

刘 勇, 刘 燕, 杨 丹, 等. 三叶草(*Trifolium repens*)用于土壤镉污染的修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2226–2232.

LIU Yong, LIU Yan, YANG Dan, et al. Remediation potential of *Trifolium repens* used in cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2226–2232.

三叶草(*Trifolium repens*)用于土壤镉污染的修复潜力

刘 勇^{1,2,3}, 刘 燕^{1*}, 杨 丹¹, 梁 清¹, 娄 杰¹

(1. 贵阳学院生物与环境工程学院, 贵阳 550005; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘 要:通过温室盆栽试验法,研究了土壤镉(Cd)污染下三叶草对土壤Cd的富集特征及土壤Cd的净化能力等,以期三叶草对土壤Cd的生态修复提供依据。结果表明:三叶草具有较好的Cd耐受性,总生物量增加值介于2.0~3.7 g。随着土壤Cd处理浓度增加,三叶草根、茎、叶中Cd含量分别高达178.6、101.3、130.9 mg·kg⁻¹,富集系数(BF)分别介于9.7~17.9、3.0~10.1、3.1~13.1,富集能力大小总体表现为根>叶>茎,转运系数(TF)值均≥1(除T2处理),表明三叶草有较强的Cd富集能力,且能较好地将Cd转运至地上部位;三叶草根、茎、叶对Cd的吸收量均随着土壤Cd处理浓度的升高而递增,地上部位(茎、叶)吸Cd百分率(占总吸Cd量)最高达87.2%,对土壤Cd净化率最高达6.2%。因此得出三叶草具有作为Cd超积累植物的较好潜力,可以进行污染区域美化改造和Cd污染修复。

关键词:Cd污染;土壤;修复潜力;三叶草

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)11-2226-07 doi:10.11654/jaes.2017-0518

Remediation potential of *Trifolium repens* used in cadmium-contaminated soils

LIU Yong^{1,2,3}, LIU Yan^{1*}, YANG Dan¹, LIANG Qing¹, LOU Jie¹

(1. School of Biological and Environmental Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: In this study, the enrichment characteristics and purification capacity of *Trifolium repens* for cadmium in soil were investigated in order to provide a reference for ecological restoration of cadmium. The results showed that the added value of *T. repens* biomass reached 2.0~3.7 g, indicating that *T. repens* could have a high tolerance for cadmium. Cadmium accumulation in the roots, stems, and leaves of *T. repens* reached 178.6, 101.3 mg·kg⁻¹, and 130.9 mg·kg⁻¹, respectively, as the concentration of cadmium increased. The bioaccumulation factor values of the roots, stems, and leaves were 9.7~17.9, 3.0~10.1, and 3.1~13.1, respectively, and the ability of cadmium to accumulate in different parts of *T. repens* was decreased in the order of roots>leaves>stems. The translocation factor values for cadmium in *T. repens* were all greater than 1 (except T2 treatment). These data indicated that *T. repens* could have a strong capacity for cadmium enrichment and could easily transport cadmium into the soil. The amount of cadmium uptake of *T. repens* increased diversely with the different cadmium treatments in soils; in particular, the cadmium uptake of the aboveground parts (stems and leaves) of *T. repens* reached 87.2%, and the purifying rate of cadmium in soils was as high as 6.2%. Based on these findings, *T. repens* was found to have promising applications in beautifying surroundings and repairing cadmium-contaminated soils.

Keywords: cadmium pollution; soil; remediation potential; *Trifolium repens*

收稿日期:2017-04-10 录用日期:2017-06-21

作者简介:刘 勇(1987—),男,甘肃平凉人,讲师,从事环境生态与污染防治研究。E-mail:lyong821mmm@163.com

* 通信作者:刘 燕 E-mail:gyly68@sina.com

基金项目:贵州省科学技术厅自然科学基金联合基金项目(黔科合 LH 字[2014]7168 号, LKG[2013]23 号);贵州省应用基础研究计划重大项目(黔科合 J 重大字[2015]2001 号);国家级大学生创新创业训练计划平台项目(201510976051)

Project supported: The Joint Funds of the Natural Science Foundation of Science and Technology Department of Guizhou Province, China (LH[2014]7168, LKG[2013]23); Project Supported by the Major Program for the Applied Basic Research of Guizhou Province, China ([2015]2001); The Project of National Students' Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program (201510976051)

目前,重金属污染是全球面临的重大环境污染问题之一^[1]。其中镉(Cd)作为一种重要的重金属材料,广泛应用于电镀、冶炼、采矿、颜料以及电池等工业领域^[2]。同时,Cd又属于剧毒重金属元素,在环境中活性强,易进入食物链,可在人体肝、肾及骨骼等组织中积累从而造成严重损伤^[3-4]。近年来随着Cd工业发展,Cd环境污染问题备受关注^[5-6]。2014年公布的全国土壤污染状况调查结果表明,我国土壤中Cd污染的点位超标率达7.0%,在无机污染物中最高^[7]。土壤重金属植物修复具有高效环保、投资较少、应用潜力大等特点,是目前不断发展研究的重金属修复方法之一^[8-9]。其中筛选出具有对重金属元素富集能力强的超积累植物是研究的热点^[10-12]。

三叶草(*Trifolium repens*)为多年生草本,豆科、车轴草属,具有抗寒耐热、固氮能力强、生长快、寿命长、酸碱土壤上均适应性强等特点,是常见的堤岸斜坡防护及草坪装饰草种,具有保持水土的作用,也可以作为绿肥或优良牧草等^[13-16]。近年来研究表明,三叶草在大气污染监测以及重金属环境修复等方面是理想的种质资源^[17-18]。将三叶草用于土壤Cd污染修复,可以起到环境美化、水土保持和Cd污染修复等多重作用。已有研究表明,三叶草在水培条件下对Cd胁迫具有一定耐受性,并表现出富集植物的特性^[19]。三叶草与禾本科植物协同修复Cd的效果较好,以及AM菌对三叶草富集Cd具有明显影响^[20-21],但将其单独用作土壤Cd的修复研究比较少。本文以三叶草为研究对象,进行温室盆栽实验,参考国家菜地土壤环境质量二级标准 $Cd \leq 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 15618—2008),人工模拟土壤Cd污染环境,研究三叶草对土壤Cd富集特征以及土壤Cd净化能力等,以期对土壤Cd生态修复的超积累植物筛选提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

三叶草:2015年10月采集于校园周边无污染绿地,选取生长旺盛且长势基本一致的三叶草植株。

盆栽土壤:2015年10月采集于贵阳市某有机蔬菜基地的沙壤土,将土壤晾干、筛除异物、磨碎、过2 mm筛。少量土壤用玛瑙研钵研磨,过200目筛,测定土壤部分理化参数:pH值为7.1,有机质为7.6%,速效氮为 $67.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷为 $76.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 $57.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总镉为 $0.017 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。表明土壤肥力较好且无Cd污染。

1.2 试验方法

含Cd土壤配制及植物盆栽:2015年10月采用温室(22~26℃)盆栽土培法,将事先处理好的土壤放入15 cm×12 cm的塑料花盆中,每盆装土1.0 kg。采用 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (AR),准确计算和配制 Cd^{2+} 溶液,并缓慢均匀注入盆栽土(避免Cd不均匀和溶液过剩漏出花盆),充分搅拌,使土壤Cd浓度分别为:0、3、5、7、10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 5个处理水平(分别记为T1、T2、T3、T4、T5),每个处理3次重复。模拟Cd污染土壤平衡2周后进行三叶草移栽,确保每盆三叶草长势、株数(5株)及鲜重(称量记录)一致,连续培养45 d。定期浇水,含水率保持在75%,严格防止从花盆底座流出造成Cd流失。45 d后整株收获,清洗、晾干、称鲜重,并用剪刀将其分割为根、茎、叶,并称鲜重,然后105℃杀青30 min,60℃烘干至恒重,称干重,于自封袋保存备用。同时,采集盆中根际土壤25 g,测定培养后土壤中Cd,即土壤Cd残留量,该土壤经风干、研磨、过200目筛后,一并于自封袋保存备用。

样品中Cd含量测定:采用电热板加热, HCl — HNO_3 — HClO_4 法消解植物和土壤样品^[22],采用岛津AA-7000型石墨炉原子吸收仪进行测定。

1.3 数据处理

采用Excel 2007和SPSS 22.0统计软件进行数据处理,利用最小显著性差异检验(LSD法)进行差异显著性检验,采用Sigmaplot 10.0作图。

2 结果与分析

2.1 三叶草生物量变化及外观特征

经过45 d培养后,不同Cd处理水平下,三叶草生长均良好,未出现明显毒害现象,其生物量均有所增加(图1A),且随着Cd浓度升高,整株生物量增加值分别达4.8、2.0、3.3、3.7 g和2.7 g(表1),表明三叶草具有一定土壤Cd耐受性。如图1所示,培养后不同Cd处理下三叶草根、茎、叶各部位鲜重、干重无明显变化,但三叶草整株总生物量增加值均显著低于T1组($P < 0.05$),表明Cd对三叶草生长均有一定抑制作用。不同Cd处理下三叶草整株及根、茎、叶不同部位含水率分别介于77.4%~77.7%、63.3%~64.2%、76.9%~77.9%、82.4%~85.6%,均小于T1组,且总体上随着Cd浓度升高而含水率逐渐降低(表1),表明Cd对三叶草内部水分有一定影响,进而很可能影响其生物量变化。

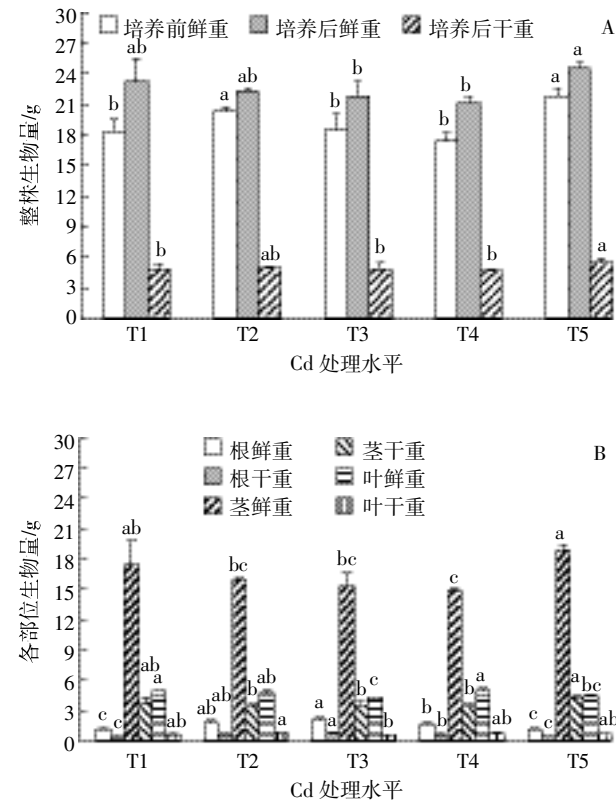
2.2 三叶草各部位对Cd富集特征

随着土壤中 Cd 浓度的升高,三叶草根、茎、叶(均以干重计算)中 Cd 含量均呈现明显递增趋势,不同 Cd 处理下根中 Cd 含量介于 29.3~178.6 mg·kg⁻¹ ($P<0.05$);茎中 Cd 含量为 9.1~101.3 mg·kg⁻¹ ($P<0.05$);叶中 Cd 含量为 9.2~130.9 mg·kg⁻¹ ($P<0.05$)(图 2)。当

土壤中 Cd 投加浓度为 10 mg·kg⁻¹ 时,三叶草根、茎、叶中 Cd 含量均超过 100 mg·kg⁻¹ 这一 Cd 超积累植物临界含量标准^[23-24]。相同 Cd 处理下,三叶草各部位 Cd 含量表现为根>叶>茎,表明三叶草根对 Cd 富集作用最强、叶次之,茎相对较弱。由表 2 可知,三叶草根、茎、叶中 Cd 含量高低均与土壤 Cd 浓度具有极显著的正相关关系,相关系数 R^2 分别为 0.971、0.936、0.928,达到极显著水平 ($P<0.01$),表明三叶草具有富集更多土壤 Cd 的可能性。综合 2.1、2.2 数据,表明三叶草作为地被植物适宜在 Cd 污染土壤环境下生长,可用于污染区域美化改造和土壤 Cd 污染修复。

2.3 三叶草各部位对 Cd 吸收量及土壤 Cd 残留量、Cd 净化率

重金属吸收量是用以评价植物修复重金属污染土壤潜力的重要指标之一(重金属吸收量=植物重金属含量×生物量)^[25-26]。由表 3 可知,三叶草整株及不同部位对 Cd 的吸收量均随着 Cd 浓度升高总体呈递增趋势。相同 Cd 处理下,茎吸收量最大,根次之,叶最小(除 T5 处理水平下根<叶),这主要与茎生物量值相对较高有关。随着 Cd 浓度升高,三叶草地上部位吸 Cd(占三叶草总吸 Cd 量)百分率分别高达 68.3%、



数值是平均值与 3 次重复的标准偏差,不同小写字母表示各处理水平间差异显著($P<0.05$),下同。

图 1 不同 Cd 处理三叶草整株及各部位生物量变化
Figure 1 Biomass of different parts of *Trifolium repens* in different Cd concentration

表 1 不同 Cd 处理三叶草培养前后整株鲜重差及各部位含水率
Table 1 Biomass variation and moisture content of *Trifolium repens* in different Cd concentration

Cd 处理水平	培养前后对比				
	整株鲜重差/g	整株	根	茎	叶
T1	4.8±1.1a	78.9	65.8	78.1	86.3
T2	2.0±0.3c	77.7	64.2	77.9	82.4
T3	3.3±0.2b	77.5	63.7	77.3	85.6
T4	3.7±0.5b	77.4	63.3	77.2	84.8
T5	2.7±0.2bc	77.4	63.5	76.9	83.4

注:数据为平均值±标准偏差;不同小写字母表示各处理水平间差异显著($P<0.05$),下同。

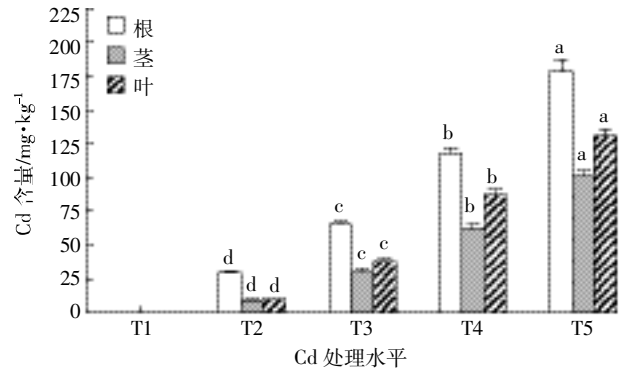


图 2 不同 Cd 处理三叶草各部位 Cd 含量
Figure 2 Cd contents enriched by different parts of *Trifolium repens* in different Cd concentration

表 2 不同 Cd 处理三叶草各部位 Cd 含量的曲线拟合模型
Table 2 Accumulating models of Cd in *Trifolium repens* in different Cd concentration

三叶草不同部位	线性回归方程	R^2
根	$y=18.439x-14.121$	0.971**
茎	$y=10.569x-12.385$	0.936**
叶	$y=13.956x-16.981$	0.928**

注:“y”指三叶草各部位 Cd 含量,mg·kg⁻¹;“x”指 Cd 处理浓度,mg·kg⁻¹;“**”指达 1% 显著水平。

71.8%、79.3%、87.2%,呈不断增加趋势。通过计算三叶草对 Cd 净化率和土壤 Cd 残留量表明,土壤总 Cd 残留量均有所减小,净化率随着土壤中 Cd 投加浓度的升高而提高,介于 1.9%~6.2%(均值约 4.2%),也进一步表明三叶草具有在更高的 Cd 浓度土壤下富集更多 Cd 的潜力。

2.4 富集系数(BF)与转运系数(TF)

富集系数和转运系数是衡量植物积累重金属能力大小的重要指标,分别表征植物各部位对重金属的富集能力和重金属由地下部分(根)向地上部分(茎、叶等)的迁移能力^[27]。由表 4 可知,不同 Cd 处理水平,三叶草根对 Cd 的 BF 值分别高达 9.8、13.0、16.8、17.9 ($P<0.05$),茎对 Cd 的 BF 值分别达 3.0、5.9、8.9、10.1 ($P<0.05$),叶对 Cd 的 BF 值分别达 3.1、7.4、12.4、13.1 ($P<0.05$),且 Cd 浓度越高,各部位对 Cd 的 BF 值递增越明显,BF 值间均差异显著(除 Cd 浓度为 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,叶对 Cd 的 BF 值相近)。结合前人研究^[23-24],植物地上部分对重金属的 BF 值大于 1 是重金属超积累植物区别于普通植物的一个重要特征,表明在土壤 Cd 污染下三叶草具有作为 Cd 超积累植物的潜力,且随着 Cd 浓度增加,其积累 Cd 能力更强。不同 Cd 浓度下三叶草对 Cd 的 TF 值分别为 0.6、1.0、1.3、1.3,除 T2 处理之外,TF 值均 ≥ 1 ,表明 Cd 污染土壤环境中,三叶草能将 Cd 从根较好地转运至地上部位,且转运能力随 Cd 浓度升高逐渐增强。

2.5 三叶草各部位对 Cd 富集的相关性

由表 5 可知,相同 Cd 处理水平下,对三叶草根、茎、叶的 Cd 富集特征进行相关性分析表明,三叶草不同部位对 Cd 的富集特征具有极显著相关性 ($P<0.01$),相关系数达 0.992~0.996,反映了其不同部位对 Cd 的富集特性存在内在关联性,即随着 Cd

表 4 不同 Cd 处理三叶草对 Cd 的 BF 值、TF 值

Table 4 The BF and TF values of *Trifolium repens* in different Cd concentration

Cd 处理水平	BF 值			TF 值
	根	茎	叶	
T1	—	—	—	—
T2	9.8±0.5d	3.0±0.2d	3.1±0.1c	0.6±0.0c
T3	13.0±0.4c	5.9±0.6c	7.4±0.4b	1.0±0.1b
T4	16.8±0.6b	8.9±0.3b	12.4±0.7a	1.3±0.1a
T5	17.9±0.8a	10.1±0.4a	13.1±0.5a	1.3±0.1a

注:BF 值=三叶草各部位 Cd 含量/土壤 Cd 初始含量;TF 值=三叶草地上部分 Cd 含量/三叶草地下部分 Cd 含量。

浓度升高三叶草根、茎、叶中富集的 Cd 量均同时增加,土壤中 Cd 进入植物后由根至茎最后至叶等的迁移性较好。

3 讨论

目前,Cd 超积累植物筛选是土壤 Cd 污染修复领域重要的基础内容之一。Cd 超积累植物的筛选标准一般如下:(1)植物对 Cd 的富集临界含量达到 $100.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;(2)植物对 Cd 富集系数 BF 值大于 1;(3)植物对 Cd 转移系数 TF 值大于 1。然而现实中同时具备上述标准的植物很少,这是 Cd 超积累植物发现较少的重要原因^[28-29]。三叶草生长繁衍快速、抗逆性比较

表 5 三叶草不同部位对 Cd 富集的相关性

Table 5 The correlation for Cd among different parts of *Trifolium repens*

三叶草各部位	根	茎	叶
根	1	—	—
茎	0.995**	1	—
叶	0.992**	0.996**	1

注:“**”表示在 1%达极显著水平。

表 3 不同 Cd 处理三叶草各部位对 Cd 吸收量及土壤 Cd 残留量、Cd 净化率(均以干重计算)

Table 3 The Cd uptake of different parts of *Trifolium repens*, the residual amount and the purifying rate of Cd of the soils in different Cd concentration

Cd 处理水平	地上部吸 Cd 量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$			根吸 Cd 量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总吸 Cd 量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤 Cd 残留量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部吸 Cd 百分率/%	地上部相对生物量/%	净化率/%	回收率/%
	茎	叶	茎+叶							
T1	—	—	—	—	—	—	—	100	—	—
T2	32.2±3.4d	7.7±1.0d	39.9±3.3d	18.5±1.7c	58.4±1.7d	2.8±0.2d	68.3	96.9	1.9	93.8
T3	103.4±19.3c	23.3±3.7c	126.6±22.6c	49.8±6.2b	176.4±28.1c	4.3±0.2c	71.8	91.3	3.5	88.9
T4	212.6±20.8b	66.0±10.3b	278.5±11.9b	72.8±8.1a	351.3±4.8b	5.5±0.3b	79.3	92.4	5.0	83.2
T5	439.7±33.9a	98.4±7.4a	538.0±41.3a	78.9±4.2a	616.9±44.4a	8.3±0.3a	87.2	113.1	6.2	88.8

注:净化率=三叶草总吸 Cd 量/土壤 Cd 初始含量 $\times 100\%$,综合评价三叶草对土壤 Cd 的净化情况;回收率=(三叶草总吸 Cd 量+土壤 Cd 残留量)/土壤 Cd 初始含量 $\times 100\%$ 。

强,且其水土保持和环境美化功能较为明显,而自然环境中重金属污染区往往重金属含量高、pH 值较低且大多贫瘠荒凉。本研究表明三叶草在高达 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的重度 Cd 污染土壤环境下仍生长较好或受到 Cd 的抑制作用较小,体现出其较强的 Cd 污染环境抗逆性,并且该浓度下三叶草根、茎、叶中 Cd 含量均大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,BF 值、TF 值均远大于 1,因此根据本研究结果,三叶草在土壤高浓度 Cd 污染下具备 Cd 超积累植物的筛选条件。

另外,研究表明植物对重金属的富集特征同时与植物种类、重金属元素价态、物质结构及其环境中类元素共存离子浓度以及溶解度等均有关^[29]。同时,Liu 等^[30]、Tang 等^[31]、任珺等^[32]研究表明环境中重金属浓度的高低是影响植物中重金属富集量的主要因素,即部分植物富集重金属量要达到临界值,其生长环境中重金属浓度需达到一定量。本研究中三叶草根、茎、叶中 Cd 含量与土壤 Cd 浓度呈现正相关性,表明其具有富集更多土壤中 Cd 的潜力,也反映了其生长环境介质内 Cd 浓度是影响三叶草中 Cd 富集量的重要因素。本研究中三叶草对 Cd 的 BF 值远高于同样 Cd 浓度下杨艳等^[33]对头花蓼、王友保等^[34]对吊兰、牛之欣等^[35]对紫花苜蓿等的相关研究,表明三叶草在富集土壤 Cd 中具有较大优势。三叶草虽整株生物量相对较小,使得其存在一定修复局限性,但其繁殖能力强且地上部分吸 Cd 量占总吸 Cd 量的 68.3%~87.2%,高于杨艳等^[33]对蓼科植物头花蓼富集 Cd 的相关研究(59.3%~65.1%),略低于苏德纯等^[36]对 Cd 的超积累植物印度芥菜的相关研究($\geq 87.0\%$),表明三叶草在原地 Cd 修复的后续(如收割等)处理等过程也存在优势。三叶草的 Cd 净化率均值约为 4.2%,甚至略高于印度芥菜、油菜溪口花籽对 Cd 的净化率值(分别为 2.5%~3.3%、3.5%~3.9%),表明其在实践中具有一定应用潜力^[36]。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)三叶草总生物量随着 Cd 浓度升高,其增加量介于 2.0~3.7 g(略低于对照组),表明三叶草具有 Cd 耐受性,但同时 Cd 对其生长有轻微抑制作用。不同部位含水率均随着 Cd 浓度升高而逐渐降低,表明 Cd 对三叶草内部水分产生影响,进而很可能影响其生物量变化。

(2)三叶草根、茎、叶均对 Cd 有较好富集性,均随着 Cd 浓度升高而富集作用更强,分别高达 178.6、101.3、130.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其 BF 值分别介于 9.7~17.9、3.0~10.1、3.1~13.1,富集能力大小表现为根>叶>茎。三叶草对 Cd 的 TF 值均 ≥ 1 (除 T2 处理),表明三叶草能较好地 Cd 转移至地上部位,且转移能力随 Cd 浓度升高逐渐增强。

(3)三叶草整株及根、茎、叶各部位对盆栽土 Cd 吸收量均随着 Cd 浓度增加而递增,其中地上部位(茎、叶)吸 Cd 百分率最高达 87.2%。三叶草对 Cd 净化率随着 Cd 处理水平增加而提高,净化率最高达 6.2%。

综上,三叶草具有作为超积累植物的较好潜力,可以作为良好的备选种质资源,同时可兼具 Cd 污染区域环境美化改造和污染修复。

4.2 展望

(1)本研究参考国家土壤环境质量二级标准($\text{Cd} \leq 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(GB 15618—2008),进行 Cd 污染模拟,尚未得出三叶草根、茎、叶不同部位对 Cd 的富集临界值等,下一步工作可模拟更高 Cd 污染环境研究三叶草生理指标变化以及对 Cd 富集特征。

(2)土壤 Cd 以不同形态存在,其中有效态 Cd 通常对环境危害性较大,且能被植物等吸收利用。同时,土壤 Cd 形态与土壤 pH 值存在一定关系,因此对土壤 Cd 形态进行分级提取,以及 Cd 形态之间转化与土壤 pH 值等参数的关系应做更为系统研究。

参考文献:

- [1] 串丽敏,赵同科,郑怀国,等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120):213-222.
CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, ZHENG Huai-guo, et al. Research advances in remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(120):213-222.
- [2] 邓玉良. 镉的应用和镉污染[J]. 化学世界, 2012(11):702-704.
DENG Yu-liang. The application of cadmium and the cadmium pollution[J]. *Chemical World*, 2012(11):702-704.
- [3] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, et al. Assessment of sepiolite for immobilization of cadmium-contaminated soils[J]. *Geoderma*, 2013, 193/194: 149-155.
- [4] Liu X M, Song Q J, Tang Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: A multimedia analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463/464:530-540.
- [5] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2):293-298.
SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,

- 2013, 20(2):293-298.
- [6] Wang X, Liang C H, Yin Y. Distribution and transformation of cadmium formations amended with serpentine and lime in contaminated meadow soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(7):1531-1537.
- [7] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部及国土资源部, 2014.
- Environmental Protection Department, Ministry of Land and Resources. The soil pollution condition investigation communiqué[R]. Beijing: The Environmental Protection Department and the Ministry of Land and Resources, 2014.
- [8] Shi J Y, Yuan X F, Chen X C, et al. Copper uptake and its effect on metal distribution in root growth zones of *Commelina communis* revealed by SRXRF[J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 141(1/2/3):294-304.
- [9] 卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5):1864-1869.
- WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, et al. Enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils using *Sedum alfredii* Hance with biodegradable chelate GLDA[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5):1864-1869.
- [10] 汤叶涛, 关丽捷, 仇荣亮, 等. 镉对超富集植物滇苦菜抗氧化系统的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(2):324-332.
- TANG Ye-tao, GUAN Li-jie, QIU Rong-liang, et al. Antioxidative defense to cadmium in hyperaccumulator *Picris divaricate* V.[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):324-332.
- [11] Krämer U. Metal hyperaccumulation in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, 61:517-534.
- [12] 黄红英, 徐剑, 白音, 等. 不同土壤生境下斑茅对重金属的富集特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4):961-966.
- HUANG Hong-ying, XU Jian, BAI Yin, et al. Enrichment of heavy metals in *Saccharum arundinaceum* (Retz.) Jeswiet in different soil Habitats[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4):961-966.
- [13] Lin W H, Hofmann R W, Stilwell S A. Physiological responses of five species of trifolium to drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2011, 17(4):580-584.
- [14] 冯淑华. 三叶草对干旱胁迫的反应及适应性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- FENG Shu-hua. Study on responses and adaptability of clovers under drought stress[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.
- [15] 陈阳, 陈雅君, 周阳, 等. 三叶草不同品种茎结构特征与抗旱性的关系[J]. 草地学报, 2012, 20(4):686-691.
- CHEN Yang, CHEN Ya-jun, ZHOU Yang, et al. Stem structure associated with drought resistance in different clover cultivars[J]. *Acta Agrestia Ainica*, 2012, 20(4):686-691.
- [16] 宋亚倩, 赵西宁, 潘岱立, 等. 模拟降雨下草被坡面水沙调控效应及水分转化研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):35-41.
- SONG Ya-qian, ZHAO Xi-ning, PAN Dai-li, et al. Effects of grasses on runoff and sediment reduction and water transformation on the slope under simulated rainfall[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5):35-41.
- [17] 彭立, 杨振乾, 刘敏敏, 等. 大气污染物与绿化植物光合速率的关系研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7):1166-1170.
- PENG Li, YANG Zhen-qian, LIU Min-min, et al. Relationship between net photosynthetic rate of green plants and air pollutants[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7):1166-1170.
- [18] 林海, 张海丽, 董颖博, 等. 重金属复合污染下草本植物两两组合水培的富集特性[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8):1154-1162.
- LIN Hai, ZHANG Hai-li, DONG Ying-bo, et al. Enrichment characteristics of various heavy metals by four herbaceous plants in pair combination under hydroponic culture[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8):1154-1162.
- [19] 刘燕, 谢阿娜. 三叶草对重金属镉的富集特性研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(1):82-84.
- LIU Yan, XIE A-na. Enrichment features of *Trifolium pretense* L. under cadmium stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(1):82-84.
- [20] 杨远祥, 朱雪梅, 邵继荣, 等. 不同混种比例对白三叶和香根草锌镉富集的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):266-270.
- YANG Yuan-xiang, ZHU Xue-mei, SHAO Ji-rong, et al. Influence of different mixed proportion on Zn and Cd enrichment of white clover and vetiver[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):266-270.
- [21] 孔凡美, 史衍玺, 冯固, 等. AM菌对三叶草吸收、累积重金属的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3):92-96.
- KONG Fan-mei, SHI Yan-xi, FENG Gu, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal tolerance of clover in contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3):92-96.
- [22] 韩少华, 黄沈发, 唐浩, 等. 3种植物对Cd污染农田土壤的修复效果比较试验研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(12):22-26.
- HAN Shao-hua, HUANG Shen-fa, TANG Hao, et al. A comparative study on the performance of 3 plants for remediation of cadmium contaminated farmland soil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(12):22-26.
- [23] 林彦彦, 高珊珊, 陈婧芳, 等. 海马齿对锌的耐性与富集特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(4):561-567.
- LIN Yan-yan, GAO Shan-shan, CHEN Jing-fang, et al. Tolerance and its zinc bioaccumulation characteristic of *Sesuvium portulacastrum* to zinc[J]. *Wetland Science*, 2016, 14(4):561-567.
- [24] 张丽, 彭重华, 王莹雪, 等. 14种植物对土壤重金属的分布、富集及转运特性[J]. 草业科学, 2014, 31(5):833-838.
- ZHANG Li, PENG Zhong-hua, WANG Ying-xue, et al. Heavy metal distribution, bioaccumulation and translocation characteristics of fourteen plants[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(5):833-838.
- [25] 黄震, 黄占斌, 孙朋成, 等. 环境材料对作物吸收重金属 Pb、Cd 及土壤特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10):2490-2499.
- HUANG Zhen, HUANG Zhan-bin, SUN Peng-cheng, et al. A study of environmental materials on lead and cadmium absorption by crops and soil characteristics[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(10):2490-2499.
- [26] 陈柯罕, 张科, 李取生, 等. 四种盐生植物对 Cd Pb 复合污染提取修复效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):458-465.

- CHEN Ke-han, ZHANG Ke, LI Qu-sheng, et al. Remediation effects of four halophytes on Cd and Pb compound pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):458-465.
- [27] 蔡秋玲, 林大松, 王 果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1028-1033.
- CAI Qiu-ling, LIN Da-song, WANG Guo, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1028-1033.
- [28] Zu Y Q, Li Y, Chritian S, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China[J]. *Environment International*, 2004, 30(4):567-576.
- [29] 潘义宏, 王宏镔, 谷兆萍, 等. 大型水生植物对重金属的富集与转移[J]. 生态学报, 2010, 30(23):6430-6441.
- PAN Yi-hong, WANG Hong-bin, GU Zhao-ping, et al. Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23):6430-6441.
- [30] Liu Y L, Wu J, Tang Y, et al. An investigation of heavy-metal concentration in dominant plant species in a zinc-lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):2020-2026.
- [31] Tang Y T, Qiu R L, Zeng X W, et al. Lead, zinc, cadmium hyperaccumulation and growth stimulation in *Arabis paniculata* Franch[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66(1):126-134.
- [32] 任 珺, 陶 玲, 杨 倩, 等. 芦苇、菖蒲和水葱对水体中 Cd 富集能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1757-1762.
- REN Jun, TAO Ling, YANG Qian, et al. Accumulation ability of Cd in water for phragmites australis, acorus calamus and scirpus tabernaemontani[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1757-1762.
- [33] 杨 艳, 吴宗萍, 张 敏, 等. 头花蓼对重金属 Cd 的吸收特性与累积规律初探[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2094-2099.
- YANG Yan, WU Zong-ping, ZHANG Min, et al. A primary research on polygonum capitatum's absorption property and accumulation rule to heavy metal Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2094-2099.
- [34] 王友保, 燕傲蕾, 张旭情, 等. 吊兰生长对土壤镉形态分布与含量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6):163-167.
- WANG You-bao, YAN Ao-lei, ZHANG Xu-qing, et al. Effect of the growth of chlorophytum comosum on Cd forms and content in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6):163-167.
- [35] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩. 水培条件下四种植物对 Cd、Pb 富集特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2):261-268.
- NIU Zhi-xin, SUN Li-na, SUN Tie-heng. Enrichment characteristics of Cd and Pb by four kinds of plant under hydroponic culture[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2):261-268.
- [36] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1):48-51.
- SU De-chun, HUANG Huan-zhong. The phytoremediation potential of oilseed rape (*B. juncea*) as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(1):48-51.