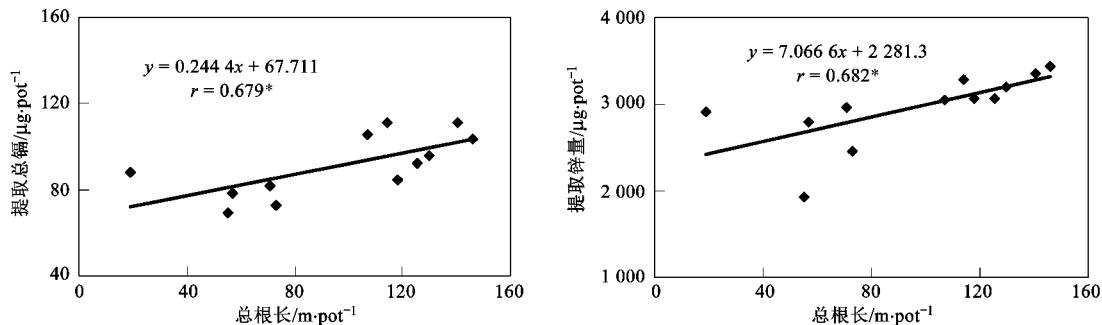
根系在土壤中所遇到的机械阻力是影响其生长的最主要的物理因子之一,其中土壤容重是土壤紧实度的表征,是决定植物扎根难易程度和衡量根系生长所遇机械阻力大小的尺度. 本研究结果表明,土壤改良剂 EB. a 的施用,能够有效地将土壤容重从 1.27 g·cm⁻³ 降低至 1.09 g·cm⁻³ (表 3). 土壤容重的下降对于遏兰菜根系生长具有促进作用,具体表现为植物根系生物量增加、根冠比、总根长、根毛长

显著提高(表 4). 与之相对应的地上部生物量虽有所增加,但差异不显著. 许多研究发现土壤容重可以影响作物生长及根系在土壤中的穿插和活力大小. 吴亚维等^[18] 研究表明,随着土壤紧实度增加,根系生长速度减慢,根系长度下降,而且生长根、吸收根以及根系总量减少,根系颜色加深,尤其在 1.55 g·cm⁻³ 土壤容重下幼苗根系生理功能受到显著影响. 王树会等^[25] 研究了土壤容重对烤烟生长的影响,其结果表明土壤容重对烟株根系的影响是先促进后抑制,当容重达 1.45 g·cm⁻³ 处理时根系发育

最好,之后当容重继续增大时,根系生长发育受到明显抑制. Ashraf 等^[17]用¹⁴C 标记-脉冲技术研究了土壤紧实胁迫对玉米碳素同化及光合产物分配的影响,他们认为:紧实土壤阻碍植物根系及地上部生长的主要原因是土壤紧实度的增加导致了碳素同化速率的降低,以及植物体内碳素向土壤及土壤微生物的流失,从而降低了根系的干物质质量、根冠比,减小了叶面积.

本试验研究结果表明,随着土壤容重的降低,植物地上部镉含量和提取总量则显著提高(表 5). 相关的研究表明,*T. caerulescens* 在单位鲜重的根系细胞膜上分布着较多的金属转运蛋白,而使植物对重金属具有较高的亲和力,因此植株具有对重金属的超积累特性^[2,14,15,26,27]. Pence 等^[2]研究结果表明,*T. caerulescens* 无论是在缺镉条件,还是在正常供应或提高镉供应后,镉的转运蛋白(ZNT1/ZNT2)

在根中的表达量都很高,且在地上部也有少量的表达. 此外,遏兰菜具有发达的根系和稠密的根毛,能够主动向土壤中的 Zn/Cd (hot spots) 区伸展,通过根毛直接接触土壤颗粒获取重金属,将镉污染程度不同的土壤混合,*T. caerulescens* 的根系呈发散分布,且渗入镉含量丰富的区域^[13]. 其他学者进一步证明了 *T. caerulescens* 根系的主动探寻 Zn/Cd 能力^[28]. 所以遏兰菜的根系形态对于其吸收重金属有着非常重要的作用. 良好的植物根系可以有效地提高土壤重金属的空间有效性,从而促进植物对土壤中重金属的吸收. 植物提取镉/锆总量与植物根长的相关性分析结果进一步证实了,遏兰菜根系对于吸收土壤中镉、锆的重要性(图 4). 从图 4 可以看出,随着植物根长的增加,*T. caerulescens* 地上部提取镉/锆总量均得以提高,二者呈显著的正相关关系($p < 0.05$).



图中 * 表示 $p < 0.05$ 水平下显著相关

图 4 总根长与遏兰菜提取总镉/锆量的相关性分析

Fig. 4 Relation between the total root length and removed Cd or Zn by *T. caerulescens*

另外需要注意的是,植物地上部镉浓度和提取镉量尽管也有所提高,但是不同处理之间差异并不显著. EB. a 处理导致 *T. caerulescens* 对土壤中镉、锆的吸收有所不同的原因,可能是由于供试的 *T. caerulescens* (Ganges 生态型) 对镉、锆吸收能力有所差异. 相对于 *T. caerulescens* 家族中其余不同的生态型而言, Ganges 生态型具有高效的镉吸收和转移能力^[27,29]. Zhao 等^[29]研究发现, Ganges 生态型吸收镉的速率是低累积镉的 Prayon 生态型的 4.5 倍,而 2 种生态型对镉的吸收能力的差异仅有 1.5 倍. 此外,遏兰菜根际土壤中不同形态的镉、锆的动态转化过程的巨大差异亦可能是导致植物总根长增加后植物提取镉锆总量有所差异的重要原因之一. Ayien^[30]认为,遏兰菜根系高效的吸收能力+ 致根际土壤中有效态镉、锆的大量耗竭,从而会引起稳定态镉、锆向有效态进行转化. 但由于土壤中稳定态和有效

态镉的含量要远远大于镉,因此根际土壤中稳定态的镉向有效态镉的转化速率很快,建立新的动态平衡所需要的时间要明显短于镉. 这意味着在一定时期内,根际土壤中有效态镉的耗竭程度要弱于镉,因此遏兰菜总根长显著提高时,根系形态对于吸收土壤中镉的作用效果并没有镉明显.

土壤容重的变化不但会影响植物根系的生长,也可能导致植物根系的吸收能力下降. 相关的研究表明,土壤容重可以从两方面影响根系吸收水分和营养元素的能力,一方面由于容重高会降低总根量,因此导致植物对养分的总吸收量减少^[20]. 另一方面,由于土壤紧实度增加,抑制了植物的根系活力,从而导致了根系吸收能力的降低^[31]. 尚庆文等^[32]研究证实,随土壤紧实度增大,生姜根系活力降低,叶片硝酸还原酶活性及叶绿素含量下降,光合作用减弱,叶片的电解质渗漏率及丙二醛(MDA)含量升

高. 在生长前期, 叶片 SOD、POD 及 CAT 活性随土壤紧实度的增加而降低. 因此由于土壤紧实度的增加是否会引起遏兰菜的根系活力降低并导致遏兰菜对镉的吸收能力下降值得进一步研究.

4 结论

(1) 土壤结构改良剂 EB.a 可以有效地改善土壤结构, 降低土壤容重. 同时也有效地促进了遏兰菜的生长, 导致了植物根系形态产生了明显的变化, 其地下部的生物量、根冠比、总根长以及根毛长均得以提高.

(2) 土壤结构改良剂对于植物生长和根系形态的促进作用, 致使遏兰菜地上部镉含量、提取总量和提取效率均得以提高. 尽管地上部的锌含量和提取总锌量也有所增加, 但不同处理之间并没有表现出显著的差异 ($p < 0.05$). 遏兰菜对镉、镉吸收能力的不同以及根际土壤中不同形态的镉、镉动态变化的差异, 可能是导致植物总根长增加后植物提取镉锌总量表现有所不同的重要原因.

(3) 遏兰菜的根系形态对于其高效的吸收土壤中重金属有着非常重要的作用. 相关分析结果表明, 随着植物根长的增加, 遏兰菜地上部提取镉/锌总量均得以提高, 二者呈显著的正相关关系 ($p < 0.05$).

(4) 通过改善土壤物理性状, 可以促进超累积植物生长和对重金属的吸收, 从而提高植物修复效率, 这可为在田间条件下进行植物修复实践提供一定的借鉴.

参考文献:

- [1] Parr J F, Marsh P B, Kla J M, *et al.* Land treatment of hazardous waste [M]. Park Ridge, NJ: Noyes Data Corporation, 1983. 50-76.
- [2] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S, *et al.* The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. P Natl Acad Sci USA, 2000, **97**(5): 4956-4960.
- [3] Wójcik M, Vangronsveld J, Tukiendorf A. Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens*. I. Growth parameters, metal accumulation and phytochelatin synthesis in response to cadmium [J]. Environ Exp Bot, 2005, **53**(2): 151-161.
- [4] Xing J P, Jiang R F, Ueno D, *et al.* Variation in root-to-shoot translocation of cadmium and zinc among different accessions of the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi praecox* [J]. New Phytol, 2008, **178**(2): 315-325.
- [5] Chaney R L, Malik M, Li Y M, *et al.* Phytoremediation of soil metals [J]. Curr Opin Biotech, 1997, **8**(3): 279-284.
- [6] Keller C, Hammer D. Metal availability and soil toxicity after repeated croppings of *Thlaspi caerulescens* in metal contaminated soils [J]. Environ Pollut, 2004, **131**(2): 243-254.
- [7] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, *et al.* Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri* [J]. Environ Pollut, 2006, **141**(1): 115-125.
- [8] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, *et al.* Enhanced accumulation of Pb in India mustard by soil applied chelating agents [J]. Environ Sci Technol, 1997, **31**(3): 860-865.
- [9] Wang A S, Scott A J, Rufus L, *et al.* Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant Soil, 2006, **281**(2): 325-337.
- [10] Itoh S, Baber S A. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs [J]. J Agron, 1983, **75**: 446-454.
- [11] Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. Plant Roots, The Hidden Half [M]. (2nd edition). New York: Marcel Dekker Press, 1996. 529-556.
- [12] Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. Plant roots, The hidden Half [M]. (3rd edition). New York: Marcel Dekker Press, 2002. 15-32.
- [13] Schwartz C, Morel J L, Saumier S, *et al.* Root development of the Zinc-hyperaccumulator plant *Thlaspi caerulescens* as affected by metal origin, content and localization in soil [J]. Plant Soil, 1999, **208**(1): 103-115.
- [14] Hammond J P, Bowen H C, White P J, *et al.* A comparison of the *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi arvense* shoot transcriptomes [J]. New Phytol, 2006, **170**(2): 239-260.
- [15] Van de Mortel J E, Schat H, Moerland P D, *et al.* Expression differences for genes involved in lignin, glutathione and sulphate metabolism in response to cadmium in *Arabidopsis thaliana* and the related Zn/Cd-hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant Cell Environ, 2008, **31**(3): 301-324.
- [16] Alessa L, Earnhart C G. Effects of soil compaction on root and root hair morphology: Implications for campsite rehabilitation [J]. USDA Forest Serv P, 2000, **15**(5): 99-104.
- [17] Ashraf T, Virginie G R, Sylvain P, *et al.* Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system [J]. Soil Till Res, 2003, **71**(2): 151-161.
- [18] 吴亚维, 马锋旺, 邹养军. 土壤紧实度对楸子幼苗根系生长及活力的影响 [J]. 贵州农业科学, 2009, **37**(3): 118-120.
- [19] Wolfe D W, Topoleski D T, Gundersheim N A, *et al.* Growth and yield sensitivity of four vegetable crops to soil compaction [J]. J Am Soc Hortic Sci, 1995, **120**(6): 956-963.
- [20] Arvidsson J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction [J]. Plant Soil, 1999, **208**(1): 9-19.
- [21] Arsenault J L, Pouleur S, Messier R, *et al.* WinRHIZO, a root-measuring system with a unique overlap correction method [J]. Hort Sci, 1995, **30**: 906.
- [22] Harris R F, Chesters G, Allen O N. Dynamics of soil aggregation [J]. Adv Agron, 1966, **18**: 169-107.
- [23] Brooks R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals [M]. Wallingford, UK: CAB International, 1998. 55-94.
- [24] Baker A J M. Accumulators and excluders-Strategies in the response of plants to heavy metals [J]. J Plant Nutr, 1981, **3**

(1): 643-654.

[25] 王树会,李天福. 土壤容重对烤烟生长及产量和品质的影响 [J]. 中国农业科技导报,2008,**10**(5): 94-98.

[26] Küpper H,Zhao F J,McGrath S P. Cellular compartmentation of zinc in leaves of hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant Physiol,1999,**119**(1): 305-311.

[27] Lombi E,Zhao F J,McGrath S P,*et al.* Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *Thlaspi caerulescens* ecotype [J]. New Phytol,2001,**149**(1): 53-60.

[28] Whiting S N,Leake J R,McGrath S P,*et al.* Positive responses to Zn and Cd by roots of the Zn and Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. New Phytol,2000,**145**(2): 199-210.

[29] Zhao F J,Hamon R E,Lombi E,*et al.* Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. J Exp Bot,2002,**53**(368): 535-543.

[30] Aiyen. Importance of root growth parameters to Cd and Zn acquisition by non-hyperaccumulator and hyperaccumulator plants [D]. VERLAG GRAUER, Beuren, Stuttgart, Germany: University of Hohenheim,2004.

[31] 孙艳,王益权,冯嘉,等. 土壤紧实胁迫对黄瓜生长、产量及养分吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2006,**12**(4): 559-564.

[32] 尚庆文,孔祥波,王玉霞,等. 土壤紧实度对生姜植株衰老的影响 [J]. 应用生态学报,2008,**19**(4): 782-786.