

关海燕, 屈琦琦, 赵 凡, 等. ‘夏日赞歌’景天(*Sedum spurium* ‘Summer Glory’)对铅的耐性和富集特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 290–296.

GUAN Hai-yan, QU Qi-qi, ZHAO Fan, et al. Lead tolerance and accumulation characteristics of the ‘Summer Glory’ *Sedum spurium*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 290–296.

‘夏日赞歌’景天(*Sedum spurium* ‘Summer Glory’) 对铅的耐性和富集特征研究

关海燕¹, 屈琦琦¹, 赵 凡¹, 王若鹏¹, 阎尚博², 董 丽^{1*}

(1. 花卉种质资源创新与分子育种北京市重点实验室, 国家花卉工程技术研究中心, 城乡生态环境北京实验室, 北京林业大学园林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院, 北京 100091)

摘 要:为探究‘夏日赞歌’景天(*Sedum spurium* ‘Summer Glory’)对铅(Pb)的耐受及富集能力,利用盆栽试验研究了不同Pb浓度0(CK)、250、500、1000、2000、4000、8000 mg·kg⁻¹对‘夏日赞歌’景天的生长和生理特性的影响。结果表明,Pb处理浓度为0~4000 mg·kg⁻¹时,随Pb处理浓度的增加,‘夏日赞歌’景天地上部和根部生物量、丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性呈上升趋势,植物络合素(PCs)含量呈先增后减趋势,且各处理PCs含量均大于CK。当处理浓度为8000 mg·kg⁻¹时,MDA含量显著增加,地上部和根部生物量和SOD活性显著降低。‘夏日赞歌’景天地上部或根部Pb含量与土壤Pb含量均呈显著正相关,且根部Pb含量远大于地上部,根部Pb含量最大为604.13 mg·kg⁻¹。综上所述,‘夏日赞歌’景天对Pb胁迫有较强的耐受和富集能力,可作为Pb污染土壤修复和绿化的候选物种。

关键词:Pb胁迫;‘夏日赞歌’景天;耐性;富集特性

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)02-0290-07 doi:10.11654/jaes.2018-0457

Lead tolerance and accumulation characteristics of the ‘Summer Glory’ *Sedum spurium*

GUAN Hai-yan¹, QU Qi-qi¹, ZHAO Fan¹, WANG Ruo-peng¹, YAN Shang-bo², DONG Li^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation & Molecular Breeding, National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The goal of this study was to examine the growth and physiological characteristics of ‘Summer Glory’, *Sedum spurium*, under lead(Pb) stress 0(CK), 250, 500, 1000, 2000, 4000 mg·kg⁻¹, and 8000 mg·kg⁻¹ to evaluate its capacity for Pb tolerance and accumulation. When the Pb concentration of the soil increased from 0 to 8000 mg·kg⁻¹, the malondialdehyde(MDA) concentration continued to increase up to 60.39% higher than that of the control for the highest level of treatment(8000 mg·kg⁻¹). The dry weight in the shoots and roots, superoxide dismutase(SOD) activities, and phytochelators(PCs) concentration increased to the highest level at 4000 mg·kg⁻¹ and 1000 mg·kg⁻¹ concentrations, respectively, and were followed by a continuous decrease when the concentration increased. When compared to the control after 90 days of treatment, the dry weight in the shoots and roots, SOD activities and PCs concentration at the highest treatment level(8000 mg·kg⁻¹) decreased by 33.13%, 55.88%, 4.59%, and 16.62%, respectively. The Pb concentration in the shoots and roots were significantly and positively correlated with the Pb concentration of the soil, while the translocation factor and bioconcentration factor were negatively correlated with the Pb concentration of the soil. In addition, the Pb concentration in the roots had the highest level at 604.13 mg·kg⁻¹ and was much greater than that in the shoots. These results demonstrate that ‘Summer Glory’ has a strong tolerance and accumulation ability of Pb and can be considered as a candidate species for the phytoremediation and greening of Pb contaminated soil.

Keywords: lead stress; *Sedum spurium* ‘Summer Glory’; tolerance characteristics; accumulation characteristics

收稿日期:2018-04-08 录用日期:2018-06-27

作者简介:关海燕(1994—),女,山西运城人,硕士研究生,从事土壤污染修复与观赏植物生理研究。E-mail:guanhhyy@163.com

*通信作者:董 丽 E-mail:dongli@bjfu.edu.cn

基金项目:国家林业局高抗性优良宿根花卉繁育及应用示范推广项目(2016[31]);北京市共建项目专项

Project supported: Breeding and Application of Perennial Flowers with High Resistance(2016[31]); Special Fund for Beijing Common Construction Project

由于矿山开采、工业冶炼及含Pb涂料、纸张、汽油、炸药等的生产和使用,导致Pb作为最常见的毒害性重金属元素进入土壤中,这不仅影响植物生长,而且会通过食物链影响人类健康^[1-2]。植物修复技术可利用植物提取、吸收、分解、转化和固定土壤中有毒有害污染物,相比物理化学途径,其花费少、实施容易,且不产生二次污染,能应用于大规模污染土壤的修复^[3]。植物修复技术的成效主要依赖于超富集植物,但Pb具有较高的负电性,易与土壤中的有机质和铁锰氧化物等形成共价键,不易被植物吸收^[4-5],因此,目前已报道的Pb超富集植物并不多。国外已发现的Pb超富集植物有16种,主要分布在禾本科(poaceae)、十字花科(cruciferae)、石竹科(caryophyllaceae)和蓼科(polygonaceae)^[6],国内发现的Pb超积累植物只有圆锥南芥(*Arabis Paniculata*)^[7]、羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*)^[8]、小鳞苔草(*Carex gentiles*)^[9]、金丝草(*Pogonatherum crinitum*)和柳叶箬(*Isache globosa*)^[10]等,且普遍存在生物量小、生长缓慢等特点,限制了Pb污染土壤的修复规模^[11]。景天属(*Sedum*)作为景天科的一个重要类群,全球有470种左右,主要分布在北半球^[12]。该属植物普遍具有适应性广、抗性强、耐瘠薄、易繁殖、观赏性好等特性,同时又具有草本易于收割、多年生可重复利用等特性。此外,毕德等^[13]对浙江典型铅锌矿废弃地的优势植物调查结果显示,重金属含量超过植物正常值10倍以上的优势植物共有20种,其中60.5%分布在景天科景天属,目前也已发现锌和镉超积累植物东南景天^[14-15],表明景天属植物在重金属污染环境修复方面具有巨大的应用潜力。‘夏日赞歌’景天(*S. spurium* ‘Summer Glory’),隶属景天科景天属,为国外引进品种,十分适宜北方气候,对土壤要求不严。茎匍匐状生长,枝叶繁密,可迅速覆盖和绿化裸露地面,且观赏期长达10个月,可观秋色叶。目前国内外对其在重金属污染土壤中的研究还未有报道。为此,选择‘夏日赞歌’景天为试验材料,研究其在不同浓度Pb处理下的生长特征、生理变化和富集特性,初步探究‘夏日赞歌’景天对Pb的耐受和富集机制,为Pb污染土壤的修复和绿化提供备选物种。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为‘夏日赞歌’景天,盆栽基质为园土:草炭:蛭石=1:1:1,基础肥力状况:pH 6.18,有机质41.6 g·kg⁻¹,全氮2.37 g·kg⁻¹,速效磷3.11 mg·kg⁻¹,速

效钾64.53 mg·kg⁻¹,全Pb 27.3 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于2017年4—11月在北京林业大学三顷园苗圃的实验大棚内进行,4月下旬,选择‘夏日赞歌’景天两年生苗相对一致的健壮枝条进行扦插。8月初向盆栽土壤中施加Pb(NO₃)₂溶液,设置7个Pb浓度:0(CK)、250、500、1000、2000、4000 mg·kg⁻¹和8000 mg·kg⁻¹,每个处理3次重复,每次重复4盆。平衡两周后,选择茎长、叶片数、分蘖数和生物量相对一致的幼苗栽入盆内(直径15 cm,高12 cm),每盆种植3株。根据土壤墒情,浇灌干净自来水,保持土壤田间持水量,Pb处理90 d后收获植物。

1.3 样品处理及指标测定方法

收获的植物样品先用自来水冲洗,洗去附着在植物样品表面的泥土和污物,再用蒸馏水冲洗。其中部分材料液氮保存,用于超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)、谷胱甘肽(GSH)、非蛋白巯基(TNP)和植物络合素(PCs)的测定,部分材料分地上部和根部烘干至恒质量,分别测定干物质量,最后将样品粉碎用于全Pb含量的测定。

SOD活性采用氮蓝四唑光化还原法测定^[16],MDA含量采用硫代巴比妥酸法测定^[16],参考刘衡等^[17]文献,PCs采用差减法测定,即PCs=TNP-GSH,TNP采用分光光度法测定,GSH采用荧光分光光度法测定。植物样品中的Pb含量用电感耦合等离子体发射光谱仪ICP(型号为美国PE optima)测定。

耐性指数(TI)=处理组最长根延长量、地上部长度或生物量/对照组最长根延长量、地上部长度或生物量^[18]

富集系数(BCF)=地上部或根部Pb含量(mg·kg⁻¹)/土壤中Pb含量(mg·kg⁻¹)

转移系数(TF)=地上部Pb含量(mg·kg⁻¹)/根部Pb含量(mg·kg⁻¹)

1.4 数据处理与分析

试验数据采用Excel和SPSS进行处理和统计分析。运用单因素方差分析(ANOVA)和最小差异显著法(LSD)进行差异性检验($P<0.05$),结果以平均值±标准差表示,相关性分析采用Pearson法。

2 结果与分析

2.1 Pb处理对‘夏日赞歌’景天生长的影响

如表1所示,随Pb处理浓度增大,‘夏日赞歌’景天地上部干质量、根部干质量、分蘖数和茎长呈先增

后减趋势,根长呈递减趋势。在0~4000 mg·kg⁻¹范围内,茎长与CK相比无显著差异($P>0.05$),基本维持在14 cm左右,但因Pb胁迫显著增加了植株分蘖数,使植株地上部干质量显著增加($P<0.05$),尤其当处理浓度为4000 mg·kg⁻¹时,地上部干质量达到1.82 g·株⁻¹,为对照的2.8倍。而该范围的Pb处理却显著抑制了根系的伸长,茎节生根和侧根数增多使根部干质量呈增加趋势。当Pb浓度为8000 mg·kg⁻¹时,地上部干质量和分蘖数与CK相比无显著差异($P>0.05$),茎长、根长和根部干质量受到了显著抑制($P<0.05$)。结果表明,‘夏日赞歌’景天可耐受4000 mg·kg⁻¹的Pb胁迫。

一般耐性指数大于0.5时,被认为植物对该重金属有较强耐受性,生长得较好,反之,说明植物基本难以或者不能在这种浓度的重金属环境生存^[19],因此本研究用各生长指标耐性指数评价‘夏日赞歌’景天对Pb胁迫的耐受性。由表2可知,在处理浓度为0~4000 mg·kg⁻¹时,茎长、根长、地上部和根部生物量的耐性指数皆大于0.5,表明‘夏日赞歌’景天能在0~4000 mg·kg⁻¹ Pb污染环境中生长良好。但胁迫水平为8000 mg·kg⁻¹时,其根部生物量和根长耐性指数已经降至0.45和0.43,表明植株生长开始受到抑制,根系对Pb相对比较敏感。

2.2 Pb处理对植株丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和植物络合素(PCs)的影响

由图1可见,‘夏日赞歌’景天的MDA含量与Pb浓度呈正相关。250~2000 mg·kg⁻¹ Pb处理下的MDA含量与CK相比无显著差异($P>0.05$),4000 mg·kg⁻¹与8000 mg·kg⁻¹ Pb处理下的MDA含量达到10.04 μmol·g⁻¹和12.35 μmol·g⁻¹,比CK分别增加了30.39%和60.39%,表明0~2000 mg·kg⁻¹的Pb胁迫对该景天膜结构破坏不明显,4000~8000 mg·kg⁻¹ Pb胁迫显著破坏了其膜结构。SOD活性随Pb处理浓度的增加呈先升后降趋势,250~4000 mg·kg⁻¹ Pb处理下的SOD活性显著高于CK,当处理浓度达8000 mg·kg⁻¹时,SOD活性比CK降低了5.10%。

由图2可见,随Pb处理浓度的增加,‘夏日赞歌’景天的TNP、GSH、PCs含量均呈现先升后降趋势。其中GSH变化幅度较小,主要是PCs的变化引起TNP发生相似的变化趋势,各处理的PCs含量分别达到TNP总量的64.84%、64.71%、63.62%、66.41%、71.19%、75.70%和60.14%。0~4000 mg·kg⁻¹ Pb处理下的PCs含量显著高于CK,尤其当Pb处理浓度为1000、2000 mg·kg⁻¹和4000 mg·kg⁻¹时,PCs含量达到95.48、84.38、83.38 μmol·g⁻¹,比CK增加了95.94%、73.16%

表1 Pb胁迫对‘夏日赞歌’景天生物量、茎长、根长、分蘖数的影响

Table 1 Effects of Pb stress on the biomass, stem length, root length and tiller number of *S. spurium* ‘Summer Glory’

Pb处理/mg·kg ⁻¹	地上部干质量/g·株 ⁻¹	根部干质量/g·株 ⁻¹	茎长/cm	根长/cm	分蘖数/个
CK	0.65±0.04cd	0.20±0.04d	14.50±0.50ab	19.47±0.50a	11.00±1.73c
250	0.90±0.06c	0.21±0.02cd	14.57±0.81ab	16.33±1.04b	13.67±0.58b
500	1.37±0.27b	0.24±0.05bcd	14.90±0.36ab	15.00±0.50bc	14.33±1.15b
1000	1.58±0.17ab	0.26±0.02ab	15.07±1.62a	14.90±0.36bc	15.00±1.00b
2000	1.61±0.05ab	0.28±0.03ab	14.17±0.96ab	14.33±0.87c	15.66±2.08ab
4000	1.82±0.30a	0.33±0.04a	13.17±1.04b	11.50±1.32d	17.67±1.15a
8000	0.43±0.09d	0.09±0.01e	9.03±0.61c	8.27±0.45e	13.33±1.53bc

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ levels. The same below.

表2 Pb胁迫对‘夏日赞歌’景天耐性指数的影响

Table 2 Effects of Pb stress on the tolerance index of *S. spurium* ‘Summer Glory’

Pb处理/mg·kg ⁻¹	地上生物量耐性指数	根部生物量耐性指数	茎长耐性指数	根长耐性指数
250	1.38±0.10c	1.06±0.10c	1.01±0.06a	0.84±0.05a
500	2.12±0.41b	1.18±0.24bc	1.03±0.03a	0.77±0.03ab
1000	2.43±0.26ab	1.30±0.11bc	1.04±0.11a	0.76±0.02ab
2000	2.48±0.08ab	1.39±0.15ab	0.98±0.07a	0.73±0.05b
4000	2.80±0.46a	1.63±0.22a	0.91±0.07a	0.59±0.07c
8000	0.67±0.13d	0.45±0.04d	0.62±0.04b	0.43±0.03d

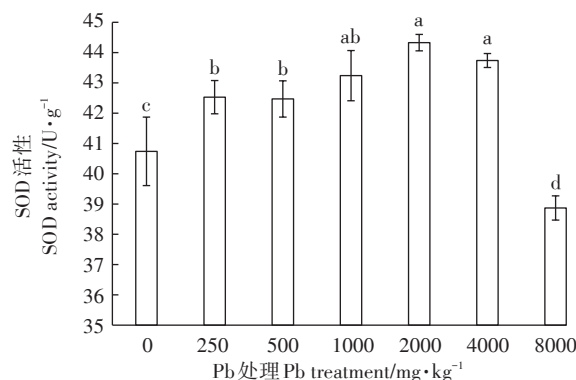
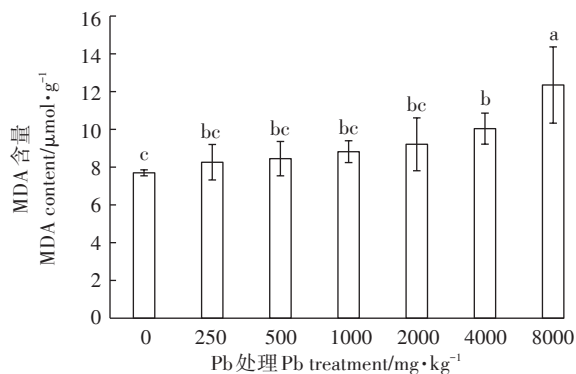


图1 Pb胁迫对‘夏日赞歌’景天MDA含量和SOD活性的影响

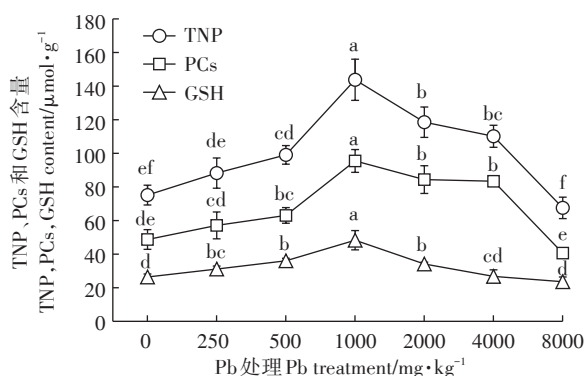
Figure 1 Effects of Pb stress on MDA contents and SOD activity of *S. spurium* ‘Summer Glory’

图2 Pb胁迫对‘夏日赞歌’景天叶片植物PCs含量的影响

Figure 2 Effects of Pb stress on PCs contents of *S. spurium* ‘Summer Glory’

表3 Pb胁迫对‘夏日赞歌’景天转移系数和富集系数的影响

Table 3 Effects of Pb stress on translocation factor and bioconcentration factor of *S. spurium* ‘Summer Glory’

Pb处理/mg·kg ⁻¹	转移系数	富集系数
CK	0.50±0.04a	0.57±0.05a
250	0.39±0.02b	0.19±0.02b
500	0.28±0.01c	0.15±0.02bc
1000	0.23±0.04d	0.13±0.01cd
2000	0.19±0.01e	0.13±0.01cd
4000	0.19±0.02e	0.12±0.01cd
8000	0.11±0.01f	0.09±0.01d

和71.11%, 8000 mg·kg⁻¹ Pb处理下的PCs含量比CK降低16.62%,但差异不显著。

2.3 ‘夏日赞歌’景天对Pb的富集和转移能力

富集系数是植株中Pb含量与土壤中Pb含量之比,能指示植株富集Pb的能力大小。转移系数指植株地上部与根部Pb含量之比,反映植物根部向地上部运输Pb的能力。由表3可得,‘夏日赞歌’景天的转移系数和富集系数与Pb的处理浓度显著负相关,且250~8000 mg·kg⁻¹ Pb处理下的转移系数大于富集系数。由图3可看出,‘夏日赞歌’景天地上部和根部的Pb含量随处理浓度的增加均呈递增趋势,并表现为根部Pb含量远大于地上部。250 mg·kg⁻¹ Pb处理下,地上部Pb含量与CK无显著差异,其余处理均显著升高($P<0.05$)。尤其在4000 mg·kg⁻¹ Pb处理下,植株地上部Pb含量达到峰值71.07 mg·kg⁻¹,为CK的13.88倍,同时也发现8000 mg·kg⁻¹ Pb处理下的地上部Pb含量并没有持续增加,却略有下降,但与4000

mg·kg⁻¹ Pb处理无显著差异,表明‘夏日赞歌’景天地上部已达最大吸收量。通过相关性分析得出,根部Pb含量与Pb处理浓度正相关系数达0.99,在8000 mg·kg⁻¹ Pb处理浓度时,根部Pb含量达到624.13 mg·kg⁻¹,为CK的60.24倍。表明随外界处理浓度的升高,根部持续富集Pb²⁺,而达到8000 mg·kg⁻¹时,不再向地上转移以减少对地上部造成的伤害。

3 讨论

Pb具有较高的负电性,易与Fe、Al、Mn氧化物、有机质和碳酸盐形成共价键,所以植物难以吸收土壤中的Pb,含量一般仅为10 mg·kg⁻¹ DW^[20]。本试验发现,‘夏日赞歌’景天地上部和根部Pb含量与土壤Pb含量显著正相关,根部Pb含量远大于地上部。在8000 mg·kg⁻¹ Pb处理时,地上部和根部Pb含量达到CK的13.29倍和60.24倍,比普通植物富集Pb能力强,且吸收的Pb多积累在根部,只有少部分转移到地上部。这与Pb胁迫下雷竹(*Phyllostachys praecox*)^[21]、侧柏(*Platycladus orientalis*)^[22]和蜀葵(*Althaea rosea*)^[23]

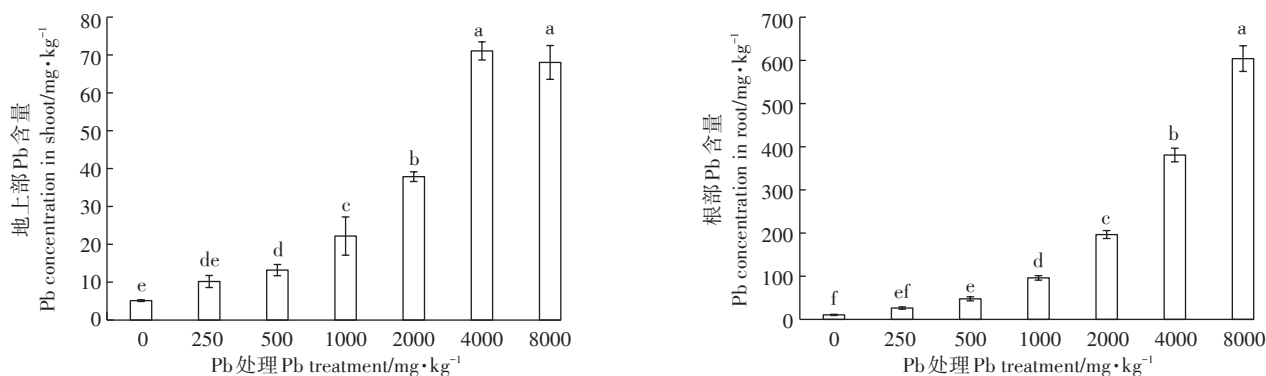


图3 Pb胁迫下‘夏日赞歌’地上部和根部的Pb含量

Figure 3 The Pb content in shoot and root of *S. spurium* ‘Summer Glory’ under the treatment of Pb

的实验结果一致。

Hall^[24]和Tauqeer等^[25]指出,植株面对重金属胁迫时,将吸收的重金属离子积累在根部,限制其向地上转移,从而保护地上部。本试验中‘夏日赞歌’景天的转移系数与Pb胁迫浓度呈负相关,其数值维持在0.11~0.50,使植株在4000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的Pb处理下未出现毒害症状。Pb胁迫下,地上部和根部干质量随Pb浓度的增加呈先增后减趋势,4000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的Pb处理下地上部和根部干质量最大达到1.82 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 和0.33 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$,为CK的2.80倍和1.65倍。可能因为在0~4000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 处理下,适宜浓度的Pb提高了淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶的活性^[26],同时 NO_3^- 增强了土壤肥力^[27],促进了植株生长,侧根增多和茎节生根,使地上部和根部干质量增加。但当施入的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 浓度达到8000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,高浓度 Pb^{2+} 显著抑制地上部生长,减少茎节生根数和侧根数,使地上部和根部干质量减少。研究发现,普通植物在土壤 $\text{Pb} \geq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,根系受伤, $\text{Pb} \geq 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,生长被抑制。已发现的超积累植物羽叶鬼针草在 $\text{Pb} > 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其生物量就显著下降^[8]。由此可得,‘夏日赞歌’景天耐Pb胁迫能力很强,对其耐受阈值可达4000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外,伍钧等^[28]和付婷婷等^[29]研究Pb胁迫下氮素形态对日本毛连菜的影响发现,适量的氮肥($\leq 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)可促进日本毛连菜的生长,过量则产生抑制作用,且铵态氮肥对植株生物量和土壤中Pb积累量的促进作用更明显。袁菊红等^[30]研究不同氮形态对Pb胁迫下苏丹草的影响,则表明 NO_3^- -N处理下的苏丹草生物量和对Pb的转移能力高于 NH_4^+ -N处理。本试验施入的 NO_3^- 为土壤提供了氮素营养,而氮素在土壤中以何种形态起作用,以及对于Pb胁迫下‘夏日赞歌’景天的影响有待进一步研究。

Tomsett等^[31]认为植物对重金属抗性的获得可通过避性和耐性两种途径,这两条途径可作用于同一植物。一方面,‘夏日赞歌’景天可通过减少吸收土壤中的 Pb^{2+} 和限制 Pb^{2+} 的运输从而减轻其毒害作用。‘夏日赞歌’景天在外界Pb浓度为8000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其富集系数和转移系数仅为0.09和0.11。另一方面,被植物吸收的 Pb^{2+} 可引发植物体本身的保护机制。在Pb胁迫条件下,过量积累的 Pb^{2+} 会打破活性氧代谢平衡,引起细胞膜脂过氧化^[32]。本试验中,反映‘夏日赞歌’景天膜脂过氧化程度的MDA含量在0~8000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb处理下不断升高,表明膜结构破坏程度随Pb浓度升高不断加深。同时发现0~4000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb处理下,抗氧化酶系统中的SOD活性持续增加,在8000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb处理下,SOD活性显著降低。这与烟草(*Nicotiana tabacum*)^[33]受到Pb胁迫后MDA含量、SOD活性变化趋势一致。PCs是以GSH为底物合成的,由半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸组成的含巯基螯合物,其与重金属离子螯合后转运至液泡贮存,从而使细胞质的重金属浓度降低,达到解毒效果^[34]。大量研究表明,PCs在植物对重金属抗性方面发挥重要作用,其合成水平与重金属种类与数量、胁迫时间及植物种类相关^[35-37]。本试验中,在250~4000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb范围内,PCs含量呈先增后减趋势,各处理组PCs含量远大于对照组,类似结果也出现在类芦^[38]生物体内。适宜浓度Pb诱导PCs含量增加,增强植株对Pb的耐受性,但8000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb处理时PCs含量比CK降低16.62%,可能是由于GSH的消耗增多和合成路径受阻,PCs合成酶活性降低,以及Pb与金属硫蛋白(MT)等其他配位体结合,致使其含量减少^[39]。综上所述,‘夏日赞歌’景天虽未达到Pb超富集植物的标准,但从其地上和根部生物量和Pb积累量来看,利用其为多年生草本植物、生长速度

快、可多次刈割、粗放管理等优点,可作为Pb污染土壤修复和绿化的候选植物,是否能将其用于Pb污染土壤的生态修复还需要进一步的大田试验进行验证。

4 结论

(1) ‘夏日赞歌’景天在250~4000 mg·kg⁻¹ Pb处理下,地上部和根部生物量显著增加,根系的伸长生长受到显著抑制,8000 mg·kg⁻¹ Pb处理对其地上部干质量无显著影响,根长和根部干质量则受到了显著抑制,表明‘夏日赞歌’景天对土壤Pb的耐受阈值可达4000 mg·kg⁻¹,根系对Pb相对比较敏感。同时,‘夏日赞歌’景天在Pb胁迫下的最大Pb含量达672.16 mg·kg⁻¹,表现出较强的富集能力。

(2) 0~8000 mg·kg⁻¹ Pb处理下,根部Pb²⁺含量远大于地上部,转移系数随Pb处理浓度增加不断减小,以减少对地上部的伤害。250~4000 mg·kg⁻¹ Pb处理下,SOD活性不断升高,PCs不断络合Pb²⁺到液泡解毒,缓解植株受害症状。8000 mg·kg⁻¹的Pb处理下,SOD活性降低,PCs合成量降低,植株生长受到显著抑制。综上所述,‘夏日赞歌’景天对Pb具有较强的耐性和富集能力,有望应用于Pb污染土壤的修复和绿化。

参考文献:

- [1] 张小敏,张秀英,钟太洋,等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692-703.
ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 692-703.
- [2] Gupta D K, Huang H G, Corpas F J. Lead tolerance in plants: Strategies for phytoremediation[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2013, 20(4): 2150-2161.
- [3] Kumar N, Bauddd K, Kumar S, et al. Accumulation of metals in weed species grown on the soil contaminated with industrial waste and their phytoremediation potential[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61(1): 491-495.
- [4] 段德超,于明革,施积炎. 植物对Pb的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 287-296.
DUAN De-chao, YU Ming-ge, SHI Ji-yan. Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 287-296.
- [5] Li Y, Zhou C, Huang M, et al. Lead tolerance mechanism in *Conyza canadensis*: Subcellular distribution, ultrastructure, antioxidative defense system, and phytochelatin[J]. *Journal of Plant Research*, 2016, 129(2): 251-262.
- [6] Estrella-Gómez N, Mendoza-Cózatl D, Moreno-Sánchez R, et al. The Pb-hyperaccumulator aquatic fern *Salvinia minima* Baker, responds to Pb²⁺, by increasing phytochelatin via changes in *SmPCS*, expression and in phytochelatin synthase activity[J]. *Aquatic Toxicology*, 2009, 91(4): 320-328.
- [7] Tang Y T, Qiu R L, Zeng X W, et al. Lead, zinc, cadmium hyperaccumulation and growth stimulation in *Arabis paniculata* Franch[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2009, 66(1): 126-134.
- [8] 王红旗,李 华,陆泗进. 羽叶鬼针草对Pb的吸收特性及修复潜力[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 143-147.
WANG Hong-qi, LI Hua, LU Si-jin. *Bidens maximowicziana*'s adsorption ability and remediation potential to lead in soils[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(6): 143-147.
- [9] 金 倩,杨远祥,朱雪梅. 汉源普陀山铅锌矿区优势植物铅锌富集特性研究[J]. 西南农业学报, 2010, 23(6): 1976-1979.
JIN Qian, YANG Yuan-xiang, ZHU Xue-mei. Study on Pb-Zn accumulation characteristics of dominant plant species on Putuo Mountain mine in Hanyuan[J]. *Southwest Agricultural Journal*, 2010, 23(6): 1976-1979.
- [10] 侯晓龙,常青山,刘国锋,等. Pb超富集植物金丝草(*Pogonatherum crinitum*)、柳叶箬(*Isache globosa*)[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 989-994.
HOU Xiao-long, CHANG Qing-shan, LIU Guo-feng, et al. Two lead-hyperaccumulator: *Pogonatherum crinitum* and *Isache globosa*[J]. *Environmental Engineering Journal*, 2012, 6(3): 989-994.
- [11] 樊 霆,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1727-1736.
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecological and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1727-1736.
- [12] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Editorial Board of Chinese Flora, Chinese Academy of Sciences. Chinese flora[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [13] 毕 德,吴龙华,骆永明,等. 浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究[J]. 土壤, 2006, 38(5): 591-597.
BI De, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Dominant plants and their heavy metal contents in six abandoned lead-zinc mine areas in Zhejiang Province[J]. *Soils*, 2006, 38(5): 591-597.
- [14] Yang X, Li T, Yang J, et al. Zinc compartmentation in root, transport into xylem, and absorption into leaf cells in the hyperaccumulating species of *Sedum alfredii* Hance[J]. *Planta*, 2006, 224(1): 185-195.
- [15] Deng D M, Shu W S, Zhang J, et al. Zinc and cadmium accumulation and tolerance in populations of *Sedum alfredii*[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2): 381-386.
- [16] 路文静,李奕松. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
LU Wen-jing, LI Yi-song. Experimental course of plant physiology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.
- [17] 刘 衡,吕家珑,刘 克. 不同土壤类型上低水平镉污染对小麦植物络合素合成的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(1): 121-131.
LIU Heng, LÜ Jia-long, LIU Ke. Effect of lower level of cadmium pollution on wheat phytochelatin synthesis in the different soil types[J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(1): 121-131.

- [18] Wilkins D. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. *New Phytologist*, 1978, 80(3):623-633.
- [19] 吴彬艳, 邵冰洁, 赵惠恩, 等. 11种广义景天属植物对Cd的耐性和积累特性[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5):1947-1956.
- WU Bin-yan, SHAO Bing-jie, ZHAO Hui-en, et al. Cd accumulation and tolerance characteristics of 11 species in *Sedum sensu lato*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(5):1947-1956.
- [20] 聂亚平, 王晓维, 万进荣, 等. 几种重金属(Pb、Zn、Cd、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J]. 生态科学, 2016, 35(2):174-182.
- NIE Ya-ping, WANG Xiao-wei, WAN Jin-rong, et al. Research progress on heavy metal (Pb, Zn, Cd, Cu) hyperaccumulating plants and strengthening measures of phytoremediation[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(2):174-182.
- [21] 李松, 柳丹, 吴家森, 等. 雷竹对Pb胁迫的生理响应及其修复效率研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):175-179.
- LI Song, LIU Dan, WU Jia-sen, et al. Effects of lead stress on physiological response and phytoremediation efficiency of *Phyllostachys praecox*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):175-179.
- [22] Zhou F, Wang J, Yang N. Growth responses, antioxidant enzyme activities and lead accumulation of *Sophora japonica* and *Platycladus orientalis* seedlings under Pb and water stress[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 75(1):383-389.
- [23] 黄亚萍, 俎丽红, 沈广爽, 等. 铅胁迫对蜀葵重金属积累及抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1746-1752.
- HUANG Ya-ping, ZU Li-hong, SHEN Guang-shuang, et al. Effects of lead stress on accumulation ability and antioxidant enzyme activities of *Althaea rosea* Cavan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1746-1752.
- [24] Hall J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(366):1-11.
- [25] Tauqeer H M, Ali S, Rizwan M, et al. Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzickiana*: Growth and physiological response[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 126:138-146.
- [26] Cheng S. Effect of heavy metals on plants and resistance mechanism[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2003, 10(4):256-264.
- [27] 李慧芳, 王瑜, 袁庆华, 等. 铅胁迫对禾本科牧草生长、生理及Pb²⁺富集转运的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(9):163-172.
- LI Hui-fang, WANG Yu, YUAN Qing-hua, et al. Effects of lead stress on growth, physiology, and lead ion accumulation and transportation in gramineous forages[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(9):163-172.
- [28] 伍钧, 付婷婷, 郑超, 等. Pb胁迫下氮素形态对日本毛连菜生物量、叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(1):213-218.
- WU Jun, FU Ting-ting, ZHENG Chao, et al. Effects of nitrogen fertilizer on biomass, chlorophyll content and antioxidant enzyme activities of *Picris japonica* Thunb. under Pb stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(1):213-218.
- [29] 付婷婷, 伍钧, 黄永川, 等. 不同形态氮肥对铅污染土壤的调节[J]. 中国土壤与肥料, 2014(1):24-28.
- FU Ting-ting, WU Jun, HUANG Yong-chuan, et al. Regulation of different formed N fertilizers on lead pollution soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(1):24-28.
- [30] 袁菊红, 胡绵好, 殷乾亮, 等. 不同氮形态对铅胁迫下苏丹草根系统态及铅吸收富集特征的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2):69-73.
- YUAN Ju-hong, HU Mian-hao, YIN Qian-liang, et al. Effects of nitrogen of different forms on *Sorghum Sudanense* root morphology and characteristics of lead absorption and accumulation under lead stress[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(2):69-73.
- [31] Tomsett A B, Thurman D A. Molecular biology of metal tolerances of plants[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 11(5):383-394.
- [32] Bankaji I, Caçador I, Sleimi N. Physiological and biochemical responses of *Suaeda fruticosa* to cadmium and copper stresses: Growth, nutrient uptake, antioxidant enzymes, phytochelatin, and glutathione levels[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, 22(17):13058-13069.
- [33] 朱诗苗, 宋杭霖, 张丽, 等. Pb胁迫对烟草生长及生理生化指标的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(3):465-472.
- ZHU Shi-miao, SONG Hang-lin, ZHANG Li, et al. Effect of lead stress on growth and physio-biochemical indices of tobacco[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(3):465-472.
- [34] Javier Ramos, Loreto Naya, Marina Gay, et al. Functional characterization of an unusual phytochelatin synthase, LjPCS3, of *Lotus japonicus*[J]. *Plant Physiology*, 2008, 148(1):536-545.
- [35] Pawlik-Skowrońska B, Pirszel J, Brown M T. Concentrations of phytochelatin and glutathione found in natural assemblages of seaweeds depend on species and metal concentrations of the habitat[J]. *Aquatic Toxicology*, 2007, 83:190-199.
- [36] Zhang S J, Li T X, Huang H G, et al. Phytoremediation of cadmium using plant species of *Athyrium wardii* (Hook.) [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2014, 11(3):757-764.
- [37] Zhou C F, Zhang K, Lin J W, et al. Physiological responses and tolerance mechanisms to cadmium in *Conyza Canadensis*[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(3):280-289.
- [38] 罗洁文, 李莹, 苏烁烁, 等. 类芦根系抗氧化酶和植物螯合肽对Cd、Pb胁迫的应答[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6):1047-1053.
- LUO Jie-wen, LI Ying, SU Shuo-shuo, et al. Response of antioxidant enzymes and PCs in root of *Neyraudia reynaudiana* to Cd, Pb stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(6):1047-1053.
- [39] 冯倩, 台培东, 付莎莎, 等. 巯基化合物在万寿菊铜解毒中的作用[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1):214-218.
- FENG Qian, TAI Pei-dong, FU Sha-sha, et al. The role of thiol pool in cadmium detoxification in marigold plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(1):214-218.