

Pb胁迫对百喜草生长和Pb积累的影响

侯晓龙, 刘爱琴, 蔡丽平*, 周垂帆, 吴鹏飞, 邹显花, 马祥庆

(福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要:以水土保持先锋植物百喜草为试验材料, 设置不同Pb浓度的室内模拟胁迫试验, 定量测定不同浓度Pb处理下百喜草生长及体内重金属含量, 分析百喜草对Pb胁迫的耐性及其富集效果。结果表明: 百喜草在土壤Pb浓度 $2500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下仍可生长; Pb胁迫对百喜草各生长指标均有一定抑制作用, 地上部分表现为分蘖能力>叶最大伸展>苗高, 根系表现为根体积>根平均直径>总根长>根表面积; 轻度Pb胁迫条件下百喜草根系生物量分配较多, 随Pb浓度的增大, 生物量分配倾向于地上部分; 百喜草对Pb具有一定富集能力, 根系和地上部分最高分别为 $3384.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $200.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根系对Pb的富集能力远大于地上部分, 表现出较弱的转移能力。

关键词: 百喜草; Pb胁迫; 生长指标; 根系形态; 富集特征

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)12-2303-06 doi:10.11654/jaes.2014.12.004

Effects of Pb Stress on Growth and Pb Accumulation of *Paspalum notatum*

HOU Xiao-long, LIU Ai-qin, CAI Li-ping*, ZHOU Chui-fan, WU Peng-fei, ZOU Xian-hua, MA Xiang-qing

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: *Paspalum notatum* is a saline- and drought-tolerant perennial grass and is often used as an erosion-controlling soil stabilizer. However, little information is available about its tolerance to Pb. Here we designed a pot experiments to examine the growth and metal content of *Paspalum notatum* under various Pb stress. The results showed that the maximum tolerance of *P. notatum* to Pb stress was $2500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, but Pb stresses had inhibitory effects on plant growth and development. The inhibition was in order of tillering capacity>maximum leaf elongation>seedling height, and root volume>average root diameter>total root length>root surface area. In low Pb levels, plant biomass allocated more in the roots than in the aboveground; however, biomass accumulation in the aboveground increased with increasing Pb stress. *Paspalum notatum* accumulated Pb in root biomass, with relatively low Pb transfer. The maximum concentrations of Pb in roots and aboveground were $3384.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $200.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively.

Keywords: *Paspalum notatum*; lead stress; growth index; root morphology; accumulation

铅是土壤中常见的重金属污染元素之一, 土壤中过量的铅元素对植物生长产生不利影响, 同时它还可以通过植物根系在植物体内积累, 并通过食物链进入人体, 危害人的身体健康, 因此, 土壤Pb污染问题一直为环境研究的热点^[1-2]。

植物修复技术是一项高效、环保和低廉的治理措

施, 具有十分广阔的应用前景, 发现合适的植物种类是该技术应用的前提^[3-4]。Pb是植物生长的非必需元素, 在体内积累到一定程度将对植物产生影响, 因此, 目前发现的Pb富集植物较少^[5-7]。百喜草(*Paspalum notatum*)——禾本科雀稗属植物, 原产于南美洲, 我国台湾自20世纪50年代引入该草种, 江西省于1989年从台湾引入百喜草进行栽培, 目前已推广至华南及西南地区的近10个省区, 并被成功应用于三峡库区的水土保持和生态防护^[8]。百喜草具有耐贫瘠、抗干旱、覆盖性好、须根发达、固地性强等特点, 是一种抗逆性较强的植物, 在南方水土流失治理中有广泛的应用^[9]。近年来, 百喜草在水土流失治理方面已有较多研究, 但主要集中在其耐旱特性、根系固土作用等方面^[10-11]。韩立立等^[12]研究表明, 侵蚀地种植百喜草

收稿日期: 2014-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401364); 国家科技支撑计划项目(2014BAD15B02); 国家林业局林业公益性行业科研项目(201304303); 农业高校产学研合作科技重大项目(2013N5002); 福建农林大学林学院青年基金项目(6112C039J)

作者简介: 侯晓龙(1981—), 男, 山西永济人, 博士, 讲师, 研究方向为重金属污染及防治。E-mail: lxyhxl@126.com

* 通信作者: 蔡丽平 E-mail: fjclp@126.com

治理后生态系统碳库趋于合理,是一项可行有效的措施。刘华荣等^[13]研究百喜草在退耕坡地水土保持中的应用效果,结果表明:百喜草对土壤瘠薄、水肥管理水平极低的退耕坡地水土流失治理具有重要作用。但目前针对其对重金属 Pb 的耐性特征及富集效果方面研究还较少,限制了其在重金属污染土壤植物修复中的应用。

鉴于此,本文通过室内 Pb 胁迫模拟试验,通过定量测定不同胁迫浓度百喜草的苗高、叶最大伸展、分蘖、生物量、根长、根体积、根表面积、根平均直径及体内重金属含量,探讨百喜草对 Pb 胁迫的适应性及其富集效果,以期为百喜草在 Pb 污染土壤修复中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

百喜草种子购买自深圳鑫森森园林草坪有限公司(发芽率 85%,含水量 0.01%,千粒重 25 g),在恒温培养箱中进行发芽,待种子发芽后将幼苗小心移栽至营养袋中,继续在培养箱中培养,待幼苗长至 10 cm 左右时移出培养箱,供胁迫试验。

1.2 试验方法

选用直径 27 cm、高 30 cm 的塑料桶作为培养容器,为了尽量减少其他元素对试验的影响,本试验采用养分含量较低沙壤土(黄心土和河沙体积比 4:1 混合而成)作为基质,黄心土采自福州林地自然土壤,河沙采自福州乌龙江。基质风干后过 5 mm 的尼龙筛备用,基质中的养分及主要重金属含量为:pH 5.49,有机质 17.51 g·kg⁻¹、全 N 0.22 g·kg⁻¹、全 P 0.03 g·kg⁻¹、全 K 35.16 g·kg⁻¹、水解性 N 0.05 mg·kg⁻¹、有效 P 0.05 mg·kg⁻¹、速效 K 42.64 mg·kg⁻¹、Pb 0.85 mg·kg⁻¹、Zn 3.95 mg·kg⁻¹、Cu 3.1 mg·kg⁻¹、Cr 0.4 mg·kg⁻¹。

基质填充高度为 27 cm(共计 8 kg,以干土计),3 cm 无 Pb 的缓冲层(重 1.5 kg,以干土计)。根据南方铅锌矿区土壤 Pb 含量及分布情况,结合中国土壤环境质量标准(GB 15618—1995),设计 6 个 Pb 胁迫浓度处理:150、250、500、1000、1500、2500 mg·kg⁻¹,同时设置对照(CK),每个处理 5 个重复。Pb 的施加:用醋酸铅 [(CH₃COO)₂Pb·3H₂O] 配置成 60 g·L⁻¹ 的 Pb 溶液,按照设计的胁迫浓度分别配置成不同浓度 Pb 溶液 500 mL,然后一次性均匀浇入相应处理培养桶的基质中(预试验得出 500 mL 可保证溶液均匀分布在土壤中,而不出现渗漏)。

2012 年 6 月 15 日选择长势一致、高 10 cm 的百喜草幼苗,移栽至不同 Pb 胁迫浓度的培养桶中,每桶移栽幼苗 2 株,移栽时注意保证根系自然伸展,然后移入玻璃温室中(昼/夜:温度 23 °C/29.3 °C,湿度 42.7%/67.7%)进行胁迫试验。为保证植株生长对其他养分的需求,每 7 d 浇一次 1/4 营养液 100 mL,每 3 d 浇去离子水 100 mL。营养液采用 Hoagland 配方:KNO₃ 0.51 g·L⁻¹、Ca(NO₃)₂ 0.82 g·L⁻¹、MgSO₄·7H₂O 0.49 g·L⁻¹、KH₂PO₄ 0.136 g·L⁻¹,调节营养液 pH 为 5.5。2012 年 10 月 15 日(种子成熟,完成 1 个生长周期)进行植株收获。

1.3 测定方法

在胁迫第 30、60、90、120 d 分别测定百喜草地上部分的各生长指标。苗高、叶最大伸展用直尺进行测量,苗高以植株最长叶尖计,叶最大伸展以叶伸展最宽处计,同时观测各处理植株的分蘖情况。

在胁迫试验的 120 d 后收获植株,百喜草根系用美国产 STD1600 Epson 数字化扫描仪进行图像扫描,用 WinRhizo (Version 4.0B)根系分析系统软件分析根系长度、表面积、体积和平均直径等根系形态指标。

百喜草收获后,先在 60 °C 的烘干箱中杀青,然后在 80 °C 的烘干箱中烘干至恒重,用电子天平分别测定地上部分、地下部分重量。Pb 含量采用湿灰化法进行消煮,然后用北京瑞利分析仪器公司的原子吸收分光光度计(WFX-136)测定 Pb 含量。

1.4 数据统计方法

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 数据分析软件进行分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Tukey 法多重比较,95%置信度进行差异显著性比较。图表中数据以平均值±标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 Pb 胁迫对百喜草苗高的影响

不同浓度 Pb 处理百喜草苗高见图 1。由图 1 可知,在 Pb 胁迫初期(30 d),不同 Pb 浓度处理下百喜草苗高均显著小于对照($P<0.05$);胁迫 90 d 和 120 d,百喜草苗高在 Pb 胁迫浓度 150、250、500、2500 mg·kg⁻¹ 处理均与对照无显著差异,Pb 胁迫浓度 1000 mg·kg⁻¹ 和 1500 mg·kg⁻¹ 处理则显著小于对照($P<0.05$);不同浓度 Pb 胁迫条件下,百喜草的最大苗高在 38.84~54.46 cm 之间,为对照的 59.85%~84.19%;除 Pb 胁迫浓度 1500 mg·kg⁻¹ 和 2500 mg·kg⁻¹ 处理外,百喜草苗高均表现为胁迫初期和中期生长较快,胁迫

末期较慢,与对照规律一致;Pb 胁迫浓度 $1500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理,在胁迫后期苗高仍具有较大生长量,表现出一定生长滞后的现象。

2.2 Pb 胁迫对百喜草叶最大伸展的影响

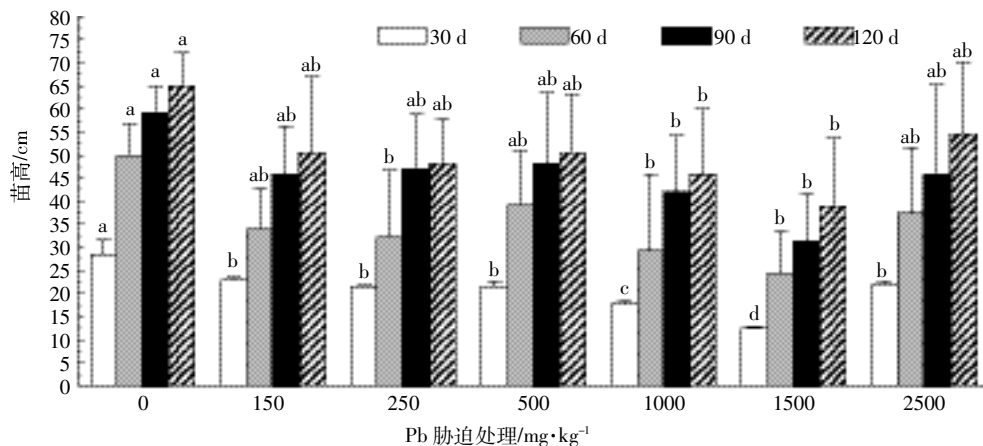
不同浓度 Pb 处理百喜草叶最大伸展见图 2。由图 2 可知,百喜草叶最大伸展随 Pb 胁迫浓度的增大呈先逐渐减小,在 Pb 胁迫浓度 $2500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时又增大的变化规律。在胁迫 90 d 和 120 d 时百喜草叶最大伸展在 Pb 胁迫浓度 $2500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时最大,但不同浓度 Pb 处理百喜草叶最大伸展均显著小于对照 ($P < 0.05$);Pb 胁迫对百喜草叶最大伸展有较大抑制作用,在胁迫 30 d、60 d、90 d、120 d,百喜草叶最大伸展分别为对照的 31.58%~48.22%、29.07%~46.01%、34.65%~50.68%和 37.45%~52.63%。

2.3 Pb 胁迫对百喜草分蘖的影响

不同浓度 Pb 处理百喜草分蘖数见图 3。由图 3 可知,随 Pb 胁迫浓度的增加,百喜草的分蘖数逐渐减少,且不同浓度 Pb 处理均显著小于对照 ($P < 0.05$),为对照的 15.38%~46.15%,说明 Pb 胁迫对植物分蘖有较强的抑制作用。

2.4 Pb 胁迫对百喜草根系生长的影响

不同浓度 Pb 处理百喜草分蘖数见图 4。由图 4 可得,随 Pb 胁迫浓度的增加,百喜草总根长、根表面积、根体积和根平均直径均呈先增大后减小,在 Pb 浓度 $2500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理又增大的变化趋势;不同 Pb 浓度处理下,百喜草总根长、根体积、根平均直径均显著小于对照 ($P < 0.05$);百喜草根表面积在轻度 (150 、 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和重度 (1500 、 $2500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Pb 胁迫处理显



图中不同 Pb 胁迫浓度的柱状图上出现相同字母表示 $P=0.05$ 水平上差异不显著。下同
For the same time, bars with the same letter are not significantly different between Pb concentrations, based on par-wise t-test at 5% level of significance. The same as below

图 1 不同浓度 Pb 处理百喜草的苗高

Figure 1 Seedling height of *Paspalum natatu* under different Pb concentrations

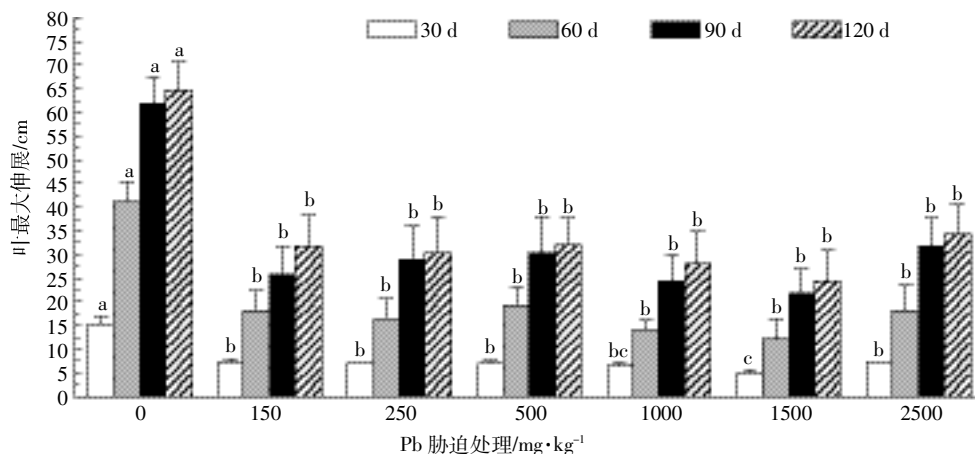


图 2 不同浓度 Pb 处理百喜草的叶最大伸展

Figure 2 Maximum leaf elongation of *Paspalum natatu* under different Pb concentrations

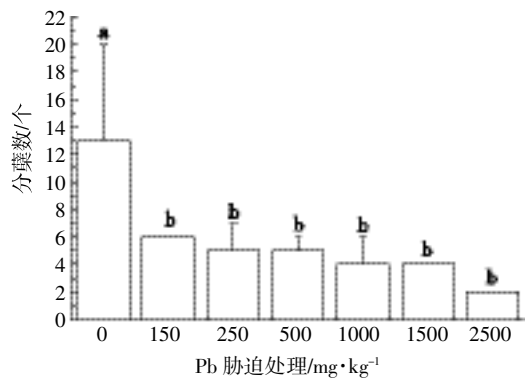


图3 不同浓度 Pb 处理百喜草的分蘖数

Figure 3 Tillering number of *Paspalum natatu* under different Pb concentrations

著小于对照($P<0.05$),但中度 Pb 胁迫条件下与对照无显著差异($P<0.05$);Pb 胁迫条件下,百喜草总根长、根表面积、根体积、根平均直径分别为对照的 43.18%~76.74%、72.37%~90.75%、4.28%~14.66% 和 58.00%~61.30%。说明 Pb 胁迫对百喜草根系生长具有一定抑制作用,但随 Pb 胁迫浓度的增加,百喜草根系可通过根系的拓展适应逆境环境。

2.5 Pb 胁迫对百喜草生物量及其分配的影响

不同浓度 Pb 处理百喜草的生物量分配情况见表

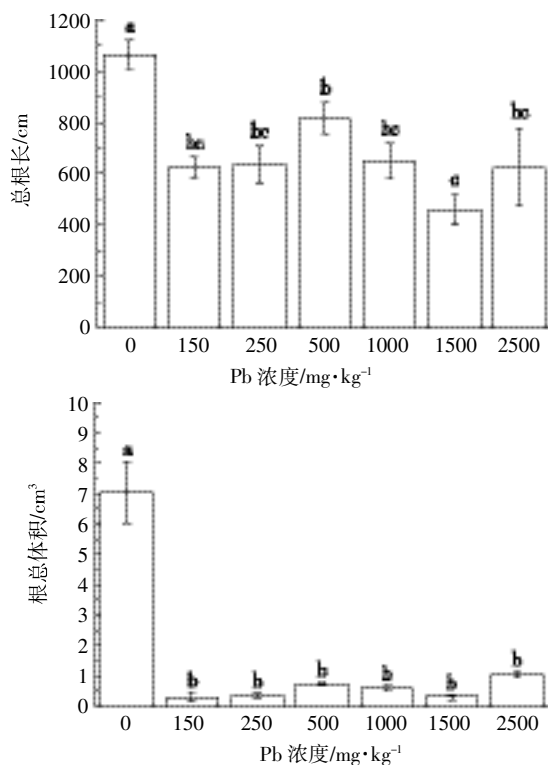


表1 不同浓度 Pb 胁迫对百喜草生物量的影响

Table 1 Biomass of *Paspalum natatu* under different Pb concentrations

处理/mg·kg ⁻¹	地上部分/g	根系/g	根冠比
0	10.511±1.057a	1.770±0.155a	0.168
150	0.725±0.086d	0.138±0.013c	0.190
250	0.952±0.089d	0.154±0.017bc	0.162
500	1.881±0.082bc	0.196±0.020bc	0.104
1000	1.426±0.124cd	0.148±0.010bc	0.103
1500	1.342±0.141cd	0.128±0.011c	0.095
2500	2.410±0.0303b	0.263±0.022b	0.109

1。由表1可得,随 Pb 胁迫浓度的增加,百喜草地上部分和根系生物量均呈先增大后减小的趋势,在 Pb 胁迫浓度 2500 mg·kg⁻¹ 处理又增加;在 Pb 胁迫浓度 2500 mg·kg⁻¹ 处理时百喜草地上部分和根系生物量大于其他 Pb 胁迫浓度处理,分别为其他处理的 1.28~3.32 倍和 1.34~2.06 倍,但显著小于对照($P<0.05$),分别为对照的 22.93%和 14.84%,说明 Pb 胁迫对百喜草生物量具有较大抑制作用;百喜草根冠比随 Pb 胁迫浓度的增大呈逐渐减小的趋势,但 2500 mg·kg⁻¹ 处理又增加,说明轻度 Pb 胁迫条件下百喜草根系生物量分配较多,随 Pb 胁迫浓度的增大,生物量分配倾向于地上部分。

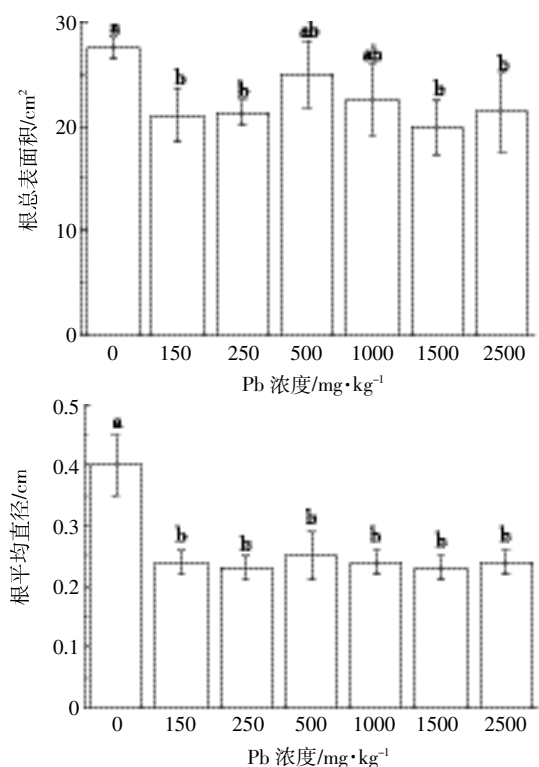


图4 不同浓度 Pb 处理百喜草的根系生长

Figure 4 Root growth of *Paspalum natatu* under different Pb concentrations

表 2 不同浓度 Pb 处理百喜草体内 Pb 含量的变化

Table 2 Content of total Pb in *Paspalum natatu* under different Pb concentrations

处理	根系/mg·kg ⁻¹	地上部分/mg·kg ⁻¹	转移系数
0	38.00±3.84f	25.01±2.60f	0.66
150	363.78±4.87e	158.90±6.70c	0.44
250	1 243.00±8.21d	179.19±8.63b	0.14
500	2 131.75±69.08c	151.09±4.42c	0.07
1000	2 845.46±149.61b	200.70±2.47a	0.07
1500	3 256.47±67.06a	73.66±1.90d	0.02
2500	3 384.56±147.15a	55.50±0.72e	0.02

注:百喜草对 Pb 转移系数计算公式为:地上部分的 Pb 含量/地下部分的 Pb 含量。

2.6 Pb 胁迫对百喜草体内 Pb 含量的影响

不同浓度 Pb 处理百喜草体内 Pb 含量见表 2。由表 2 可得,随 Pb 胁迫浓度的增大,百喜草根系 Pb 含量呈逐渐增大的趋势,且均显著大于无 Pb 胁迫对照 ($P<0.05$),在 Pb 胁迫浓度 2500 mg·kg⁻¹ 处理最大,为 3 384.56 mg·kg⁻¹;地上部分 Pb 含量则呈先增大后减小的趋势,但不同浓度 Pb 处理均显著大于无 Pb 胁迫对照 ($P<0.05$),最高仅为 200.70 mg·kg⁻¹;百喜草对 Pb 的转移系数随 Pb 浓度的增大逐渐降低,范围在 0.02~0.44 之间。以上结果说明百喜草对 Pb 的转移能力较弱,但可将大量 Pb 积累在根系中。

3 讨论

在重金属胁迫条件下植物的生长会受到一定抑制,为适应逆境环境,植物会产生一系列形态学响应。马敏等^[14]研究重金属对 8 种园林植物幼苗生长的影响结果表明:不同重金属对植物幼苗和根系抑制作用存在差异,Pb 胁迫对植物幼苗生长有一定促进作用,但对植物根系均有强烈抑制作用。本研究发现百喜草对 Pb 具有一定耐性,在 Pb 浓度 2500 mg·kg⁻¹ 条件下仍可生长,但 Pb 胁迫对百喜草苗高、叶最大伸展、分蘖能力及根系生长均有一定抑制作用,地上部分表现为:分蘖数>叶最大伸展>苗高,根系表现为根体积>根平均直径>总根长>根表面积,根系生长呈先增大后减小,在高 Pb 浓度处理下又增大的变化趋势。Pb 胁迫条件下百喜草地上和根系生物量均受到明显抑制,但随 Pb 浓度增大呈现先减小后增大的趋势,表现出对 Pb 胁迫的耐性特征。钟珍梅等^[3]研究同样发现 Pb 胁迫对百喜草苗高、生物量具有一定抑制作用,与本研究结果一致。

植物对重金属的抗性主要通过“避让”和“解毒”

来实现,不同耐性植物则表现出不同特性^[15],水生植物槐叶萍对 Pb 的富集作用研究表明,随着胁迫浓度的增大,槐叶萍根和叶中 Pb 和植物络合素含量都有增大趋势,而且植物络合素的含量和活性与根和叶中 Pb 的富集量呈明显的正相关,说明植物络合素对槐叶萍富集 Pb 有一定的促进作用^[16]。Blaylock 等^[17]和 Wu 等^[18]分别证明了柠檬酸可以增加印度芥菜、玉米、豌豆等植物对重金属的吸收,促进 Pb 向地上部分传输。本研究发现百喜草对 Pb 具有一定的耐性和富集能力,在土壤 Pb 浓度 2500 mg·kg⁻¹ 条件下仍可生长。随 Pb 浓度的提高,百喜草根系中 Pb 含量逐渐增加,但对 Pb 的转移能力较弱,转移系数在 0.02~0.44 之间,说明百喜草主要通过将 Pb 固定在根系中,阻止其向地上部分转移,从而减轻对其毒害作用,这可能是百喜草耐 Pb 的主要特性之一。钟珍梅等^[3]研究同样得出百喜草对铅转移能力较弱的结论。夏汉平等^[19]研究百喜草对铅锌尾矿的抗性结果表明,当 Pb 含量为 1723 mg·kg⁻¹ 时,百喜草茎叶生物量显著下降,而根系生物量在 Pb 含量为 3251 mg·kg⁻¹ 时才显著下降,说明百喜草茎叶对 Pb 胁迫比根系更敏感。与对贫瘠地、有机物、污水等都表现出较强抗性的香根草 (*Vetiveria zizanioides*) 相比,百喜草在重金属的抗性方面很可能强于香根草^[19]。虽然目前在百喜草对干旱的耐性机制方面已有部分研究^[11,20],但针对 Pb 耐性的生理机制尚不清楚,特别是根系积累 Pb 而地上部不积累 Pb 的生理机制有待进一步研究。综上所述,Pb 胁迫对百喜草各生长指标均有一定抑制作用,但百喜草可耐高浓度 Pb 胁迫环境,虽然其未达到 Pb 超富集植物的标准,但地下部 Pb 含量超过了临界标准含量,且百喜草对地表的覆盖速度快,因此,笔者认为其可在铅锌矿废弃地污染土壤的植被恢复过程中应用。

4 结论

(1)百喜草对土壤 Pb 胁迫有一定耐性,在土壤 Pb 浓度 2500 mg·kg⁻¹ 条件下仍可生长。Pb 胁迫对百喜草苗高、叶最大伸展、分蘖能力和根系生长均有一定抑制作用。地上部分表现为分蘖能力>叶最大伸展>苗高;根系则表现为根体积>根平均直径>总根长>根表面积。

(2)轻度 Pb 胁迫条件下百喜草根系生物量分配较多,随 Pb 胁迫浓度的增大,生物量分配倾向于地上部分。

(3)百喜草对 Pb 具有一定富集能力,但对 Pb 的转移能力较弱。其主要通过将 Pb 固定在根系中,阻止其向地上部分转移,从而减轻对其地上部分的毒害作用。百喜草具有修复铅污染土壤的潜力,可在铅锌矿废弃地污染土壤的植被恢复过程中应用。

参考文献:

- [1] 罗永清,陈银萍,陶玲,等. 兰州土壤-蔬菜系统铅污染特征及全钾速效钾与 pH 对其富集特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1477-1482.
- LUO Yong-qing, CHEN Yin-ping, TAO Ling, et al. Pb Pollution in soil-vegetable system related to the effect of total soil K, available K and pH in Lanzhou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1477-1482.
- [2] 袁艺宁,杨志辉,柴立元,等. 铅锌冶炼厂渣堆场周边土壤铅污染特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 307-311.
- YUAN Yi-ning, YANG Zhi-hui, CHAI Li-yuan, et al. The characteristics of lead pollution in the soil around the slag yard in lead and zinc smeltery[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(2): 307-311.
- [3] 钟珍梅,王义祥,杨冬雪,等. 4 种植物对铅、镉和砷污染土壤的修复作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 123-126.
- ZHONG Zhen-mei, WANG Yi-xiang, YANG Dong-xue, et al. Phytoremediation effects of four plants on contaminated soils by heavy metal lead, cadmium and arsenic[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl):123-126.
- [4] Visioli G, Marmiroli N. The proteomics of heavy metal hyperaccumulation by plants[J]. *Journal of Proteomics*, 2013, 79(2):133-145.
- [5] 赵磊. 白音诺尔铅锌矿铅超富集植物筛选及其耐性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- ZHAO Lei. Screening of hyperaccumulators and tolerance research in baiyinnuoer Pb-Zn mine[D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [6] 汤叶涛,仇荣亮,曾晓雯,等. 一种新的多金属超富集植物: 圆锥南芥(*Arabis paniculata* L.)[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(4): 135-136.
- TANG Ye-tao, QIU Rong-liang, ZENG Xiao-wen, et al. A new found Pb/Zn/Cd hyperaccumulator: *Arabis Paniculata* L.[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(4): 135-136.
- [7] 侯晓龙,常青山,刘国锋,等. Pb 超富集植物金丝草(*Pogonatherum crinitum*)、柳叶箬(*Lsachne 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 *Lsachne globosa*[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(3):989-994.
- [8] 史玉虎,潘磊,欧阳金华,等. 三峡库区百喜草引种试验初报[J]. 中国水土保持, 2002(2):18-19.
- SHI Yu-hu, PAI Lei, OUYANG Jin-hua, et al. Preliminary report on *Paspalum notatum* in reservoir area of Three Gorges[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2002(2):18-19.
- [9] 林桂志. 百喜草对坡地果园水土保持及土壤改良效果的研究[J]. 亚热带水土保持, 2012, 24(3): 10-13, 70.
- LIN Gui-zhi. Study on the soil conservation & soil improvement effects by planting the *Paspalum notatum* in the Slope Orchard[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2012, 24(3): 10-13, 70.
- [10] 李建兴,何丙辉,谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5):1535-1547.
- LI Jian-xing, HE Bing-hui, CHEN Yun. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1535-1547.
- [11] Wu X J, An J, Xiao J X, et al. Studies on mechanisms underlying promotion of arbuscular mycorrhizas on drought resistance in Bahia grass[J]. *Journal of Anhui Normal University(Natural Science)*, 2014,37(1): 47-52, 57.
- [12] 韩立立,谢锦升,曾宏达,等. 百喜草治理对退化红壤生态系统碳库及分配的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013,8(1):33-40.
- HAN Li-li, XIE Jin-sheng, ZENG Hong-da, et al. Effects of *Paspalum notatum* Flüge on carbon storage change and allocation in an ecosystem developed on degraded red soil[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2013,8(1):33-40.
- [13] 刘华荣,龙忠富,邓蓉,等. 百喜草在退耕坡地种植中的水土保持效应及养羊效果[J]. 贵州农业科学,2012,40(7):145-148.
- LIU Hua-rong, LONG Zhong-fu, DENG Rong, et al. Effects of *Paspalum notatum* in soil and water conservation and goat fattening on degraded slope-land[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012,40(7): 145-148.
- [14] 马敏,龚惠红,邓泓. 重金属对 8 种园林植物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22):206-211.
- MA Min, GONG Hui-hong, DENG Hong. Effects of heavy metal stress on seed germination and seedling growth of eight urban plants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012,28(22):206-211
- [15] Bakern A J M. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1-4): 643-654.
- [16] Zhang Y Y, Liu J H. Transgenic alfalfa plants co-expressing glutathione S-transferase(GST) and human CYP2E1 show enhanced resistance to mixed contaminants of heavy metals and organic pollutants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(1-2): 357-362.
- [17] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S. Enhanced accumulation of Pb in India Mustard by soil-applied chelating agents[J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(3):860-865.
- [18] Wu J, Hsu F C, Cunningham S D. Chelate-assisted Pb phytoextraction: Pb availability, uptake and translocation constraints[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33(11):1898-1904.
- [19] 夏汉平,束文圣. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1121-1129.
- XIA Han-ping, SHU Wen-sheng. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead/ zinc mine tailings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1121-1129.
- [20] 肖家欣,任群,吴雪俊,等. 丛枝菌根真菌对百喜草的生理特性的影响[J]. 植物分类与资源学报, 2011, 33(5):521-528.
- XIAO Jia-xin, REN Qun, WU Xue-jun, et al. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on physiological character of Bahia grass(*Paspalum notatum*, Poaceae)[J]. *Plant Diversity and Resources*, 2011, 33(5):521-528.