

# 异质 Pb 胁迫对超富集植物金丝草根系生长及生物量分配的影响

侯晓龙, 刘爱琴, 蔡丽平, 吴鹏飞, 邹显花, 马祥庆\*

(福建农林大学林学院, 福州 350002)

**摘要:**以 Pb 超富集植物金丝草(*Pogonatherum crinitum*)为试验材料,设置不同 Pb 浓度的土壤异质胁迫室内模拟试验,定量测定不同 Pb 胁迫浓度和斑块中金丝草的根长、体积、表面积、平均直径等形态指标,以及根系和地上部分的生物量,比较不同异质 Pb 胁迫下金丝草根系形态指标及生物量分配的差异。结果表明,异质 Pb 胁迫对金丝草根长、根体积、表面积影响较明显,但对根平均直径的影响较小;随 Pb 胁迫浓度的增加,金丝草在 Pb 胁迫斑块和无 Pb 斑块的根长、根体积和表面积均呈逐渐增大的趋势,但无 Pb 斑块均大于 Pb 胁迫斑块;无 Pb 左室、Pb 胁迫右室及整株根冠比均随 Pb 胁迫浓度的增加表现为先增大后减小的变化规律,表明轻度 Pb 胁迫条件下金丝草根系生物量分配较多,但随 Pb 胁迫浓度的增大,地上部的生物量所占比例逐渐增大。

**关键词:**金丝草;土壤异质 Pb 胁迫;根系形态;生物量分配

中图分类号:X503.23 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)11-2145-06 doi:10.11654/jaes.2013.11.007

## Effects of Heterogeneous Pb Stress on Root Growth and Biomass Allocation of *Pogonatherum crinitum*

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

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

**Abstract:** Heavy metals usually distribute heterogeneously in the real environment. A controlled glasshouse experiment was conducted to explore the effects of heterogeneous Pb stress on root growth and biomass allocation of *Pogonatherum crinitum*, a Pb hyperaccumulator first found by our research group. There were 6 heterogeneous Pb stress treatments with 5 replicates. The root length, root volume, root surface area, average root diameter and plant biomass were examined. Root length, root volume and root surface area but not root diameter were significantly influenced by Pb stress. The root length, root volume and surface area of *Pogonatherum crinitum* increased gradually with Pb concentrations in both Pb stress and no Pb patches, with greater increases in the later than in the former. The root-shoot ratio initially increased and then decreased as Pb concentrations increased, indicating that *Pogonatherum crinitum* allocated more biomass to the roots under low Pb stress, but more to the shoots under high Pb stress.

**Keywords:** *Pogonatherum crinitum*; heterogeneous Pb stress; root morphology; biomass allocation

土壤重金属污染已成为当前环境科学界关注的重大问题,其中 Pb 污染受到大家普遍关注<sup>[1-2]</sup>。污染土壤的 Pb 可通过食物链进入人体,严重影响体内新陈代谢,而且人体内的 Pb 靠自身排除很慢,其损害机体器官的过程不可逆<sup>[3]</sup>。因此,Pb 污染土壤的治理已

成为当前亟需解决的重大课题<sup>[4-5]</sup>。重金属污染植物修复技术应用的前提是发现重金属超富集植物,课题组前期研究在国内首次发现了一种 Pb 超富集植物—金丝草(*Pogonatherum crinitum*),对 Pb 有极强的耐性和富集能力,其 Pb 的累积量及转移系数达到了 Pb 超富集植物的标准<sup>[6-7]</sup>。根系作为植物和土壤的重要界面,是重金属与植物直接接触的首要部位。超富集植物体内重金属浓度远比土壤中的高,但其根系仍能逆浓度梯度有选择性地吸收重金属,说明该重金属超富集植物对土壤中的重金属可能存在一定的耐性和富集机制<sup>[8-9]</sup>。Schwab 等<sup>[10]</sup>研究牛毛草根系对汞的富集效果表明,牛毛草对汞的吸收与其根系长度、密度有关,根系

收稿日期:2013-07-04

基金项目:国家公益性行业科研专项(201111020-2);国家林业局林业公益性行业科研项目(201304303);福建省自然科学基金项目(2012J01072);农业高校产学研合作科技重大项目(2013N5002)

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

\*通信作者:马祥庆 E-mail:lxymxq@126.com

特征是影响其对汞吸收的重要因素。由于重金属污染源、迁移性和可给性不同,土壤中的重金属多呈高度异质斑块状分布<sup>[11-13]</sup>。一些重金属超积累植物根系有趋向重金属斑块生长的趋势,而且根的数量与重金属含量间存在正比例关系<sup>[14]</sup>。金丝草对 Pb 强的耐性和富集特性是长期适应 Pb 胁迫环境的结果,是长期进化过程中形成的特殊适应性,可能存在着特殊的生态学适应意义,蕴藏着需要人们去认识和发掘的形态学适应机制。但目前有关金丝草根系对土壤异质 Pb 胁迫的形态学响应机制尚不清楚,特别是对金丝草适应高浓度 Pb 的可能根系形态学途径缺乏足够的了解,很大程度上限制了 Pb 超富集植物金丝草在 Pb 污染土壤治理中的应用。

本文以 Pb 超富集植物金丝草为研究对象,采用 Pb 胁迫土培模拟试验,设计异质 Pb 胁迫装置,设置不同浓度 Pb 胁迫水平,利用根系图像分析系统,定量研究不同 Pb 胁迫浓度,不同 Pb 斑块条件下金丝草根长、根体积、根表面积、根平均直径等形态指标,测定不同 Pb 胁迫斑块根系及地上部分生物量,分析金丝草根系对异质 Pb 胁迫的形态学响应,揭示金丝草根系适应环境高浓度 Pb 的可能形态学途径,为阐明 Pb 超富集植物对 Pb 的耐性和富集机制提供科学依据,对于发掘 Pb 超富集植物的富集潜力、加快修复土壤 Pb 污染具有重要的理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选择采自福建尤溪铅锌矿区的金丝草种子,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,供胁迫试验用。

1.2 试验装置

选用自制的直径 27 cm、高 30 cm 的塑料桶作为培养容器,用双层长 27 cm、宽 27 cm 的农用薄膜将培养桶分为容积相等的两个分室,阻止 Pb 在培养桶中的流动。培养桶高 30 cm,薄膜隔层高度 27 cm,上层留 3 cm 的缓冲层,具体设计见图 1。

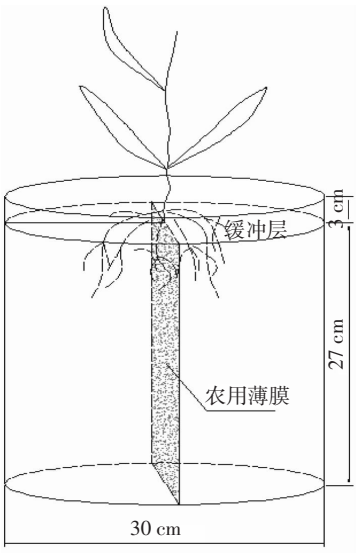


图 1 土培试验装置

Figure 1 Diagram for experimental unit

1.3 试验设计

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的沙壤土(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 尼龙筛备用,基质中的养分及主要重金属含量见表 1。基质填充高度为 27 cm(左右分室各 4 kg,共计 8 kg,以干土计),3 cm 无 Pb 的缓冲层(重 1.5 kg,以干土计)。由于自然界的重金属污染多呈异质斑块状分布,为模拟重金属的自然分布状况,本试验设置异质 Pb 胁迫试验。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, Y1:150 mg·kg<sup>-1</sup>(左 0,右 300 mg·kg<sup>-1</sup>)、Y2:250 mg·kg<sup>-1</sup>(左 0,右 500 mg·kg<sup>-1</sup>)、Y3:500 mg·kg<sup>-1</sup>(左 0,右 1000 mg·kg<sup>-1</sup>)、Y4:1000 mg·kg<sup>-1</sup>(左 0,右 2000 mg·kg<sup>-1</sup>)、Y5:1500 mg·kg<sup>-1</sup>(左 0,右 3000 mg·kg<sup>-1</sup>)、Y6:2500 mg·kg<sup>-1</sup>(左 0,右 5000 mg·kg<sup>-1</sup>),每个处理 5 个重复。Pb 的施加用醋酸铅[(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Pb·3H<sub>2</sub>O]配置成 60 g·L<sup>-1</sup> 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

表 1 基质的养分和重金属含量

Table 1 Contents of nutrients and heavy metals in the substrate used

| 项目 | pH   | 有机质/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 全 N/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 全 P/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 全 K/<br>g·kg <sup>-1</sup> | 水解 N/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 有效 P/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 速效 K/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | Pb/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | Zn/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | Cu/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | Cr/<br>mg·kg <sup>-1</sup> |
|----|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 含量 | 5.49 | 17.51                      | 0.22                       | 0.03                       | 35.16                      | 0.21                         | 0.05                         | 42.64                        | 0.85                       | 3.95                       | 3.1                        | 0.4                        |

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 选择长势一致、高 10 cm 的金丝草幼苗,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,且正好处于左右两室的中心位置,然后移入温室中进行胁迫试验。为保证植株生长对其他养分的需求,每 7 d 浇 1 次 1/4 营养液 100 mL,每 3 d 浇去离子水 100 mL,两分室各 50 mL。营养液采用 Hoagland 配方:KNO<sub>3</sub> 0.51 g·L<sup>-1</sup>,Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0.82 g·L<sup>-1</sup>,MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.49 g·L<sup>-1</sup>,KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.136 g·L<sup>-1</sup>,调节营养液 pH 值为 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,地上部分和根系分别进行收获,根系分左右两室分别收获。将收获根系做好标记后,先用自来水反复冲洗干净,再用去离子水冲洗 3 遍,用吸水纸吸干后用于根系形态指标测定。将地上部分先在 60 ℃的烘箱中杀青,然后和根系一同在 80 ℃的烘箱中烘干至恒重用。

#### 1.4 测定方法

用美国产 STD1600 Epson 数字化扫描仪对不同分室的根系分别进行图像扫描,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。用电子天平分别测定地上部分和根系的重量。

## 2 结果与分析

### 2.1 异质 Pb 胁迫对金丝草根长的影响

由表 2 可知,异质 Pb 胁迫条件下,金丝草无 Pb 左室的总根长均大于 Pb 胁迫右室,分别为右室的 1.26~3.40 倍;随 Pb 胁迫浓度的增大,金丝草总根长

表 2 不同异质 Pb 胁迫条件下金丝草总根长

Table 2 Total root length of *Pogonatherum crinitum* under different heterogeneous Pb stresses

| 处理  | 总根长             |                |      |
|-----|-----------------|----------------|------|
|     | 左室/cm           | 右室/cm          | 左/右  |
| JY1 | 474.85±66.82d   | 376.79±59.21b  | 1.26 |
| JY2 | 740.79±150.58bc | 264.05±73.88b  | 2.81 |
| JY3 | 814.17±126.19bc | 239.46±20.96b  | 3.40 |
| JY4 | 602.36±214.92cd | 350.89±58.24b  | 1.72 |
| JY5 | 1064.46±9.12a   | 662.18±152.37a | 1.61 |
| JY6 | 959.75±124.41ab | 610.15±161.58a | 1.57 |

注:表中同一列数据后出现相同小写字母者表示在 p=0.05 水平上差异不显著,下同。

在无 Pb 左室表现为先增大后减小的规律,而 Pb 胁迫右室则呈逐渐增加的趋势。高浓度(1500 mg·kg<sup>-1</sup>和 2500 mg·kg<sup>-1</sup>)Pb 胁迫条件下,左右两室根系总长度均显著大于其他处理( $P<0.05$ );左右两室总根长的比值表现为先增大后减小的变化规律。说明 Pb 胁迫对金丝草根生长有一定促进作用,高浓度 Pb 胁迫条件下,金丝草可通过根系快速伸长,避让 Pb 胁迫,以适应高浓度 Pb 胁迫环境。

### 2.2 异质 Pb 胁迫对金丝草根表面积的影响

由表 3 可知,异质 Pb 胁迫条件下,随 Pb 胁迫浓度的增大,金丝草总根表面积在无 Pb 左室呈逐渐增大的趋势,低浓度 Pb 胁迫处理显著小于其他处理( $P<0.05$ );在 Pb 胁迫右室则呈先减小后增大的变化规律,高浓度 Pb 胁迫(1500 mg·kg<sup>-1</sup>和 2500 mg·kg<sup>-1</sup>)处理金丝草根表面积显著大于其他处理( $P<0.05$ );左右两室比值呈先增大后减小的变化规律。说明 Pb 胁迫条件下,金丝草通过增加根系表面积,扩大根系与土壤的接触面积,获取自身生长所需养分,以适应 Pb 胁迫环境。

### 2.3 异质 Pb 胁迫对金丝草根平均直径的影响

由表 4 可知,异质 Pb 胁迫条件下,随 Pb 胁迫浓

表 3 不同异质 Pb 胁迫条件下金丝草总根表面积

Table 3 Root surface area of *Pogonatherum crinitum* under different heterogeneous Pb stresses

| 处理  | 总根表面积              |                    |      |
|-----|--------------------|--------------------|------|
|     | 左室/cm <sup>2</sup> | 右室/cm <sup>2</sup> | 左/右  |
| JY1 | 14.34±2.97d        | 15.07±4.51b        | 0.95 |
| JY2 | 22.74±3.65bc       | 12.01±1.65b        | 1.89 |
| JY3 | 23.66±2.47abc      | 12.13±1.89b        | 1.95 |
| JY4 | 20.14±3.91c        | 14.47±1.17b        | 1.39 |
| JY5 | 27.62±0.23a        | 21.50±3.35a        | 1.28 |
| JY6 | 26.09±3.77ab       | 20.89±4.50a        | 1.25 |

表 4 不同异质 Pb 胁迫条件下金丝草根平均直径

Table 4 Average root diameter of *Pogonatherum crinitum* under different heterogeneous Pb stresses

| 处理  | 根平均直径       |            |      |
|-----|-------------|------------|------|
|     | 左室/mm       | 右室/mm      | 左/右  |
| JY1 | 0.26±0.01b  | 0.27±0.06a | 0.97 |
| JY2 | 0.28±0.04b  | 0.26±0.05a | 1.08 |
| JY3 | 0.33±0.03ab | 0.27±0.05a | 1.22 |
| JY4 | 0.35±0.08a  | 0.27±0.03a | 1.33 |
| JY5 | 0.26±0.06b  | 0.28±0.03a | 0.92 |
| JY6 | 0.28±0.08b  | 0.26±0.05a | 1.06 |



度的增大, 金丝草根平均直径在无 Pb 左室先增大后减小, 而在 Pb 胁迫右室变化规律则不明显, 左右两室比值表现为先增大后减小的变化规律。金丝草左右两室根平均直径不同处理间均无显著差异( $P<0.05$ ), 说明 Pb 胁迫对金丝草根系平均直径影响较小。

2.4 异质 Pb 胁迫对金丝草根体积的影响

由表 5 可知, 异质 Pb 胁迫条件下, 随 Pb 胁迫浓度的增大, 金丝草根体积在无 Pb 左室先增大后减小, 胁迫浓度  $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理显著大于其他处理 ( $P<0.05$ ); Pb 胁迫右室则呈先增大后减小的趋势, 中度胁迫浓度 ( $500$ 、 $1000$ 、 $1500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 处理间无显著差异, 但胁迫浓度  $1000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理显著大于轻度胁迫 ( $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和强度胁迫 ( $2500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 处理 ( $P<0.05$ ); 左右两室根体积的比值呈先增大后减小的趋势。说明异质 Pb 胁迫条件下, 金丝草可通过增大无 Pb 斑块根系体积, 扩大与土壤的接触面积, 以获取自身生长所需养分。

表 5 不同异质 Pb 胁迫条件下金丝草根体积

Table 5 Root volume of *Pogonatherum crinitum* under different heterogeneous Pb stresses

| 处理  | 根体积                    |                        |      |
|-----|------------------------|------------------------|------|
|     | 左室/ $\text{cm}^3$      | 右室/ $\text{cm}^3$      | 左/右  |
| JY1 | $0.46\pm0.10\text{c}$  | $0.18\pm0.06\text{b}$  | 2.56 |
| JY2 | $0.85\pm0.55\text{b}$  | $0.24\pm0.08\text{b}$  | 3.51 |
| JY3 | $1.48\pm0.15\text{a}$  | $0.26\pm0.10\text{ab}$ | 5.77 |
| JY4 | $0.90\pm0.18\text{b}$  | $0.35\pm0.09\text{a}$  | 2.57 |
| JY5 | $0.74\pm0.03\text{bc}$ | $0.35\pm0.09\text{a}$  | 2.12 |
| JY6 | $0.61\pm0.19\text{bc}$ | $0.23\pm0.05\text{b}$  | 2.67 |

2.5 异质 Pb 胁迫对金丝草生物量及其分配的影响

由表 6 可知, 异质 Pb 胁迫条件下, 随 Pb 胁迫浓度的增大, 金丝草根系生物量在左右两室均呈先增大后减小的变化规律; 不同 Pb 胁迫处理无 Pb 左室根系生物量均大于 Pb 胁迫右室, 左室根系生物量为右

室的 1.9~4.9 倍, 左右两室比值随 Pb 胁迫浓度的增大呈先增大后减小的变化规律; 金丝草地上部分总生物量随 Pb 胁迫浓度的增大呈先增大后减小的变化规律, 说明 Pb 胁迫对金丝草地上部分生长有一定促进作用; 无 Pb 左室、Pb 胁迫右室及整株根冠比均表现为先增大后减小的变化规律。说明轻度 Pb 胁迫条件下金丝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 讨论

Pb 是植物生长的非必需元素, 当其积累到一定量时会对植物产生毒害作用, 从而使植物的形态学特征发生变化<sup>[15-17]</sup>。王宁等<sup>[18]</sup>研究 Cd、Pb 复合胁迫对油菜体内重金属的富集迁移作用表明, 低浓度 Cd、Pb 胁迫对油菜生长有促进作用, 但随胁迫浓度增大, 抑制作用逐渐增大。胡方洁等<sup>[19]</sup>研究 Pb 胁迫对红椿 (*Toona ciliata*) 生长和 Pb 富集特性的影响表明, Pb 胁迫对红椿生长有明显抑制作用, 当 Pb 胁迫浓度为  $2000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, 红椿叶长和叶面积显著小于对照 ( $P<0.05$ )。本研究发现金丝草在 Pb 胁迫浓度  $2500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时仍能正常生长, 对 Pb 胁迫表现出较强的耐性, 而金丝草对 Pb 的耐性是长期适应高浓度 Pb 胁迫环境的结果。胡方洁等<sup>[19]</sup>同时发现 Pb 胁迫使得红椿根茎比发生显著变化, 还加大了其叶凋落程度。本研究发现与种植在无 Pb 污染环境中金丝草的生长状况相比, 生长在高浓度 Pb 污染环境中金丝草的老叶衰老速度较快, 同时分蘖新株的速度也会加快, 与胡方洁等人研究结果一致。孟晓霞等<sup>[20]</sup>研究的 Pb 胁迫对西南山梗菜 (*Lobelia sequinii*) 生长的影响表明, Pb 胁迫对西南山梗菜的生长有明显抑制作用, 其根长、根重和生物量均显著小于对照 ( $P<0.01$ )。在同质 Pb 供应条件下 Pb 超富集植物对 Pb 胁迫的适应响应机制可能不明显, 但在异质 Pb 胁迫条件下的适应响应机

表 6 不同异质 Pb 胁迫条件下金丝草生物量分配

Table 6 Biomass partition of *Pogonatherum crinitum* under heterogeneous Pb stresses

| 处理  | 根系                      |                          |       | 地上部分/g                  | 根冠比   |       |       |
|-----|-------------------------|--------------------------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
|     | 左室/g                    | 右室/g                     | 左/右   |                         | 左室    | 右室    | 总量    |
| JY1 | $0.122\pm0.036\text{c}$ | $0.043\pm0.005\text{d}$  | 2.815 | $0.682\pm0.058\text{d}$ | 0.178 | 0.063 | 0.242 |
| JY2 | $0.320\pm0.027\text{b}$ | $0.065\pm0.008\text{c}$  | 4.944 | $1.032\pm0.093\text{c}$ | 0.310 | 0.063 | 0.373 |
| JY3 | $0.510\pm0.076\text{a}$ | $0.116\pm0.005\text{b}$  | 4.415 | $1.465\pm0.132\text{a}$ | 0.348 | 0.079 | 0.427 |
| JY4 | $0.293\pm0.016\text{b}$ | $0.131\pm0.006\text{b}$  | 2.235 | $1.165\pm0.072\text{b}$ | 0.251 | 0.112 | 0.364 |
| JY5 | $0.305\pm0.023\text{b}$ | $0.161\pm0.022\text{a}$  | 1.893 | $1.159\pm0.070\text{b}$ | 0.263 | 0.139 | 0.402 |
| JY6 | $0.189\pm0.014\text{c}$ | $0.052\pm0.006\text{cd}$ | 3.635 | $1.209\pm0.013\text{b}$ | 0.156 | 0.043 | 0.199 |

制可能会更趋明显,更有利于揭示富集植物对 Pb 富集的内在机制。本研究发现 Pb 胁迫条件下金丝草根长、根体积和表面积在无 Pb 斑块中均大于 Pb 胁迫斑块,随土壤总 Pb 胁迫浓度的增加,金丝草根长、根体积和表面积均呈逐渐增大的趋势,说明金丝草根系对 Pb 胁迫具有较强的适应能力,且可通过根长和表面积的增加,增大与土壤 Pb 的接触,从而提高对 Pb 的富集,但其对 Pb 胁迫耐性有一定的范围。土壤有效养分空间异质性的条件下,一些植物在富养斑块中分配的根系在根系总生长中所占比例较大,即在富养斑块增生能力较强,具有根系的可塑性,这种现象已经得到充分验证<sup>[21-22]</sup>。本研究发现随土壤总 Pb 胁迫浓度的增加,金丝草根长、根体积和表面积在无 Pb 斑块同样呈逐渐增大的趋势,原因可能在于 Pb 斑块中根系的养分利用效率较低,因此需通过无 Pb 斑块根系的增生,以获取自身生长对养分的需求。同时也表明异质 Pb 胁迫条件下金丝草根系存在一定形态可塑性,可通过调节根系生物量在不同斑块的分配,加快无 Pb 斑块根系的生长,从而适应环境高浓度 Pb 胁迫。但由于植物根系形态十分复杂,且埋藏在不透明介质中,因此研究有一定难度,本研究仅探讨了 Pb 胁迫条件下金丝草根系生长指标的变化,对超富集植物根系对重金属胁迫的形态学响应以及植物根系对逆境胁迫的生理响应机制尚不完全清楚,还有待进一步研究。

#### 4 结论

(1)异质 Pb 胁迫条件下,随 Pb 胁迫浓度的增大,金丝草根系和地上部分生物量均呈先增大后减小的变化规律。无 Pb 左室根系和地上部分生物量均在 Pb 胁迫浓度  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  条件下达最大,而 Pb 胁迫右室根系生物量则在 Pb 胁迫浓度  $1500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  条件下达最大,说明金丝草根系对高浓度 Pb 胁迫环境具有强的适应性。

(2)异质 Pb 胁迫对金丝草根长、根体积、表面积影响较明显,但对根平均直径的影响较小;随 Pb 胁迫浓度的增大,金丝草根长、根体积和表面积在无 Pb 和 Pb 胁迫斑块均呈增大的趋势,但无 Pb 斑块均大于 Pb 胁迫斑块。

(3)随 Pb 胁迫浓度的增大,金丝草根冠比表现为先增大后减小的变化规律,表明轻度 Pb 胁迫条件下金丝草根系生物量分配较多,但随 Pb 胁迫浓度的增大,生物量分配倾向于地上部分。

#### 参考文献:

- [1] Ameh E G, Akpah F A. Heavy metal pollution indexing and multivariate statistical evaluation of hydrogeochemistry of River PovPov in Itakpe Iron-Ore mining area, Kogi State, Nigeria[J]. *Advances in Applied Science Research*, 2011, 2(1): 33-46.
- [2] 李瑞琴, 于安芬, 白 滨. 甘肃中部高原露地菜田土壤重金属污染及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 103-110. LI Rui-qin, YU An-fen, BAI Bin. Analysis on current situation and potential ecological risk and the characteristic of heavy metals pollution of soil in the central plateau of Gansu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 103-110.
- [3] 王学礼, 常青山, 侯晓龙, 等. 三名铅锌矿区植物对重金属的富集特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 108-112. WANG Xue-li, CHANG Qing-shan, HOU Xiao-long, et al. Heavy metal enrichment of plants at lead-zinc mines in South China[J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(1): 108-112.
- [4] 唐文浩, 岳 平, 陈恒宇. 海南岛砖红壤中铅、镉的化学形态与转化[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 145-149. TANG Wen-Hao, YUE Ping, CHEN Heng-Yu. Chemical forms and transformations of Pb and Cd in granitic latosol of Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 145-149.
- [5] 闵 焕, 祖艳群, 李 元. Pb 胁迫对圆叶无心菜(*Arenaria rotundifolia* Bieberstein) 生长和生理特征的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(Suppl): 15-19. MIN Huan, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effects of Pb on the growth and physiological characteristics of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl): 15-19.
- [6] 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.
- [7] 常青山. 重金属超富集植物的筛选与整合吸附研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2005. CHANG Qing-shan. Study on seereneing out of heavy metal hyperaccumulators and chelation-adsorption of heavy metals[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2005.
- [8] Engelen D L, Sharpe-Pedler R C, Moorhead K K. Effect of chelating agents and solubility of cadmium complexes on uptake from soil by *Bras-sica juncea*[J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 401-408.
- [9] Donato R J, Roberts L A, Sanderson T, et al. A rabidopsis Yellow Stripe-Like (YSL2): A metal regulated gene encoding a plasma membrane transporter of nicotianamine-meal complexes[J]. *Plant Journal*, 2004, 39(3): 403-414.
- [10] Schwab A P, Al-Assi A A, Banks M K. Adsorption of naphthalene onto plant roots[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(1): 220-224.
- [11] 丛 源, 陈岳龙, 杨忠芳, 等. 北京市农田土壤重金属的化学形态及其对生态系统的潜在危害[J]. 土壤, 2009, 41(1): 39-43. CONG Yuan, CHEN Yue-long, YANG Zhong-fang, et al. Chemical

- forms of heavy metals in soils and potential hazards to ecosystem in Beijing farmlands[J]. *Soils*, 2009, 41(1):39-43.
- [12] 王亚宇, 钱 翌, 朱建雯, 等. 乌鲁木齐市表层土壤 Pb 的化学形态分布及潜在生态危害评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5):106-111. WANG Ya-yu, QIAN Yi, ZHU Jian-wen, et al. Chemical speciation of Pb and its potential ecological risk in urban superficial soils of Urumqi city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5):106-111.
- [13] Banata K M, Howarib F M, Alhamard A A. Heavy metals in urban soils of central Jordan; Should we worry about their environmental risks[J]. *Environmental Research*, 2005, 97(3):258-273.
- [14] 何闪英, 高永杰, 申屠佳丽, 等. 铜和模拟酸雨复合胁迫对酸模铜富集、生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2):481-487. HE Shan-ying, GAO Yong-jie, SHENTU Jia-li, et al. Combined effects of copper and simulated acid rain on copper accumulation, growth, and antioxidant enzyme activities of *Rumex acetosa*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2):481-487.
- [15] 康丽娜, 吴福忠, 何振华, 等. Pb 胁迫对欧美杂交杨(*Populus deltoides*×*Populus nigra*)生物量分配格局及其 Pb 富集特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3):484-490. KANG Li-na, WU Fu-zhong, HE Zhen-hua, et al. Effects of Pb stress on biomass distribution pattern and Pb accumulation in *Populus deltoides*×*Populus nigra*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3):484-480.
- [16] Jusselme M D, Poly F, Edouard Mi, Effect of earthworms on plant *Lantana camara* Pb-uptake and on bacterial communities in root-adhering soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2012, 416(1):200-207.
- [17] Chenery S R, Izquierdo M, Marzouk E, et al. Soil-plant interactions and the uptake of Pb at abandoned mining sites in the Rookhope catchment of the N. Pennines, UK-A Pb isotope study[J]. *Science of The Total Environment*, 2012, 433(9):547-560.
- [18] 王 宁, 南忠仁, 王胜利, 等. Cd/Pb 胁迫下油菜中重金属的分布、富集及迁移特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(3):18-22. WANG Ning, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, et al. Distribution, enrichment and migration characteristics of heavy metals in rape under Cd/Pb stress[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Science)*, 2012, 433(9):547-560.
- [19] 胡方洁, 张 健, 杨万勤, 等. Pb 胁迫对红椿(*Toona ciliata* Roem)生长发育及 Pb 富集特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 31(2):284-291. HU Fang-jie, ZHANG Jian, YANG Wan-qin, et al. Effects of Pb stress on the growth, development and Pb enrichment properties of *Toona ciliata* Roem saplings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 31(2):284-291.
- [20] 孟晓霞, 龙 巍, 郑 超, 等. 铅胁迫对西南山梗菜生长及逆境生理指标的影响[J]. 四川农业大学学报, 2012, 30(3):336-341. MENG Xiao-xia, LONG Wei, ZHENG Chao, et al. Effects of lead stress on growth and physiology of *Lobelia sequinii*[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2012, 30(3):336-341.
- [21] Rosenvald K, Kuznetsova T, Ostonen I, et al. Rhizosphere effect and fine-root morphological adaptations in a chronosequence of silver birch stands on reclaimed oil shale post-mining areas[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(7):1027-1034.
- [22] Johnson H A, Biondini M E. Root morphological plasticity and nitrogen uptake of 59 plant species from the Great Plains grasslands, U. S. A.[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2001, 2(2):127-143.