

DOI: 10.5846/stxb201410051957

余轲, 刘杰, 尚伟伟, 张富珍. 青葙对土壤锰的耐性和富集特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5430-5436.

Yu K, Liu J, Shang W W, Zhang F Z. Tolerance and accumulation characteristics of *Celosia argentea* Linn. growing in Mn-contaminated soil. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5430-5436.

青葙对土壤锰的耐性和富集特征

余 轲, 刘 杰*, 尚伟伟, 张富珍

桂林理工大学, 广西矿冶与环境科学实验中心, 桂林 541004

摘要:通过盆栽试验,研究了青葙(*Celosia argentea* Linn.)对不同浓度(0、50、100、200、300、500 mg/kg)锰(Mn)污染土壤的吸收和积累特性。结果表明,青葙的锰含量、生物富集系数和生物量均随着土壤锰浓度的增加而增加。当土壤锰含量为 300 mg/kg 时,青葙生长良好。在锰浓度 500 mg/kg 时,青葙叶片边缘出现轻微褪绿现象,但是植株的生长未受到抑制,并且叶片生物量显著增加($P < 0.05$)。此时,叶片中锰含量达到最大值 42927 mg/kg,生物富集系数为 69.20。青葙吸收的锰有 95%—97% 被转移到地上部分,表明该植物对锰具有很强转运能力。本研究的结果为利用青葙修复锰污染土壤提供了有力证据。

关键词:锰;超富集植物;青葙;耐性

Tolerance and accumulation characteristics of *Celosia argentea* Linn. growing in Mn-contaminated soil

YU Ke, LIU Jie*, SHANG Weiwei, ZHANG Fuzhen

Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: It is main groundwork and the first step of phytoextraction of its commercial application on a large scale to screen out a series of ideal hyperaccumulators that can effectively remedy contaminated soil by heavy metals, which is also difficult point and front field of contaminated environment phytoremediation. *Celosia argentea* Linn. has been found after a series of field investigations have been conducted at Pingle manganese tailings wastelands, Guangxi Province, southern China (14362 mg/kg in leaf dry matter). *C. argentea*, an annual herb, is almost distributed all over the China as well as Southeast Asia and tropical Africa. A pot experiment was used to study the Mn tolerance and accumulation of *C. argentea* growing in soil spiked with 0, 50, 100, 200, 300, and 500 mg/kg Mn. Results of the experiment showed that plant has remarkable tolerance to Mn. The plant manganese content and biomass increased with increase in Mn concentration in soil, while bioaccumulation coefficient decreased progressively. Under pot-culture conditions, the dry weight of plant could reach as high as 1.048g at soil Mn 500 mg/kg, which is higher than the control group ($P < 0.05$). *C. argentea* could grow quit well in soil spiked with 300 mg/kg Mn. Compared with the control group, leaf biomass increased significantly at 500 mg/kg Mn ($P < 0.05$), although visible symptoms in foliage were observed. At 500 mg/kg Mn in soil, the plant still grew well with the maximum Mn concentrations in the leaves, stems and roots reaching 42927 mg/kg, 13888 mg/kg, 5348 mg/kg, which were larger than the threshold as Mn hyperaccumulator (10000 mg/kg), while the Mn bioaccumulation coefficient reached to a maximum value of 69.20. 95%—97% of the total Mn taken up by *C. argentea* was translocated to aerial parts, indicating a great capacity of the plant transporting Mn from roots to aerial parts. Manganese translocation factors between 5.83 and 8.69 of *C. Argentea* in all samples in this study, which were greater than 1. The distribution patterns of Mn in the

基金项目:国家自然科学基金(41471270);广西自然科学基金杰出青年基金项目(2014GXNSFGA118009);广西自然科学基金重大项目(2013GXNSFEA053002)

收稿日期:2014-10-05; **修订日期:**2015-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liu-j7775@163.com

leaves, stems and roots were followed the order: leaf (70%—83%) > stem (13%—24%) > root (2.8%—6%). Our results suggest that *C. argentea* is a newfound manganese hyperaccumulator, which belongs to the amaranth family, Amaranthaceae. This species has not only a high tolerance to Mn, but also a hyperaccumulation capacity for this element. *C. argentea*, therefore, has great potential for phytoremediation of Mn-contaminated soils.

Key Words: manganese; hyperaccumulation; *Celosia argentea* Linn.; tolerance

锰(Mn)是植物生长发育必需的微量营养元素之一,但环境中过高的 Mn^{2+} 会对植物造成毒害^[1]。并且,锰能够通过食物链进入人体,威胁人类健康^[2]。我国是锰业大国,电解锰的产量、出口量和消费量均居世界第一^[3]。大量的锰生产和消耗增加了土壤锰污染的风险。土壤中的锰在酸性条件下,会以可溶性锰的形态进入土壤溶液,加剧土壤锰对植物的毒害^[4]。我国酸性土壤占全国耕地面积的 21%。因此,在我国,土壤锰污染的治理显得尤其紧迫和必须。如何有效、经济地治理锰污染,减轻锰毒对环境与人类的危害,已成为亟待解决的环境问题。

植物修复技术是修复锰等重金属污染土壤最为有效的方法之一,具有成本低、无二次污染、工程量小和操作简单等优点^[5]。而该技术的实施主要依赖于超富集植物的种植和收获。因此,发掘有应用价值的锰超富集植物是土壤锰污染修复的重要基础性工作。本课题组在对广西大新锰矿区进行野外调研时,发现一种新的锰超富集植物-青葙(*Celosia argentea* Linn.),其能在矿区的高锰环境下大量生长且生物量较大(株高最高可达 170cm 左右),表现出明显的锰超富集特征;其叶片锰含量可高达 14362 mg/kg^[6]。青葙是苋科青葙属一年生草本植物,多生于路边、田边、丘陵或山坡,几遍全国,广泛分布于东南亚和非洲热带地区,具有结籽量多、喜阳耐旱、易于人工种植等特点^[7]。因此,该植物对于锰污染土壤的复垦与植物修复具有重要的研究和应用价值。

本文采用温室土培实验,研究了青葙对不同浓度土壤锰的耐受和积累特征,分析了青葙对土壤锰的富集和耐受规律,为开发和利用青葙修复锰污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试植物与土壤

青葙种子采集于广西平乐锰矿区。供试土壤取自桂林理工大学雁山校区。采回的土壤置阴凉处风干,忌直接阳光暴晒,样品风干处防止酸碱等气体和灰尘的污染。人工去除石子和枯叶等杂物,风干后捣碎过 4mm 尼龙筛备用。取风干土壤样品,用 TRF-2A 型土壤多功能分析仪测试土壤的基本理化性质如下:pH 为 5.4(为弱酸性土壤),总氮为 5.12 mg/kg,有效磷为 7.19 mg/kg,总钾为 41.11 mg/kg,有机质含量为 1.2%,锰含量为 120.34 mg/kg。

1.2 土培实验

准确称量质量为 1 kg 的过筛后土壤,分别加入 0、50、100、200、300、500 mg/kg 的 Mn^{2+} (以 $MnCl_2$ 的形式加入,Mn 处理浓度根据预实验确定),混匀后装入容量为 2L 外壁涂黑的塑料盆中。混合后土壤平衡干湿 2 个周期,做作为锰污染土壤。

挑选颗粒饱满的种子,消毒后播种于沙盘中,置温室中培养。种子萌发后用 1/2 浓度的 Hoagland 营养液施肥,植株长到 6—7 cm 时进行间苗。培养 20 d 后,选择生长一致的青葙幼苗分别移栽入锰污染土壤中,每个处理设 3 个重复,每盆 1 棵幼苗。培养期间,每 5 d 施 1 次 1/2 浓度 Hoagland 营养液(50 ml/盆,含锰 4.62×10^{-4} mg)。根据盆中土壤的干湿程度,浇水(水中未检出 Mn),使土壤含水量保持在田间持水量的 80%左右。植物生长 40 d 后收获。

1.3 锰含量的测定

收获的青葙分成根、茎、叶三部分,用去离子水清洗 3 次。所有植物样品先在 105°C 下杀青 30 min,然后

在 70°C 下 (48h) 烘干至衡重。烘干后的样品用电子天平测定生物量 (干重), 然后用不锈钢粉碎机粉碎, 过 20 目尼龙筛, 供分析测定用。植物样品 (约 0.2g) 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (9:1) 湿式消解法处理, 然后用原子吸收光谱仪 (PE-AA700) 测定 Mn 含量。分析过程中所用试剂均为优级纯, 采用国家标准参比物质 (GBW10015 (GSB-6)) 进行分析质量控制。

1.4 数据处理

实验数据采用 SPSS (v18.0) 进行方差分析 (ANOVA) 和 LSD 检验, 用 Origin (8.0) 作图。锰的富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF) 的计算公式如下:

$$\text{富集系数 (BCF)} = \frac{\text{植物地上部锰含量}}{\text{土壤锰含量}}$$

$$\text{转运系数 (TF)} = \frac{\text{植物地上部锰含量}}{\text{植物根部锰含量}}$$

2 结果与分析

2.1 不同浓度锰胁迫对青葙生长的影响

在整个培养过程中, 青葙生长旺盛。在 50、100、200、300 mg/kg 锰处理组, 青葙生长良好, 其地上部未表现出中毒症状。在 500 mg/kg 锰处理组, 青葙叶片边缘出现轻微的褪绿现象, 但在青葙的整个实验周期没有出现叶子脱落现象, 并不断长出新叶。图 1 为收获时的青葙, 观察可以看出, 在 300 和 500 mg/kg 锰处理组的青葙叶片数和植株大小较其他组明显增加。可见, 一定浓度的土壤锰可促进青葙的叶片生长。

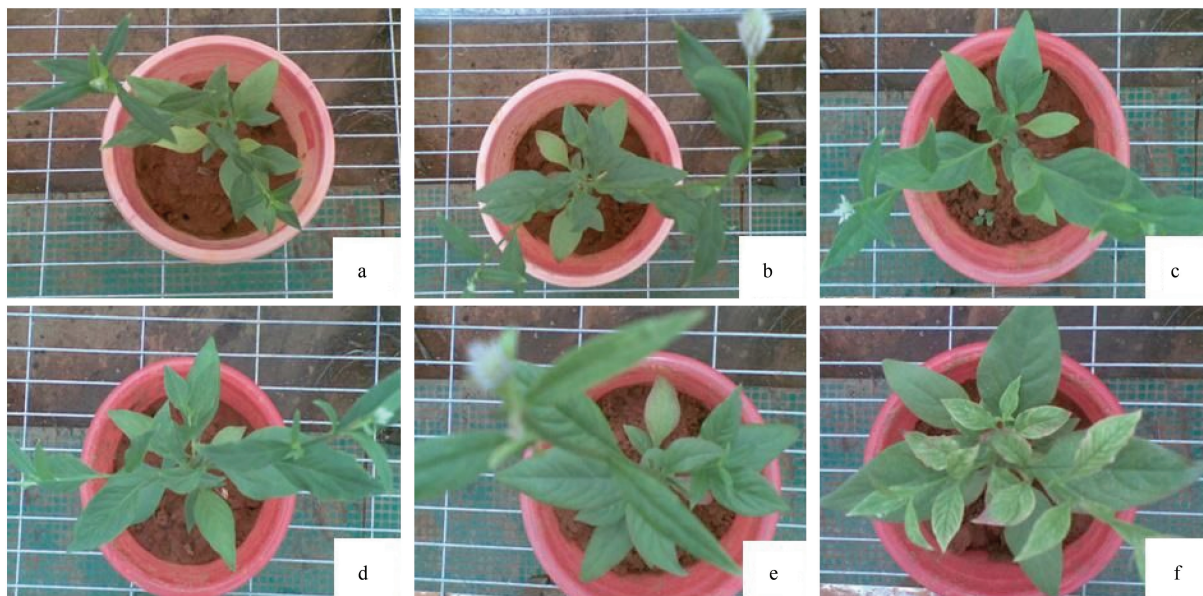


图 1 不同浓度锰胁迫对青葙生长的影响

Fig.1 Effects of Mn stress on *C. argentea* growth

a、b、c、d、e、f 分别是对照、50、100、200、300、500 mg/kg 锰处理组

由图 2 可知, 在对照组和 50、100、200、300、500 mg/kg 锰处理组中, 青葙的根和茎干重没有显著差异。在 50、100、200、300 mg/kg 锰处理组, 青葙的叶与地上部干重与对照相比差异不明显。在锰浓度为 500 mg/kg 时, 叶与地上部的干重达到最大, 与对照相比分别增加了 62.9% 和 28.2%, 并且显著高于对照和 50、100、300 mg/kg 锰处理组 ($P < 0.05$)。可见在一定的浓度范围内锰的加入, 不但不会抑制青葙的生长, 反而刺激青葙生长, 促进其地上部生物量的生产。

2.2 青苜对锰的富集

随着锰处理浓度的增加,青苜根、茎、叶中锰含量增加(图3)。在50、100、200、300、500 mg/kg 锰处理组,青苜叶锰含量均显著高于对照($P<0.05$)。在50、100、200 mg/kg 锰处理组,青苜茎锰含量与对照相比呈显著差异($P<0.05$)。在锰处理浓度为300、500 mg/kg 时,青苜茎锰含量与其他处理组差异明显($P<0.05$)。当锰处理浓度为500 mg/kg 时,叶片中锰含量达到最大为42927 mg/kg,茎、根锰含量同时也达到最大值,分别为13888 mg/kg 和5348 mg/kg;各部分显著高于对照($P<0.05$)。青苜叶锰含量是茎锰含量的2.6—3.8倍,地上部锰含量是根锰含量的7.47—10.62倍。

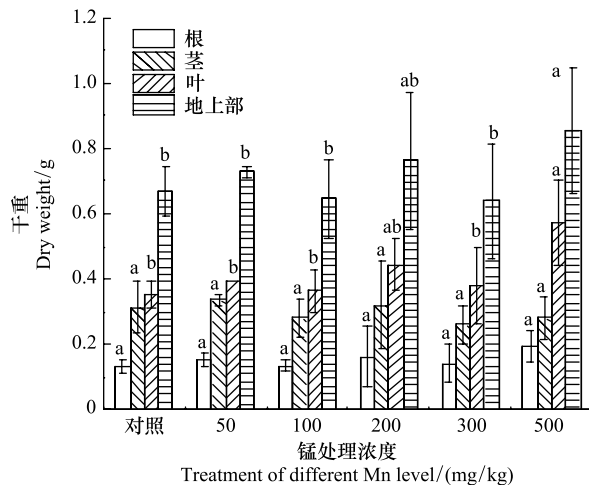


图2 青苜在不同浓度锰处理下的生物量

Fig.2 Biomass of *C. argentea* growing in Mn-spiked soils

1) 平均值±标准差, $n=3$; Means±SE, $n=3$; 2) 不同字母表示同一植物组织在不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)

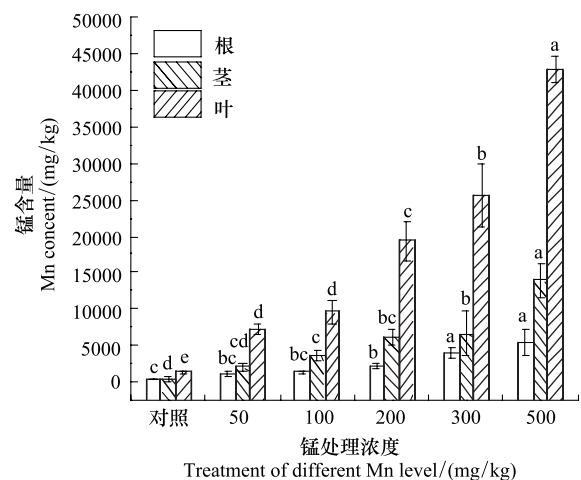


图3 不同浓度锰处理下青苜根、茎、叶锰含量

Fig.3 Effects of Mn treatment on the Mn concentrations in roots, stems and leaves of *C. Argentea*

1) 平均值±标准差, $n=3$; Means±SE, $n=3$; 2) 不同字母表示同一植物组织在不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)

由图4可知,当锰处理浓度为50 mg/kg 时,青苜的富集系数为11.55;随着锰处理浓度的升高,生物富集系数呈增加趋势;各处理组与对照相比呈现出显著差异($P<0.05$)。当锰浓度为500 mg/kg 时,青苜富集系数达到最大69.20。青苜的对锰的转运系数在5.83—8.69之间,表现出很强的锰转运能力。在锰浓度为200 mg/kg 时,植物的锰转运系数最大,高达8.69。

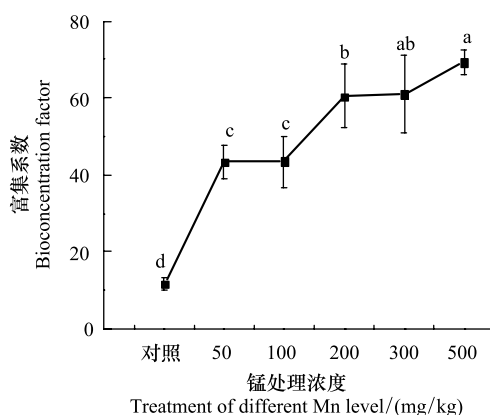
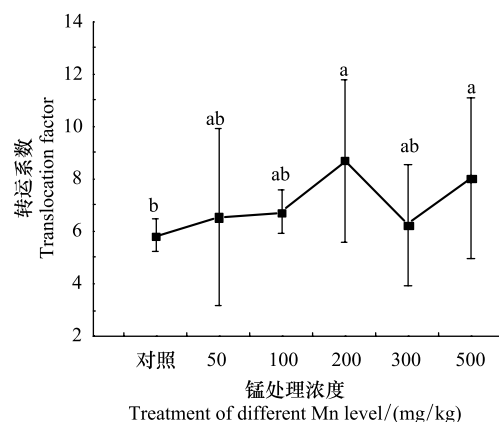


图4 青苜对锰的富集系数和转运系数

Fig.4 BCF and TF of Mn in *C. Argentea*

1) 平均值±标准差, $n=3$; Means±SE, $n=3$; 2) 不同小写字母表示在 $P<0.05$ 的水平上存在显著差异



2.3 锰在青苜体内的分布

图 5 可以看出,青苜各部分对锰的积累量随着锰浓度的增加而增加。在土壤锰浓度为 500 mg/kg 时,青苜各部位对锰的积累量达到最大,根、茎、叶和地上部锰的积累量分别为 1.06、3.88、24.60、28.48 mg/株;与对照相比差异显著($P<0.05$)。锰在青苜根、茎、叶中的分布次序为,叶(70%—83%)>茎(13%—24%)>根(2.8%—6%)。锰在青苜地上部分积累量是根积累量的 20—26.8倍,这表明青苜对根系吸收的锰有很强的向地上部分运输的能力,这有利于通过收割青苜地上部分来降低污染土壤中锰的含量。

2.4 青苜与其他锰超富集植物的比较

如表 1 所示,目前世界上已报道的锰超富集植物约有 23 种,分别隶属五加科(1 种)、夹竹桃科(1 种)、卫矛科(3 种)、膝黄科(1 种)、桃金娘科(7 种)、商陆科(1 种)、蓼科(4 种)、山龙眼科(3 种)、毛茛科(1 种)和山茶科(1 种)等10科的13个属^[8-9]。其中,中国境内发

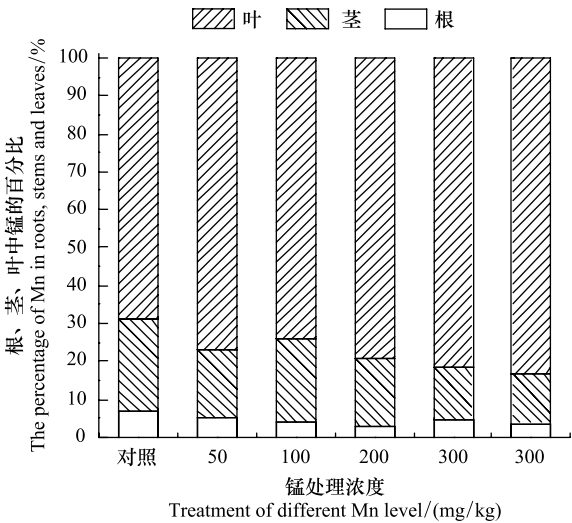


图 5 不同浓度锰处理下青苜体内锰的分布特征
Fig.5 Mn distribution in different tissues of *C. argentea* growing in Mn-spiked soils

表 1 目前报道的锰超富集植物种类及最大锰含量^[8-9]
Table 1 Species and maximum concentration of manganese hyperaccumulators^[8-9]

科 Family	植物种类 Species	最大锰含量/(mg/kg) Maximun concentration
五加科 <i>Araliaceae</i>	<i>Chengiopanax sciadophylloides</i>	23500
夹竹桃科 <i>Apocynaceae</i>	<i>Alyxia rubricaulis</i>	14000
卫矛科 <i>Celastraceae</i>	<i>Maytenus bureaviana</i>	33750
	<i>M.sebertiana</i>	22500
	<i>M.pancheriana</i>	16370
	<i>Garcinia amplexicaulis</i>	10500
膝黄科 <i>Clusiaceae</i>	<i>Austromyrtus bidwillii</i>	19200
桃金娘科 <i>Myrtaceae</i>	<i>Eugenia</i> sp.	13700
	<i>Eugenia clusioides</i>	10880
	<i>Gossia bamagensis</i>	21480
	<i>Gossia fragrantissima</i>	11200
	<i>G. sankowsiorum</i>	11150
	<i>G. gonoclada</i>	12300
	<i>Phytolacca americana</i>	19300
商陆科 <i>Phytolaceae</i>	<i>Polygonum hydropiper</i> L	24450
蓼科 <i>Polygonaceae</i>	<i>P.pubescens</i> Blume	15200
	<i>P.perfoliatum</i> L	19940
	<i>Polygonum pubescens</i>	16650
	<i>Macadamia angustifolia</i>	11590
山龙眼科 <i>Proteaceae</i>	<i>Beaupreopsis paniculata</i>	12000
	<i>M.neurophylla</i>	55200
	<i>Ranunculus aquatilis</i>	13680
毛茛科 <i>Ranunculaceae</i>	<i>Schima superba</i>	9976
山茶科 <i>Theaceae</i>		

现的锰超富集植物有水蓼 (*Polygonum hydropiper* L.)^[10]、垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.)^[11]、木荷 (*Schima superba*)^[12]、短毛蓼 (*Polygonum pubescens* Bl.)^[13] 和杠板归 (*Polygonum perfoliatum* L.)^[14] 等 5 种。青葙是苋科青葙属植物,与目前国内外已发现的锰超富集植物不存在种属关系。因此,青葙的发现,拓展了锰超富集植物的种类,为利用超富集植物修复锰污染土壤提供了新的种质资源。在自然条件下,青葙叶片中的锰含量最高可达 14362 mg/kg 干重^[6]。这与已发现的大多数锰超富集植物体内最高锰含量相当。但由于发现超富集植物的土壤条件不同,无法有效地比较青葙与其他超富集植物的 Mn 富集能力。

3 讨论

一般认为,锰超富集植物必需具备两个基本特征:一是植物地上部分的锰含量超过参考值 10000 mg/kg;二是转运系数必需大于 1^[15-16]。在土壤锰处理浓度为 200、300、500 mg/kg 时,青葙叶锰含量分别为 19361、25364、42927 mg/kg,明显高于 10,000 mg/kg 的参考值。同时,青葙的转运系数在 5.83—8.69 之间,均大于 1。因此,青葙符合典型的锰超富集植物特征。这进一步验证了此前野外调查和水培实验的结果^[6]。由于不同研究在培养基质、培养时间、处理浓度等实验条件上存在较大差异,很难将青葙与已报道超富集植物进行有效比较。例如,Yang 等^[12]报道,木荷叶片中 Mn 最高含量达到 62412 mg/kg,高于本实验中青葙叶片中的 Mn 含量(42927 mg/kg)。但是该研究是在石英砂培养,实验周期为 90d,锰处理浓度为 150 mmol/L 的条件下进行的,与本研究的实验条件有较大差异。

锰是植物生长过程中所必需的微量营养元素之一,但过高的土壤锰可抑制植物正常生长,降低植物的生物量。例如:薛生国等^[17]的研究发现,在锰处理浓度为 12 mmol/L 时,商陆地上部分生物量较对照(0.005 mmol/L)减少了约 82%。然而,在本研究中发现,青葙生物量随土壤锰含量的增加而增加(图 2)。在土壤锰处理浓度最高时(500 mg/kg),青葙地上部分的生物量达到最大,与对照组相比增加了 31.1%。这表明 Mn 对青葙可能存在 hormesis 效应^[18]。青葙在锰胁迫下,启动其体内抗性机制,表现出一定的补偿过程。当这个补偿行为超过胁迫的抑制作用时,会出现净刺激效应。一般植物体内 Mn 的正常含量在 1—2262 mg/kg 之间,超出这个范围就会影响植物的正常生长^[19-20]。然而,青葙在植物体内 Mn 含量高达 42927 mg/kg 时,仍表现出生物量的刺激效应。可能的原因是青葙作为一种锰超富集植物,锰的耐受能力显著高于普通植物,因而出现 hormesis 效应的阈值较高。这一现象对于土壤锰的植物修复有重要的意义。在相同锰富集能力下,生物量的增加就意味着修复效率的增加。

除了具备极强锰富集和耐受能力外,青葙还具备生长迅速、易于繁殖等特性;并且能将体内富集的锰大部分(95%—97%)转运到地上部分,非常利于通过收割去除土壤中的锰。因此,该植物在土壤锰植物修复中表现出较强的应用潜力。此外,青葙的同属植物鸡冠花作为观赏花卉,很早就被人工栽培。鸡冠花与青葙杂交培育出很多人工栽培的变种。这些人工栽培的变种与野生青葙亲缘关系的远近可能会造成了锰富集性状的差异。例如,向言词等^[21]的研究发现,一个青葙的人工栽培变种(青葙与鸡冠花的杂交后代)也存在锰超富集特征,而同属近缘种鸡冠花不具备锰超富集特征。这些锰富集性状不同的青葙属植物为植物锰超富集机理和遗传学基础研究提供了很好的资源群体。

4 结论

本研究证明青葙是一种锰的超富集植物,其能够在 500 mg/kg 锰处理浓度中正常生长,且与对照相比生物量明显增加,叶片锰含量最高达 42927 mg/kg。这表明青葙不但有非常强的锰耐性,同时也具有极强的锰富集能力。青葙是一年生草本,分布广泛,易于存活,生长迅速,结籽量大。因此,该植物为锰污染土壤的植物修复和植物锰富集和耐受机制的研究提供了重要的种质资源。

参考文献(References):

- [1] Cao G, Liang M Z. Manganese-trace element necessary for plants at the balance growth system. Soil Fert, 2004, 1: 23-23.

- [2] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 林单, 张红梅. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展. 植物学报, 2010, 45(4): 506-520.
- [3] 李旭华, 方刚, 党春阁, 于秀玲. 电解锰行业污染防治最佳可行技术评估及污染减排潜力. 中国工程科学, 2013, (3): 56-61.
- [4] 许丹丹, 李金城, 阙光龙, 吴蕾, 陈小玲. 酸性土壤锰毒及其防治方法. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 472-475.
- [5] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展. 土壤通报, 2004, 35(3): 366-370.
- [6] Liu J, Shang W W, Zhang X H, Zhu Y N, Yu K. Mn accumulation and tolerance in *Celosia argentea* Linn.: A new Mn-hyperaccumulating plant species. Journal of Hazardous Materials, 2014, 267: 136-141.
- [7] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物图鉴: 第1册. 北京: 科学出版社, 2001: 603-603.
- [8] Fernando D R, Marshall A, Baker A J M, Mizuno T. Microbeam methodologies as powerful tools in manganese hyperaccumulation research: present status and future directions. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 319-319.
- [9] 刘恒, 薛生国, 何哲祥, 刘丰豪, 雷杰, 周喜艳. 锰超富集植物种质资源及耐性机制研究进展. 环境科学与技术, 2011, 34(6): 98-103.
- [10] 王华, 唐树梅, 廖香俊, 曹启民, 杨安富, 王汀忠. 锰超积累植物——水蓼. 生态环境, 2007, 16(3): 830-834.
- [11] 薛生国, 叶晟, 周菲, 田守祥, 王钧, 徐圣友, 陈英旭. 锰超富集植物垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.) 的认定. 生态学报, 2008, 28(12): 6344-6347.
- [12] Yang S X, Deng H, Li M S. Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima superba*. Plant, Soil and Environment, 2008, 54(10): 441-446.
- [13] 邓华, 李明顺, 陈英旭. 超富集植物短毛蓼对锰的富集特征. 生态学报, 2009, 29(10): 5450-5454.
- [14] Liu P, Tang X M, Gong C F, Xu G D. Manganese tolerance and accumulation in six Mn hyperaccumulators or accumulators. Plant and Soil, 2010, 335(1/2): 385-395.
- [15] Brooks R R. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: Their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining. New York: CAB international, 1998: 392-392.
- [16] Reeves R D, Baker A J M. Metal-accumulating plants// Raskin I, Ensley B D, eds. Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000: 193-229.
- [17] 薛生国, 陈英旭, 骆永明, Reeves R D, 林琦. 商陆 (*Phytolacca acinosa* Roxb.) 的锰耐性和超积累. 土壤学报, 2004, 41(6): 889-895.
- [18] Norwood W P, Borgmann U, Dixon D G. Chronic toxicity of arsenic, cobalt, chromium and manganese to *Hyaella azteca* in relation to exposure and bioaccumulation. Environmental Pollution, 2007, 147(1): 262-272.
- [19] Paschke M W, Valdecantos A, Redente E F. Manganese toxicity thresholds for restoration grass species. Environmental Pollution, 2005, 135(2): 313-322.
- [20] 王敬国. 植物营养的土壤化学. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.
- [21] 向言词, 冯涛, 刘炳荣, 彭秀花. 污泥改良锰矿尾渣对 4 种花卉植物生长及其富集重金属的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 244-250.