

土壤紧实度对伴矿景天生长及镉锌吸收性的影响研究^①

王丽丽^{1,2}, 周 通², 李 柱², 周嘉文², 吴胜春¹, 吴龙华^{2*}

(1 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300; 2 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)

摘 要: 采集黏土、壤黏土和砂质壤土, 分别设置无压实、低紧实度及高紧实度 3 种处理, 通过盆栽试验研究了土壤紧实度对 Cd、Zn 超积累植物伴矿景天生长和 Cd、Zn 吸收性的影响。结果表明, 与无压实处理比较, 砂质壤土、壤黏土和黏土中伴矿景天地上部生物量在低紧实度下显著下降 66.8% ~ 83.5%、59.9% ~ 60.4% 和 57.9% ~ 71.4%; 高紧实度处理却显著提高了伴矿景天的根系活力 (142% ~ 241%)。高紧实度处理显著降低了壤黏土上伴矿景天地上部 Cd 和 Zn 含量, 但低紧实度对砂质壤土和黏土上伴矿景天地上部 Cd 和 Zn 含量无显著影响。与无压实处理比较, 低紧实度显著降低了砂质壤土、壤黏土和黏土上伴矿景天的 Cd 吸取量, 分别下降 50.4% ~ 73.8%、61.4% ~ 74.9% 和 43.4% ~ 63.3%, Zn 吸取量下降 48.7% ~ 79.5%、73.6% ~ 79.0% 和 46.1% ~ 63.5%; 土壤紧实度对壤黏土上伴矿景天的镉锌吸取效率影响最明显。

关键词: 植物吸取修复; 重金属污染; 紧实度; 水稻土; 土壤质地

中图分类号: X53 文献标识码: A

随着工业和城镇化的快速发展, 三废排放、城市污泥和垃圾的不合理处置以及有机肥料与磷肥等大量施用, 造成土壤重金属污染日益严重, 已大大超过土壤的环境承载能力。土壤重金属污染一方面可通过食物链富集和传递危害人体健康, 引发癌症和慢性疾病等^[1-2], 另一方面则可导致农作物的减产或绝收^[3]。2016年5月31日, 国务院发布《土壤污染防治行动计划》(即《土十条》), 要求到2020年, 全国土壤污染加重趋势得到初步遏制, 土壤环境质量总体保持稳定, 农用地和建设用地土壤环境安全得到基本保障, 土壤环境风险得到基本管控。由此看来, 农田土壤的重金属污染修复关乎到我国粮食的安全生产和基本供给, 如何减少土壤重金属的含量, 降低食物链重金属的富集是我们急切需要解决的问题。而植物吸取修复是利用重金属超积累植物从污染土壤中快速吸取污染金属进而达到净化土壤的目的, 是一种环境友好、经济、高效的农田土壤重金属污染修复技术^[4-6]; 确保超积累植物能在污染土壤上健康生长是这项技术成功应用的重要前提条件。

近年来, 农业机械化的大面积推广确实提高了工作效率, 但重型机械在田间的行驶和作业也会对土壤

产生碾压作用, 导致土壤的机械压实。土壤压实是当今农业生产中普遍存在的逆境胁迫因子之一。植物正常生长除了需要适宜的水肥条件, 还必须有合适的土壤容重、紧实度和结构性, 土壤容重或紧实度过高会造成植株生长发育不良, 严重时可降低产量^[7]。土壤紧实度是土壤最重要的物理性质之一, 通常与土壤质地紧密相关, 而土壤容重则是反映土壤紧实度最直接的指标^[8]。已有研究表明, 重型农业机械和其他耕作措施等人为因素的影响会导致土壤紧实度的变化, 进而对植物赖以生存的土壤水、肥、气和热状况产生影响^[9-10]。土壤紧实度变化对植物生长的影响已成为备受关注的问题之一^[11]。目前有关土壤紧实度对植物生长影响的研究, 多集中在农作物、蔬菜、药材、果树上, 如小麦^[12]、棉花^[13]、蔬菜^[14]、黄芩^[15]和楸子^[16]等; 杨勇等^[17]曾研究了土壤结构改良剂对重金属污染土壤容重和 Cd、Zn 超积累植物遏蓝菜根系特征及吸收 Cd 的影响。但有关土壤紧实度对重金属超积累植物生长及重金属污染土壤修复效果的影响研究尚鲜有报道。伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 是在浙江省发现的一景天科新种, 并鉴定为 Cd、Zn 超积累植物^[18], 本文选择超积累植物伴矿景天为供试植物,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41325003)资助。

* 通讯作者(lhwu@issas.ac.cn)

作者简介: 王丽丽(1989—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染与修复研究。E-mail: 1216610651@qq.com.

研究不同质地土壤上伴矿景天生物量,根系活力及 Cd、Zn 吸收性对紧实度的响应,以期对伴矿景天的种植和污染农田土壤植物修复技术的规模化推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为受重金属污染的耕层水稻土,分别为浙江台州市黏土(28°32'13.37"N, 121°23'01.63"E)、江西上饶市壤黏土(28°13'31.49"N, 117°45'28.37"E)及福建龙岩市砂质壤土(25°25'48.25"N, 116°24'24.28"E),土壤基本性质见表 1。供试植物为伴矿景天,每盆选种 4 株植株大小一致的伴矿景天。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

地点	pH	SOC (g/kg)	CEC (cmol/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	颗粒组成(%)			全量 (mg/kg)	
						2 000 ~ 20 μm	20 ~ 2 μm	< 2 μm	Cd	Zn
浙江台州	5.21	24.6	17.4	12.9	94.0	8.40	58.5	33.1	1.33	144
江西上饶	5.10	21.6	8.64	19.5	77.3	52.0	33.0	14.9	1.24	749
福建上杭	5.05	17.8	8.02	29.6	197	67.6	19.8	12.6	0.75	147

采用环刀法^[20]测定土壤容重,经测定,不同土壤类型所设置的无压实、低紧实度和高紧实度的土壤容重如表 2 所示。

表 2 不同紧实处理后的土壤容重(g/cm³)
Table 2 Soil bulk densities under different compact treatments

处理	砂质壤土	壤黏土	黏土
无压实	1.09	1.04	0.92
低紧实	1.22	1.14	1.06
高紧实	1.28	1.21	1.12

伴矿景天移栽时采用“钻孔扦插”的方法。先用直径 1 cm 的镊子把盆中的土壤钻一个直径约为 1 cm、深约 4 cm 的孔洞,然后将伴矿景天枝条轻轻放入孔洞,而后灌入细土填充空隙,每盆种植 4 株。在伴矿景天的整个生长期,各试验处理下的盆栽管理措施相同,浇水根据天气情况,每次浇水均以刚刚浇透盆中土壤作为衡量标准。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 生物量的测定 2016 年 5 月 20 日进行伴矿景天的收获,用不锈钢剪刀对伴矿景天进行采集,地上部和根部分别采集。收获后,将洗净的植株地上部 105°C 杀青后,80°C 烘干至恒重后进行称重计算生物量,样品用不锈钢粉碎机粉碎,混匀备用。地上部收获后,倒出盆土,用水冲洗掉根系上的土后迅速带到

1.2 试验设计

盆栽试验于 2016 年 3 月 12 日至 5 月 20 日在中国科学院南京土壤研究所温室进行,共约 70 d。每种质地类型土壤分别设置无压实、低紧实度和高紧实度 3 个处理,每处理 4 次重复,共 36 盆。风干的土壤过 2 mm 尼龙筛后装入定制塑料盆(圆柱形,盆口内径 16 cm,盆高 18 cm)中,每盆装土 1.5 kg(烘干基),加去离子水调节土壤含水量至最大田间持水量的 70%。土壤紧实度处理参照 Barzegar 等^[19]的方法进行,简要步骤如下: 处理 1:无压实,不施加任何压力; 处理 2:低紧实度,2 kg 重物从 20 cm 高处自由落下,重复 4 次; 处理 3:高紧实度,2 kg 重物从 20 cm 高处自由落下,重复 12 次。

实验室进行根系活力的测定。

1.3.2 根系活力的测定 用 TTC 法测定^[21]。称取根系 0.5 g 左右于刻度试管中,加入 0.4% TTC 和磷酸缓冲液(pH 7.0)的等量混合液 10 ml 后,37°C 恒温放置 4 h,最后加入 2 ml 的 1 mol/L H₂SO₄ 终止反应。然后取出根系吸干后,加入 10 ml 95% 的乙醇提取红色物质 24 ~ 36 h,以空白(先加 H₂SO₄,再加样品,其他操作同上)作对照,485 nm 下进行比色测定。

1.3.3 伴矿景天地上部和修复后土壤镉锌含量的测定 伴矿景天地上部的全量 Cd、Zn 含量采用 HNO₃:H₂O₂(3:1)消煮,称取混匀后样品 0.5 g 左右,修复后的土壤全量 Cd、Zn 含量则采用 HNO₃:HCl(1:1)消煮,称取混匀后过 100 目盆土样品 0.2 g 左右。消煮后的溶液用原子吸收火焰法(Varian 220FS)和石墨炉原子吸收法测定(Varian 220Z)Cd、Zn 含量。并采用国家标准参比物质(土壤:GBW07406;植物:GBW07603)进行分析质量控制,所用试剂均为优级纯,实验所用水为超纯水,标准样品测定结果均在允许范围内。

1.4 统计分析

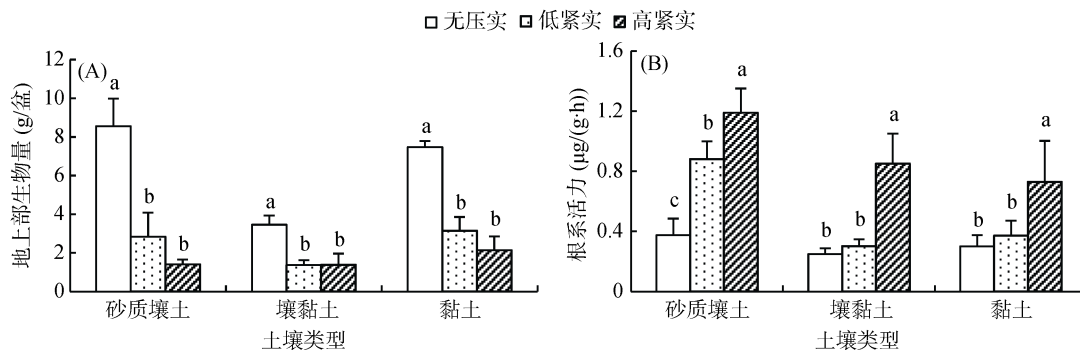
试验处理所得的数据采用 Excel 和 SPSS 软件进行分析,不同处理间数据的差异性采用方差分析(LSD),显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤紧实度对伴矿景天生物量和根系活力的影响

不同土壤类型中,与无压实处理比较,低紧实度和高紧实度处理对伴矿景天地上部生物量均产生显著性降低作用(图 1A)。低紧实度和高紧实度条件下,伴矿景天地上部生物量在砂质壤土分别下降 66.8% 和 83.5%($P<0.05$)壤黏土中分别下降 60.4% 和 59.9% ($P<0.05$),黏土中分别下降 57.9%和 71.4% ($P<0.05$)。与壤黏土和黏土比较,砂质壤土中伴矿景

天地上部生物量在紧实度条件下的降低量较大。但与低紧实处理比较,不同土壤类型中高紧实度条件下的地上部生物量无显著性差异。与无压实处理比较,伴矿景天的根系活力在高紧实度处理下最大(图 1B)。在不同土壤类型中,根系活力在高紧实度处理条件下均呈现显著增强,在砂质壤土、壤黏土、黏土中分别增加了 217%、241%和 142%($P<0.05$)。显然,高紧实度对壤黏土中植物根系活力的增加作用高于砂质壤土和黏土。3 种土壤中,低紧实度处理仅显著提高了砂质壤土中的根系活力,增加率为 135%。



(图中不同小写字母表示同一土壤类型下,不同处理间差异显著($P<0.05$),下同)

图 1 不同土壤紧实度下伴矿景天地上部生物量(A)和根系活力(B)

Fig.1 Shoot biomass (A) and the root activities (B) of *Sedum plumbizincicola* under different compact treatments

2.2 土壤紧实度对伴矿景天地上部镉锌吸收性的影响

砂质壤土和黏土中,不同紧实度处理对伴矿景天地上部 Cd(图 2A)和 Zn(图 2B)含量无显著性影响。与无压实处理比较,黏壤土上高紧实度处理显著降低伴矿景天地上部 Cd 和 Zn 含量,分别下降 35.6% 和 45.2%($P<0.05$)。通过伴矿景天地上部生物量和重金属含量值计算出每盆植物的 Cd 和 Zn 吸取量。与无压实处理比较,砂质壤土、壤黏土和黏土上伴矿景天地上部 Cd 吸取量在低紧实度处理下显著下降 50.4%、61.4% 和 43.4%($P<0.05$),高紧实度处理下显著下降 73.8%、74.9% 和 63.3%($P<0.05$)(图 2C);砂质壤土、壤黏土和黏土上伴矿景天地上部 Zn 吸取量则在低紧实度处理下显著下降 48.7%、73.6% 和 46.1%($P<0.05$),高紧实度处理下显著下降 79.5%、79.0% 和 63.5%($P<0.05$)(图 2D)。不同土壤类型中,高紧实度和低紧实度处理间的伴矿景天地上部的 Cd 和 Zn 吸取量差异较小。

综上,较高的土壤紧实度可显著降低伴矿景天地上部的 Cd 和 Zn 吸取量,并且在壤黏土中的降低效果更为明显。

2.3 不同紧实度对修复后土壤中镉和锌含量的影响

低紧实度和高紧实度处理条件下植物吸取修复后土壤全量 Cd 含量显著高于无压实处理(图 3A)。砂质壤土、壤黏土和黏土中,低紧实度和高紧实度处理下土壤全量 Cd 含量较无压实处理分别高 40.9% ~ 56.2%、23.4% ~ 29.3% 和 42.1% ~ 60.0%($P<0.05$)。砂质壤土和壤黏土中,低紧实度和高紧实度处理下修复后的土壤全量 Zn 含量也显著高于无压实处理,分别高 12.1% ~ 15.1% 和 6.49% ~ 10.2%($P<0.05$)(图 3B)。土壤紧实度增大影响了修复植物生长,显著降低其地上部生物量,因而植物修复能力显著降低,是低紧实度和高紧实度处理下土壤 Cd、Zn 含量高于无压实处理的主要原因。

3 讨论

3.1 土壤紧实度对伴矿景天生长的影响

土壤紧实度变化可从两个方面影响植物根系对养分元素和水分的吸收,进而影响植物地上部的生长。一方面,土壤紧实度增加可使根系和土壤的接触更加紧密,让更多的养分元素和水分进入到根生长

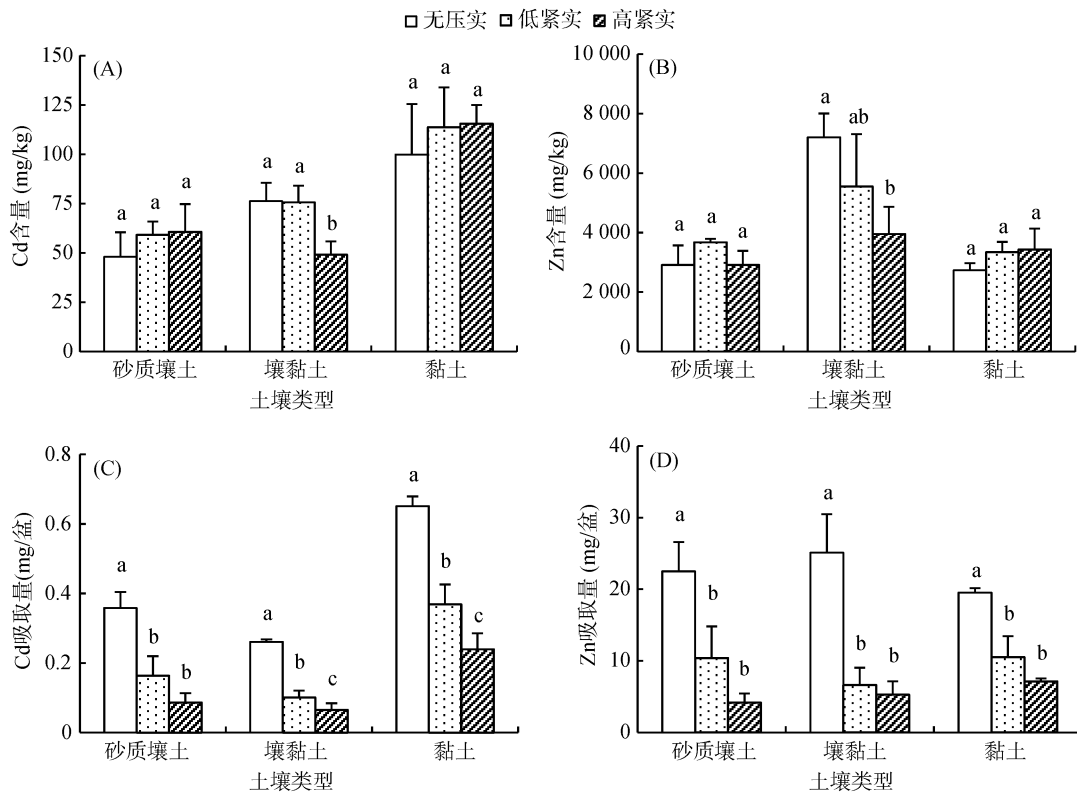


图 2 不同土壤紧实度下伴矿景天地上部镉锌含量和吸收量的影响

Fig. 2 Shoot cadmium and zinc contents of *Sedum plumbizincicola* and uptake amounts under different compact treatments

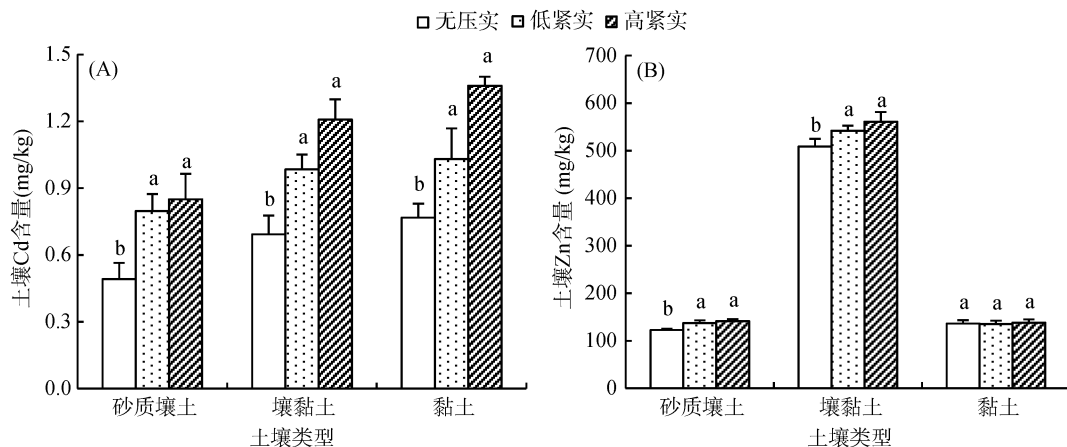


图 3 不同紧实度处理下伴矿景天吸取修复后的土壤全量 Cd (A) 和 Zn (B) 含量

Fig. 3 Soil cadmium (A) and zinc (B) contents after phytoextraction using *Sedum plumbizincicola* under different compact treatments

区,提高单根的吸收能力^[10,26]。多数研究表明^[15-16,27-28]在土壤容重大于 1.2 g/cm^3 时,相关植物根系活力会随着土壤紧实度的增强而下降。本研究中,伴矿景天的根系活力在高紧实度处理下显著高于无压实处理,这可能主要与盆栽试验中所采用的为过筛后的土壤,无压实处理的土壤容重仅为 $0.9 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$ (表 1)。此外,在胁迫环境下植物也会发生一系列变化以适应环境、提高其在逆境条件下的生存力^[29]。另一方面,土壤紧实度的增加也可导致土壤大孔隙度的降

低,提高根系生长环境的机械阻力,减少氧的供应和持水量^[22],从而导致植物光合速率下降^[23]、豆科植物根瘤数目和固氮量减少^[24]、植物氮素利用率降低^[25]等,绝大多数植物出现生物量下降的现象^[7,12-13]。由于伴矿景天的根系较细,从土壤中完全分离出所有的根系存在着较大的困难,因此本文未列出伴矿景天的根系生物量数据,但伴矿景天的地上部生物量在土壤低紧实度和高紧实度处理条件下显著降低。张兴义和隋跃宇^[27]通过对已有的研究分析后发现,土壤紧

胁迫限制了作物根系的生长,使得农作物对 N、P、K 等养分元素以及水分的利用率下降,同时也导致了土壤微生物学性状的恶化。土壤微生物学性状的恶化则可进一步引起土壤有机碳矿化和氮硝化作用的降低,反硝化作用增强,使得根区土壤的 N、P、K 等养分的供应能力下降^[30-31],从而影响了植物地上部的养分累积和生物量增加^[32-34]。孙艳等^[34]的研究表明,在一定的紧实度范围内土壤紧实度的变化与黄瓜的养分累积和生物量呈负相关关系。虽然低紧实度和高紧实度处理下伴矿景天的根系活力出现升高的趋势,但土壤紧实度通过抑制伴矿景天根系的总生物量和养分的总吸收量,降低了其地上部生物量。在重金属污染农田土壤中添加土壤结构改良剂(商品名 EB.a)后,杨勇等^[17]也发现土壤容重的降低显著促进了 Cd、Zn 超累积植物遏蓝菜根系生长和地上部生物量的增加。

王群等^[35]的研究表明,不同紧实度条件下不同类型土壤上玉米的根重、根长、养分累积量及产量均呈现出下降的趋势,下降幅度为黄褐土>砂姜黑土>潮土,且生育后期 P 素累积受紧实度影响更大。本研究中,砂质壤土上伴矿景天地上部生物量受紧实度作用引起的下降幅度明显高于壤黏质和黏土质地的土壤。因此,不同质地类型土壤对不同紧实度的响应以及伴矿景天地上部生物量变化的影响存在明显的差异。在砂质壤土中进行伴矿景天的种植,更应考虑土壤紧实度对生物量所带来的负面影响。

3.2 不同土壤紧实度对伴矿景天吸取修复镉锌效率的影响

与无压实处理比较,土壤低紧实度和高紧实度处理条件下伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量未出现显著变化,在壤黏土中 Cd、Zn 含量甚至出现了显著下降的现象。土壤重金属的生物有效性和根系吸收能力是影响植物体中重金属含量的重要因素。紧实胁迫环境下土壤水分渗透能力下降^[36],可能会影响土壤中的养分元素以及金属离子从非根际向根际的迁移能力;另一方面,主要可能与紧实胁迫条件下伴矿景天根系总生物量的降低或土壤紧实度使土壤碳矿化和氮硝化作用被抑制,降低了养分的有效性^[36],使伴矿景天吸收受到限制有关,进而影响 Cd、Zn 的总吸收量和转移量。虽然本研究的结果表明,高紧实度条件下伴矿景天的根系活力与无压实处理比较显著升高,但紧实胁迫下根系重金属吸收性以及重金属有效性的这种变化,可能会抵消伴矿景天根系对 Cd、Zn 吸收量的增加,进而使伴矿景天地上部 Cd、Zn 含量在紧实

胁迫条件下未出现增加、甚至下降的现象。此外,较高的土壤紧实度显著降低了伴矿景天地上部生物量,因此较高的土壤紧实度也显著降低了伴矿景天地上部的 Cd 和 Zn 的吸收量。对重金属污染土壤进行结构改良后,杨勇等^[17]也发现土壤容重从 1.27 g/cm³ 下降至 1.09 g/cm³ 后,遏蓝菜地上部的 Cd 含量也从 65.1 mg/kg 上升至 76.4 mg/kg, Cd 的提取率也从 15% 上升到 19%,但遏蓝菜地上部 Zn 含量和提取总量并没有显著变化。上述研究结果表明,较高土壤紧实度可降低伴矿景天对污染土壤中 Cd 和 Zn 的吸取修复能力,但主要体现在对植物生长的抑制作用,而对于植物体内重金属含量并无显著影响。不同土壤类型中,较高紧实度对壤黏土中伴矿景天 Cd 和 Zn 吸取量的降低效果明显要高于砂质壤土和黏土,其机理有待深入研究。

4 结论

3 种类型土壤对紧实度的响应显著不同,砂质壤土中伴矿景天地上部生物量受紧实胁迫作用影响最大,与无压实相比,下降 66.8%~83.5%。高紧实度对伴矿景天地上部 Cd、Zn 吸收抑制作用显著,在壤黏土中表现尤其明显;与无压实相比,紧实胁迫处理 Cd 吸取量下降了 61.4%~74.9%, Zn 吸取量下降了 73.6%~79.0%。

土壤紧实度影响超积累植物伴矿景天对污染土壤的 Cd、Zn 修复效果。土壤紧实胁迫显著降低了伴矿景天地上部生物量及其 Cd、Zn 吸收量。与砂质壤土和黏土比较,紧实胁迫在壤黏土中对伴矿景天吸取修复效率的降低效果更加明显。因此,进行伴矿景天田间大面积推广种植的同时,建议控制机械作业次数或采取保护性耕作措施以减轻对土壤的压实作用。

参考文献:

- [1] Hu X, Ding Z. Lead/cadmium contamination and lead isotopic ratios in vegetables grown in peri-urban and mining/smelting contaminated sites in Nanjing, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 2009, 82(1): 80-84
- [2] 蔡保松,陈同斌,廖晓勇,等. 土壤砷污染对蔬菜砷浓度及食用安全性的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 711-717
- [3] Williams P N, Ming L, Sun G X. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(3): 637-642

- [4] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?[J]. *Plant Science*, 2011, 180(2): 169–181
- [5] 陈英旭. 土壤重金属的植物污染化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [6] 顾继光, 周启星, 王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 143–151
- [7] 邹养军, 马锋旺, 韩明玉, 等. 土壤紧实胁迫与植物抗胁迫响应机理研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 212–215
- [8] Vepraskas M J. Plant response mechanisms to soil compaction // Wilkinson R E. *Plant-environment interaction*[J]. New York: Marcel Dekker Inc, 1994: 263–287
- [9] 迟仁立, 左淑珍, 夏平, 等. 不同程度压实对土壤理化性状及作物生育产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 39–43
- [10] 刘晚苟, 山仑, 邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. *植物生理学通讯*, 2001, 37(3): 254–260
- [11] 孙曰波, 赵兰勇, 张玲. 土壤紧实度对玫瑰幼苗生长及根系氮代谢的影响[J]. *园艺学报*, 2011, 38(9): 1775–1780
- [12] 贺明荣, 王振林. 土壤紧实度变化对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(4): 649–654
- [13] 宋家祥, 庄恒扬. 不同土壤紧实度对棉花根系生长的影响[J]. *作物学报*, 1997, 23(6): 719–726
- [14] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. *土壤*, 2005, 37(1): 32–36
- [15] 张向东, 华智锐, 邓寒霜. 土壤紧实胁迫对黄芩生长、产量及品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(3): 7–11
- [16] 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
- [17] 杨勇, 江荣风, 李花粉, 等. 土壤容重改变对锌/镉超累积植物遏蓝菜根系特征及吸镉的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(12): 3043–3049
- [18] 吴龙华, 周守标, 毕德. 中国景天科植物一新种——伴矿景天[J]. *土壤*, 2006, 38(5): 632–633
- [19] Barzegar A R, Asoodar M A, Ansari M. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the proctor compaction loads in reducing soil compactibility[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 57(3): 167–172
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤物理和化学分析*[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978: 511–514
- [21] 张雄. 用“TTC”法(红四氮唑)测定小麦根和花粉的活力及其应用[J]. *植物生理学报*, 1982(3): 48–50
- [22] Gupta S C, Sharma P P, Defranchi S A. Compaction effects on soil structure[J]. *Advances in Agronomy*, 1989, 42: 311–338
- [23] Tu J C, Tan S C. Soil compaction effect on photosynthesis, root rot severity, and growth of white beans[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1988, 68(2): 455–459
- [24] Tu J C, Buttery B R. Soil compaction reduces nodulation, nodule efficiency, and growth of soybean and white bean[J]. *Hortscience*, 1988, 23: 722–724
- [25] Sills M J, Carrow R N. Soil compaction effects on nitrogen use in tall fescue[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1982, 107(5): 934–937
- [26] Fairchild G L, Miller M H. Vesicular-arbuscular mycorrhizas and the soil disturbance induced reduction of nutrient absorption in maize[J]. *New Phytologist*, 1988, 110: 75–84
- [27] 张兴义, 隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(10): 161–164
- [28] Passioura J B, Leeper G W. Soil compaction and manganese deficiency[J]. *Nature*, 1963, 200: 29–30
- [29] 黄璐琦, 郭兰萍. 环境胁迫下次生代谢产物的积累及道地药材的形成[J]. *中国中药杂志*, 2007, 32(4): 277–280
- [30] Arvidsson J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction[J]. *Plant & Soil*, 1999, 208(1): 9–19
- [31] Bhandral R, Saggat S, Bolan N S, et al. Transformation of nitrogen and nitrous oxide emission from grassland soils as affected by compaction[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(2): 482–492
- [32] Mari G R, Ji C Y, Zhou J. Effects of soil compaction on soil physical properties and nitrogen, phosphorus, potassium uptake in wheat plants[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 74–79
- [33] Oussible M, Allmaras R R, Wynch R D, et al. Subsurface compaction effects on tillering and nitrogen accumulation in wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85(3): 619–625
- [34] 孙艳, 王益权, 冯嘉玥, 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
- [35] 王群, 张学林, 李全忠, 等. 紧实胁迫对不同土壤类型玉米养分吸收、分配及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(21): 4356–4366
- [36] Neve S D, Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2000, 30(5/6): 544–549

Effects of Soil Compaction on Phytoextraction of Cadmium and Zinc Polluted Soils by *Sedum plumbizincicola*

WANG Lili^{1,2}, ZHOU Tong², LI Zhu², ZHOU Jiawen², WU Shengchun¹, WU Longhua^{2*}

(1 School of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;

2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of soil compaction on the growth of *Sedum plumbizincicola* and its uptake of cadmium (Cd) and zinc (Zn). Soils of different textures (clay, loamy clay and sandy loam) were treated respectively with no compaction, low-level compaction and high-level compaction. In comparison to no compaction, soil compaction resulted in significant decreases in shoot biomass of *Sedum plumbizincicola* by 66.8%–83.5%, 59.9%–60.4% and 57.9%–71.4% in sandy loam, loamy clay and clay soils, respectively. However, the root activity was significantly improved by 142%–241% under high compaction treatment. In clay loam soil, high compaction resulted in significant decreases in Cd and Zn contents of shoot biomass. However, in sandy loam and clay soils, soil compaction had no significant effects on Cd and Zn contents of shoot biomass. In the respective sandy loam, loam clay and clay soils, soil compaction significant decreased Cd uptakes by 50.4%–73.8%, 61.4%–74.9% and 43.4%–63.3%, Zn uptakes by 48.7%–79.5%, 73.6%–79.0% and 46.1%–63.5%, respectively. Overall, soil compaction has the largest impacts on inhibiting the efficiencies of Cd and Zn uptakes by *Sedum plumbizincicola* in loam clay soil in the presenting study.

Key words: Phytoextraction; Heavy metal pollution; Soil compaction; Paddy soil; Soil texture