

## 铅污染对青杨雌雄幼苗铅富集和营养特征的影响

胡相伟, 张明锦, 徐 睿, 杨万勤, 张 健, 陈良华\*

(四川农业大学 生态林业研究所, 四川林业生态工程重点实验室, 成都 611130)

**摘 要:** 该研究以青杨雌雄幼苗为实验材料, 采用盆栽控制实验的方式, 设置 20.5(CK)、50( $T_1$ )和 100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $T_2$ ) 3 个铅浓度水平, 分析面源水平铅污染条件下青杨性别间铅的积累和营养状况的差异。结果表明: (1) 与 CK 相比, 面源水平铅污染条件下, 青杨雄株幼苗的总生物量未受到显著影响, 雌株总生物量显著降低, 但相同处理条件下雌株生物量均显著高于雄株。 (2) 2 个梯度的铅污染均未显著影响两种性别青杨各器官中 N 的浓度, 且雌雄间的性别差异不显著, 但  $T_2$  处理一定程度降低了两种性别各器官中 P 的浓度; 与 CK 相比, 雄株在受铅胁迫处理时 N/P 逐渐增加, 说明此时雄株的生长可能会逐渐受到 P 素营养缺乏的影响。 (3) 随着铅处理浓度的增加, 青杨雌株幼苗对铅的积累总量逐步增加, 但雄株的积累总量的增加却不显著。可见, 青杨雄株在面源水平铅污染条件下的抗性和耐受性优于雌株; 雌雄青杨对土壤铅污染有不同的适应策略, 雌株对铅的积累策略是其生物量下降以及营养平衡受到影响的主要原因, 雄株对铅低吸收的策略使其更适应在铅污染区域生长。

**关键词:** 雌雄异株; 铅胁迫; 面源污染; 青杨

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

## Effects of Pb Pollution on Accumulation of Pb and Nutrient Status of Female and Male Cuttings of *Populus cathayana*

HU Xiangwei, ZHANG Mingjin, XU Rui, YANG Wanqin, ZHANG Jian, CHEN Lianghua\*

(Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering in Sichuan, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** *Populus cathayana*, a native species, is a typical dioecious and fast-growing woody species, which extensively distributed in China, exhibiting good adaptivity to local climates. In the present study, a controlled experiment was conducted to detect differences in Pb accumulation and nutrient status between male and female cuttings of *P. cathayana*, when exposed to diffused levels of Pb pollution. One-year old shoots of both sexes of *P. cathayana* were selected as experimental materials, and each cutting was cultivated in one pot. In our study, three levels of Pb pollution (CK: 20.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $T_1$ : 50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $T_2$ : 100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) were set up. The experiment lasted a grown season (from June 2013 to October 2013). The result showed that: (1) The diffused levels of Pb pollution ( $T_1$  and  $T_2$ ) significantly decreased total biomass of females, but not for that of males. However, in all corresponding treatments, the total biomass of females was significantly higher than that of males. (2) Both levels of Pb pollution ( $T_1$  and  $T_2$ ) did not negatively affect N concentration in all organs of both sexes, and there was no significant difference in N concentration between the sexes. In contrast, the response of P concentration in both sexes was more obvious than that of N

收稿日期: 2014-09-23; 修改稿收到日期: 2015-03-07

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M521707); 国家自然科学基金(31300513); “十二五”国家科技支撑计划(2011BAC09B05); 四川省科技厅应用基础项目(2013JY0083); 四川省教育厅青年基金项目(13ZB0280)

作者简介: 胡相伟(1989—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事林木生理生态学研究。E-mail: 810519377@qq.com

\* 通信作者: 陈良华, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要从事林木生理生态学研究。E-mail: chenlh@sicau.edu.cn

concentration, especially when exposed to the treatment  $T_2$ . The treatment  $T_2$  decreased the P concentration in different organs of both sexes to some degree when compared to the control. When compared to the control, the decrease of N/P ratio in males suggested that growth of males would be restricted by shortage of P gradually. (3) When comes to accumulation capacity of Pb, the total Pb accumulation increased gradually in females, but not in males, along with increasing level of Pb pollution. In conclusion, our results indicated that males' capacity in resistance and tolerance against lead pollution is greater than females, and there is sex-specific adaptive strategy in response to lead pollution. The higher accumulation of Pb in females might be main reason for decreasing its biomass and imbalance in nutrient status, while lower accumulation in males might be in favor for its adaptivity to Pb-contaminated environments.

**Key words:** dioecy; lead; diffused pollution; *Populus cathayana*

随着工农业的快速发展,环境污染问题日益突出,是食品安全和人类健康的重大威胁。环境污染分为点源污染和面源污染,点源污染指具有固定污染排放源的一类污染,而面源污染也称非点源污染,没有固定的污染排放源,具有隐蔽性、分散性、不易监测性及受多因子影响等特点<sup>[1-2]</sup>。20 世纪 70 年代以后,发达国家开始对污染进行整治,工业三废和城市生活污染得到有效控制,即点源污染对环境的危害在逐步减小,而面源污染的影响则日益突显。目前,中国对点源污染也已逐渐加大控制力度,正处于污染构成的快速转变期,面源污染占污染的比重日益增加<sup>[3]</sup>,但植物对面源水平污染的生理生态研究还相当缺乏,所以尤其需要进行一些低水平污染的环境修复研究。

植物修复技术是治理面源污染的重要技术之一。与其他方法相比,植物修复技术具有廉价易操作、生态环境友好和易受大众认可等优点<sup>[4]</sup>。传统的思维方式中,最佳的植物修复材料是超富集植物,这类植物因其具有超强的重金属积累能力和耐受力使其能在重金属浓度极高的土壤中生长繁衍。但是,绝大多数超富集植物都是草本植物,具有很多缺点,诸如生物量低、生长缓慢,对生物气候条件要求严格,不利于大范围推广,且专一性强,一般仅富集一种到两种特定的重金属。此外,这类植物如果没有及时收割回收,很容易因植物器官的凋落和腐烂,导致重金属重返土壤,降低了修复效率<sup>[5-7]</sup>。然而,选用对重金属具有一定耐性,但因巨大生物量使富集总量超过超富集植物的速生木本植物,也会产生良好的修复效果<sup>[8-9]</sup>。木本植物在修复土壤的同时,还能提供木材和生物能源,并通过根和茎大量固定重金属,阻碍其进入食物链<sup>[10-11]</sup>。杨柳科植物具有速生丰产、适应性强、根系发达、繁殖容易等优点,且不容易进入食物链,还具有可观的经济和生态价值,其在重金属修复方面的前景日益受到重视<sup>[12-13]</sup>。

本研究选用的速生木本植物青杨(*Populus cathayana* Rehd.),属于杨柳科(Salicaceae)杨属(*Populus* L.)植物,原产中国,分布广泛,是典型的雌雄异株植物,具有生长快、抗性强、易成活、适性广等优良特性<sup>[14]</sup>。已有的研究表明在温度适宜、气候湿润的生境中,青杨雌株比雄株生长上具有优势,然而受到环境胁迫(如干旱、高低温以及淹水等)后雄株则表现出更强的适应性和耐受性<sup>[15-19]</sup>,但目前对环境污染条件下青杨性别间差异的研究还非常缺乏。初步的野外调查发现,不同污染的区域,青杨雌雄生长和分布情况有所不同,重度污染区青杨性比偏雄性,在轻度污染区则偏雌性。这说明污染区青杨雌雄株的空间分异和生殖格局也可能与环境污染程度相关。因此,有必要进行性别间重金属胁迫耐受性差异的研究,这类研究可以为重金属污染植物修复时的性别选择提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

扦插所用一年生青杨枝条来自青海省大通县国有林场(101°35'E;35°56'N)。实验用土取自四川农业大学成都校区附近的稻田土壤,土壤基本理化性质为:有机碳含量  $10.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,铵态氮含量  $3.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,硝态氮含量  $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷含量  $37.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量  $11.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,含水量 22.30%,pH 7.56。实验采用盆栽方式,每盆装稻田土 15 kg,塑料花盆口径 30 cm,深 25 cm。

### 1.2 实验设计

本实验采用双因素(性别和铅处理)完全随机区组设计。根据中国土壤环境质量标准(GB15618-2008)中铅污染物的第二级标准值来设定本研究的污染梯度,即超过  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  为污染土壤;本研究中每种性别各设置  $20.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (土壤背景值,对照,CK)、 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (轻度污染,  $T_1$ )、 $100 \text{ mg} \cdot$

kg<sup>-1</sup>(中度污染,T<sub>2</sub>)3个铅浓度水平,均以干土质量计算;T<sub>1</sub>和T<sub>2</sub>是将Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>与去离子水配成50 μmol·L<sup>-1</sup>的浓度施入土壤,在充分混匀平衡1月后用于盆栽实验。

2013年3月选取健壮、无病害、粗细一致的一年生雌雄青杨枝条,剪成长度相当的小节,扦插在苗床上;待扦插苗萌发生长至6月初,选取长势一致的青杨幼苗(约15 cm)移栽入各处理花盆土壤中,每盆1株,雌雄幼苗每个处理各9株,共54株。青杨幼苗移栽后,实验处理在仅遮蔽雨水的大棚中进行,对所有供试植株进行统一浇水、除草防虫和防病等管理,控制浇水量以避免多余水分流出塑料盆。

1.3 样品处理

2013年10月中旬,每个处理随机选取雌雄幼苗各5株,全株收获并分为根、茎和叶,用去离子水擦净表面,先于105℃烘箱中杀青0.5 h,然后调至65℃烘干至恒重,计算单株青杨根、茎、叶生物量和总生物量。将每一株根、茎和叶样品分别粉碎研磨后过筛混匀,以备植物营养元素和铅含量的测定。

植物样品经H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>混合酸消煮后测定N和P的含量,N含量采用半微量凯氏定氮法,P含量采用钼锑抗比色法测定。植物样品经HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>混合酸消化后,使用岛津AA-7000火焰原子吸收光谱仪测定Pb含量。

1.4 数据分析

应用SPSS 18.0统计软件进行数据分析和处理,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)计算均值和标准误;不同处理间的差异采用Tukey多重比较检验;采用多因素方差分析性别和铅处理间的交互作用;显著性水平设置为α=0.05。最后将以上操作所得的数据和分析结果录入Origin 8作图。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫对青杨雌雄幼苗生物量的影响

如表1所示,与CK相比,青杨雌雄幼苗叶生物量、根生物量和根冠比在两个升高的铅浓度下均无显著变化;雌雄幼苗茎生物量均随铅处理浓度的升高逐渐下降,雌株在T<sub>1</sub>和T<sub>2</sub>处理下分别比相应CK减小13.9%和18.1%,雄株则分别减小15.4%和19.7%;雌株总生物量在T<sub>1</sub>和T<sub>2</sub>处理下分别比相应CK显著降低了14.1%和17.8%,而雄株总生物量则在3种处理下无显著差异。同时,在相同铅胁迫处理条件下,根生物量和总生物量在不同性别间均表现出极显著差异,且雌株均显著高于雄株。此外,多因素方差分析表明,根生物量受到了铅与性别交互作用的显著影响,也就是说,对于根系生物量这一因变量而言,仅研究铅或者性别的单独效应是不够的,还须根据另一因素的不同水平研究该因素的作用大小。

2.2 铅胁迫对青杨雌雄幼苗营养元素的分配

青杨雌雄幼苗各器官N浓度均未受铅处理的显著影响(图1,A)。但因铅处理导致的各器官生物量积累的变化,随着铅处理浓度的增加,青杨雌株幼苗叶和茎N贮量逐渐降低,T<sub>2</sub>处理下茎部N贮量显著低于CK处理,而雄株各器官N贮量受铅处理的影响不显著;同时,在相同铅处理条件下,青杨雌株的叶和根中N的贮存总量显著高于雄株,而茎中氮贮存总量在雌雄株间无显著差异(图1,B)。

总体来看,青杨雌雄幼苗各器官P浓度在T<sub>1</sub>和T<sub>2</sub>处理下比相应CK有不同程度降低(在T<sub>1</sub>处理条件下叶片的变化除外);与CK相比,雌株叶片P浓度在T<sub>1</sub>处理下显著增加,却在T<sub>2</sub>处理下显著

表1 面源污染水平铅处理下青杨雌雄幼苗生物量积累及分配

Table 1 Dry matter of accumulation in different organs and its characteristic of allocation in females and males of *P. cathayana* when exposed to diffused levels of Pb pollution

性别 Sexual	铅处理 Pb treatment	叶生物量 Leaf biomass/g	茎生物量 Stem biomass/g	根生物量 Root biomass/g	总生物量 Total biomass/g	根冠比 Root-shoot ratio
雌 Female	CK	27.50±0.42a	26.41±0.61a	19.75±1.32a	73.67±2.07a	0.36±0.02a
	T <sub>1</sub>	25.00±0.90a	22.75±1.28ab	15.52±0.82a	63.27±1.39b	0.32±0.02ab
	T <sub>2</sub>	23.35±1.55a	21.64±0.64bc	15.59±1.26a	60.58±1.43b	0.34±0.03a
雄 Male	CK	16.57±0.74b	22.19±0.72ab	6.69±0.65b	45.45±1.85c	0.17±0.01c
	T <sub>1</sub>	15.60±0.58b	18.78±1.18bc	7.02±0.39b	41.39±1.80c	0.20±0.01c
	T <sub>2</sub>	12.97±1.27b	17.81±0.83c	7.52±1.17b	38.30±3.10c	0.24±0.02bc

注:CK、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 铅浓度分别为 20、50、100 mg·kg<sup>-1</sup>干土;同一列中不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著(Tukey 法);下同。

Note:CK,T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub> represent Pb concentration are 20, 50 and 100 mg·kg<sup>-1</sup> dry soil, respectively; Different letters within a column indicate that there are significant differences among the treatments at the 0.05 level according to Tukey test; The same as below.

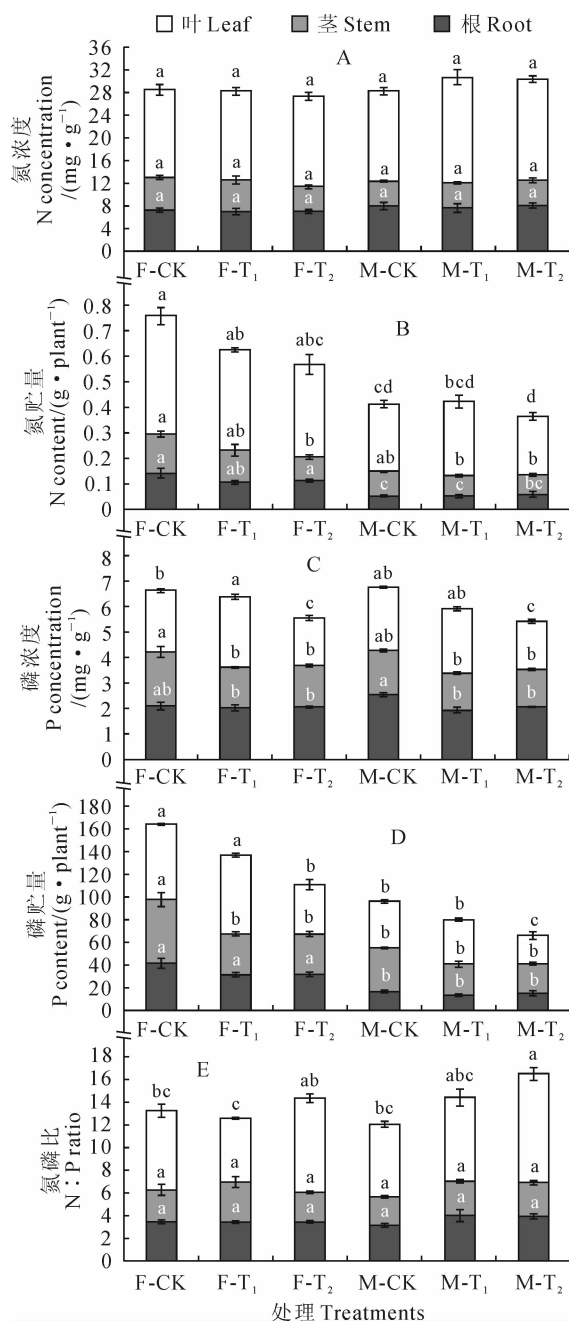


图1 铅污染环境下青杨雌雄幼苗  
各器官的氮磷含量及其比值变化

F-CK、F-T<sub>1</sub>、F-T<sub>2</sub> 和 M-CK、M-T<sub>1</sub>、M-T<sub>2</sub> 分别代表  
雌株和雄株 CK、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理。同一器官

不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著差异;下同

Fig. 1 The contents of N, P, and ratio of N to P in  
different organs of females and males of *P. cathayana*  
exposed to diffused levels of Pb pollution

F-CK, F-T<sub>1</sub>, F-T<sub>2</sub> and M-CK, M-T<sub>1</sub>, M-T<sub>2</sub> represents for the  
treatments CK, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> in females and males, respectively.

The values with different letters within the same organ  
indicate significant difference between the treatments

at 0.05 level; The same as below

减少,而雄株 T<sub>2</sub> 处理叶片的 P 浓度显著降低(图 1, C)。与 N 积累总量的变化趋势相似,雌雄青杨幼苗各个器官 P 积累量在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 铅处理下表现出一定程度下降,尤其是对地上部分的器官;与 CK 相比, T<sub>2</sub> 处理显著减小了雌株茎和叶片中 P 的积累总量,但仅减小了雄株叶片中 P 的积累总量(图 1, D)。多因素方差分析表明,青杨幼苗各器官 P 浓度和总量均受到铅处理的显著影响。

与 CK 相比,雌雄青杨的茎和根中 N/P 在铅胁迫处理下均未发生显著的变化;雌株叶片中 N/P 在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理下先降低后升高,但均未达到显著水平,而雄株叶片中 N/P 在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理条件下逐渐增加,并在 T<sub>2</sub> 处理条件下达显著水平(图 1, E)。多因素方差分析表明,仅青杨叶片的 N/P 受到铅胁迫的显著影响。

### 2.3 铅胁迫对青杨雌雄幼苗铅分布和积累的影响

从图 2, A 可以看出,不同浓度铅处理对青杨幼苗根部铅浓度有显著影响,随着铅处理浓度的增加,两种性别幼苗根部铅浓度均显著升高;雌株叶片和茎中铅浓度也随着铅处理浓度的增加而有不同程度的升高,但雄株叶片和茎部铅浓度均没有显著的变化。另外,雄株叶片和茎中铅浓度在 CK 和 T<sub>1</sub> 处理下均显著高于雌株,而在 T<sub>2</sub> 处理下与雌株无显著性差异;雄株根部铅浓度在 CK 条件下显著高于雌株,在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理条件下均低于雌株,并在 T<sub>2</sub> 处理下达到显著水平。多因素方差分析表明,青杨各器官铅浓度均受到性别、铅处理及性别和铅处理交互作用的显著影响。

同时,与器官铅浓度的变化规律相似,青杨雌雄幼苗根部铅贮量在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理下均比 CK 显著升高(雄株 T<sub>1</sub> 处理除外);雌株叶部铅贮量仅在 T<sub>2</sub> 处理下显著高于 CK,而雄株叶片的铅贮量在各处理间差异均不显著;雌雄幼苗茎部铅贮量在各处理间差异均不显著(图 2, B)。与 CK 相比, T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理均显著增加了雌株铅总积累量,且 T<sub>2</sub> 处理显著高于 T<sub>1</sub> 处理;雄株铅总积累量在 3 种处理间差异均不显著。在相同铅胁迫条件下,雌株总铅贮量只有在 CK 处理下低于雄株,在 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理下均明显高于雄株,尤其是在 T<sub>2</sub> 处理条件下是雄株的 1.93 倍(图 2, C)。多因素方差分析表明,性别和铅处理的交互作用对青杨各器官及总铅积累量有显著影响。

此外,转移系数是植物地上部分重金属浓度与地下部分重金属浓度的比值<sup>[20]</sup>。从图 2, D 可以看

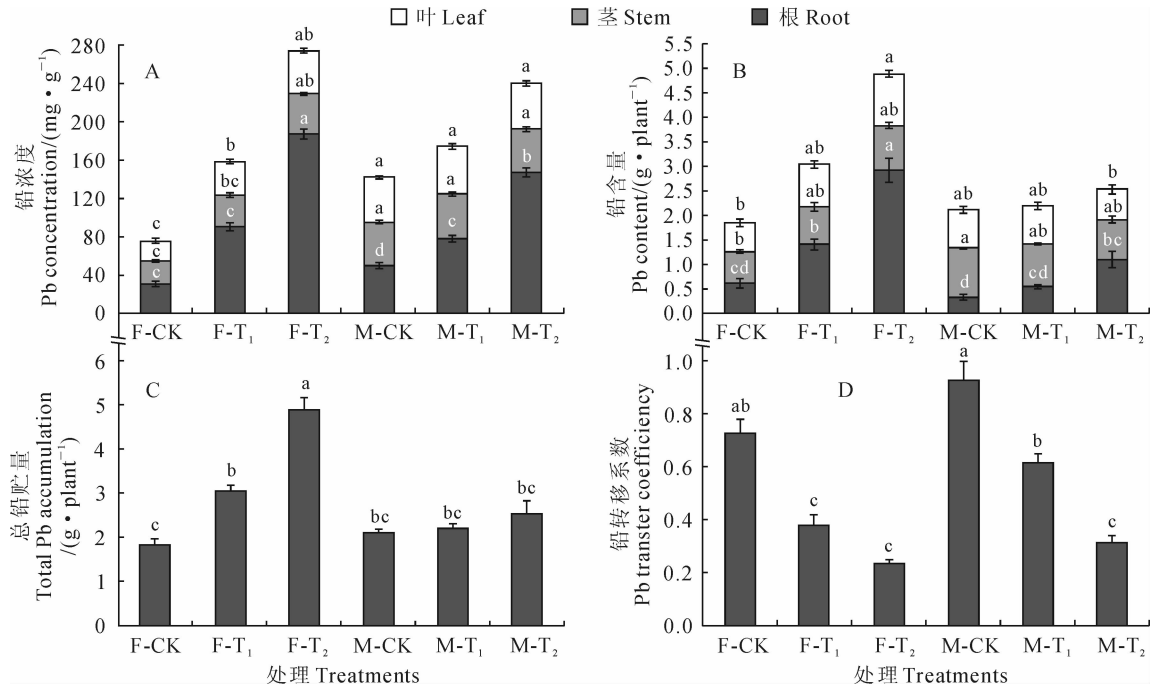


图 2 铅污染环境下青杨雌雄幼苗铅的积累与分配的变化  
Fig. 2 The Pb accumulation and allocation in different organs of females and males of *P. cathayana* under Pb pollution

出,随着铅处理浓度的增加,青杨两种性别幼苗铅转移系数均比 CK 显著下降,T<sub>2</sub> 处理又比 T<sub>1</sub> 处理明显下降,并在雄株中达到显著水平。在相同铅处理条件下,雄株各器官铅转移系数均高于相应雌株,但仅在 T<sub>1</sub> 处理条件下达到显著水平。多因素方差分析表明,青杨幼苗铅转移系数受到性别和铅处理的显著影响。

### 3 讨 论

铅是植物的非必需元素,当植物体内铅离子过量时就会对自身细胞产生毒害作用,进而对其生长产生一定的负面影响,如抑制植物生物量生产,改变了生物量分配格局等<sup>[21]</sup>。本研究表明,即使在很低的铅污染水平,如面源污染水平(50 mg·kg<sup>-1</sup>干土)同样对青杨两种性别的茎生长产生了一定的负面影响。同时,前人的研究表明,雌雄异株植物因其繁殖成本的差异和在不同生境中的长期适应进化,导致其在分布、存活、生长、生理和资源分配等方面表现出明显的性别差异<sup>[22]</sup>,当受到逆境胁迫时,这种差异会更为明显<sup>[15-17,23]</sup>,且雌株的环境适应性更差,对资源具有较高的要求<sup>[24]</sup>。本研究发现,低水平铅污染对青杨雄株幼苗的生物量未造成显著影响,却显著降低了雌株生物量,这些结果说明雌株对铅污染更加敏感,青杨雄株则具有更强的铅污染适

应性。另外,根冠比是衡量生物量分配的重要指标。杨鹏等<sup>[17]</sup>对青杨幼苗进行淹水和铝胁迫处理,发现其根冠比显著下降,表明这些逆境条件显著抑制了青杨幼苗生物量向根系的正常分配,进而影响了植株对水分和矿质营养的吸收。本研究中,面源水平铅处理对青杨幼苗的根冠比无显著影响,说明面源铅污染并没有对青杨生物量的分配产生负面影响,但从营养元素的测定来看,面源铅污染同样造成了青杨的营养失衡,尤其是 P。该研究结果表明虽然面源铅污染没有改变生物量在地上与地下部分的分配,但可能影响到了根的结构与功能,这值得进一步深入研究。

植物各器官养分浓度的差异一定程度上表征了植物受逆境伤害的程度。N 是植物体内蛋白质、核酸、叶绿素以及多种酶的重要组成成分,在植物生命活动中占有重要地位,因此其在代谢旺盛器官中(如叶片)的分配相当关键,而 P 在 ATP 反应、糖类代谢、蛋白质代谢、脂类代谢中起重要作用,并对细胞分裂和植物各器官分化发育,特别是开花结实具有重要作用<sup>[25]</sup>。本实验中,与 CK 相比,各铅污染处理对青杨幼苗各器官的 N 浓度无显著影响,说明这一水平的铅污染并没有对青杨 N 的吸收以及同化产生显著的负面影响。与 N 浓度的变化相比,铅污染对青杨 P 浓度产生了一定的抑制,尤其是雌株,

雌株 P 的失衡可以是影响其正常生长的重要原因,可以预见的是,由铅污染导致的长期 P 失衡很可能会降低其代谢速率,影响雌株正常的生长发育。此外, N 和 P 在植物体内的积累和分配格局可以更为直观地表征植物对环境的响应<sup>[26]</sup>, 植物 N/P 可用做 N 饱和的诊断指标, 可用来确定养分限制的阈值; 有研究表明, N/P 低于 14 可以反映植物受 N 限制, 高于 16 时表明植物受 P 限制, 介于 14 和 16 之间时受 N 和 P 协同限制<sup>[27]</sup>。本研究中的土壤背景下, 经过一个生长季的生长, 生长季末期青杨两种性别幼苗各器官的 N/P 均低于 10, 说明此时土壤养分供应不充足, 植物主要是缺 N, 导致青杨幼苗的生长受到 N 的限制。铅污染条件下, 雌株通过降低生物量, 使其各器官中 N/P 维持在一个相对稳定的水平, 但对雄株而言, 叶片 N/P 随着铅处理浓度的升高逐渐增加, 可能是因为在铅污染条件下雄株的正常生长引起了由 N 限制向 P 限制转变的趋势。

已有研究表明, 植物不同器官对重金属的吸收、积累能力存在着较大的差异<sup>[28]</sup>, 本研究表明青杨不同性别间对重金属的积累与分配同样存在差异, 随着铅处理浓度的增加, 青杨雌雄幼苗根部对铅的吸收和积累量显著增加, 并且雌株增加的幅度要大于雄株; 对于地上部分而言, 铅处理条件下雄株地上部分铅浓度并未显著增加, 而雌株地上部分器官均显著增加(尤其是 T<sub>2</sub> 处理)。这些结果说明, 铅在青杨雌株幼苗体内容易向地上部分运输和积累, 但是叶片作为光合作用的主要器官, 同样也是植物最为敏感的器官, 铅的过量积累可能会产生毒理作用, 这可能是其生物量下降的主要原因。从植物修复的角

度来看, 雌株在两个铅污染浓度处理条件下, 雌株幼苗总铅积累量均高于雄株, 且随着铅污染水平的提高有进一步的增加趋势, 说明两种性别对铅污染的适应策略不相同, 雌株高积累的特性能够促进土壤中更多有效态铅被固定在雌株生物体内, 有利于铅的植物修复, 但对其生长必然产生一定的负面影响, 雄株则采取了排斥的策略<sup>[29]</sup>, 以保证它的正常生长。从铅转移系数来看, 随着铅污染强度的增大, 青杨雄株的铅转移系数进一步减小, 这就有效限制了铅向其地上部敏感器官的运输和分配, 可以减轻雌株的地上部分器官受到的铅离子毒害, 有利于其保持较好的生长<sup>[30]</sup>。

综上所述, 在面源水平铅污染情况下, 青杨雌株幼苗生物量与正常状况相比无显著差异, 而雌株生物量受到铅的显著负面影响, 表明青杨雌株受到铅污染的负面影响更大, 雌株对环境胁迫更为敏感。两个梯度的铅污染均未对青杨两种性别的 N 营养造成显著影响, 但对 P 营养的影响显著, 雄株在污染条件下较为正常的生长可能会导致它更为缺 P。虽然雌株生物量在受到铅污染后显著降低, 但各污染条件下雌株的总生物均显著高于雄株, 加之雌株具有更强的铅吸收和积累能力(尤其是根部), 使得雌株根部对铅的积累总量显著高于雄株。值得注意的, 虽然面源铅污染导致了雌株生物量一定程度的下降, 但在外观上并没有表现出一定的毒理症状。因此, 从污染修复的角度来讲, 青杨雌株对受铅污染土地的修复能力要强于雄株, 但对于污染较为严重的地区, 雄株较强的适应能力使得其更适应该地区的生态恢复。

## 参考文献:

- [1] ZHANG SH L(张水龙), ZHUANG J P(庄季屏). Current situation and development tendency of researches of non-point source pollution in agriculture[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 1998, **17**(6): 51—55(in Chinese).
- [2] SONG J Y(宋家永), LI Y T(李英涛), SONG Y(宋宇), *et al.* Research and prospect on non-point pollution from agriculture[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*(中国农学通报), 2010, **26**(11): 362—365(in Chinese).
- [3] ZHAO Y H(赵永宏), DENG X ZH(邓祥征), ZHAN J Y(战金艳), *et al.* Study on current situation and controlling technologies of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*(安徽农业科学), 2010, **38**(5): 2 548—2 552(in Chinese).
- [4] SAIFULLAH, MEERS E, QADIR M, *et al.* EDTA-assisted Pb phytoextraction[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(10): 1 279—1 291.
- [5] HAMMER D, KAYSER A, KELLER C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Salix viminalis* in field trials[J]. *Soil Use and Management*, 2003, **19**(3): 187—192.
- [6] ZHOU ZH M(周振民), ZHU Y Y(朱彦云). Research progress of phytoremediation technology of large biomass plant[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*(灌溉排水学报), 2009, **28**(6): 26—29(in Chinese).
- [7] YE Z H, SHU W S, ZHANG Z Q, *et al.* Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques

- [J]. *Chemosphere*, 2002, **47**(10): 1 103—1 111.
- [8] WEI X W(韦秀文), YAO B(姚 斌), LIU H W(刘慧文), *et al.* Application of dendroremediation to the soil contaminated soil by heavy metals and organic pollutants[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2011, **47**(5): 124—130(in Chinese).
- [9] CHEN L H, GAO S, ZHU P, *et al.* Comparative study of metal resistance and accumulation of lead and zinc in two poplars[J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, **151**(4): 390—405.
- [10] ZHANG D W(张东为), CUI J G(崔建国), GE S F(戈素芬), *et al.* Effect of Cd contamination in soil on growth of poplar of different varieties[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*(水土保持通报), 2008, **28**(3): 59—64(in Chinese).
- [11] SHI X(施 翔), CHEN Y T(陈益泰), WANG SH F(王树凤), *et al.* Growth and metal uptake of three woody species in lead/zinc copper mine tailing[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2011, **31**(7): 1 818—1 826(in Chinese).
- [12] SEBASTIANI L, SCEBBA F, TOGNETTI R. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano(*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214(*P. × euramericana*) exposed to industrial waste[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, **52**(1): 79—88.
- [13] LIU W T(刘维涛), ZHANG Y L(张银龙), CHEN K M(陈枯敏), *et al.* Cadmium and zinc adsorption and distribution in various tree species in a mining area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2008, **19**(4): 752—756(in Chinese).
- [14] QI L W(齐力旺), ZHANG SH G(张守攻), HAN S Y(韩素英), *et al.* Karyotype comparison of *Populus* Sect. *Tacamahaca*[J]. *Acta Botanica Yunnanica*(云南植物研究), 2004, **26**(5): 537—542(in Chinese).
- [15] XU X, YANG F, XIAO X W, *et al.* Sex-specific responses of *Populus cathayana* to drought and elevated temperatures[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2008, **31**(6): 850—860.
- [16] ZHANG S, JIANG H, PENG S M, *et al.* Sex-related differences in morphological, physiological, and ultrastructural responses of *Populus cathayana* to chilling[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, **62**(2): 675—686.
- [17] YANG P(杨 鹏), XU X(胥 晓). Effects of waterlogging stress on the growth and physiological characteristics of male and female *Populus cathayana* seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2012, **36**(1): 81—87(in Chinese).
- [18] CHEN L H, WANG L, CHEN F G, *et al.* The effects of exogenous putrescine on sex-specific responses of *Populus cathayana* to copper stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **97**: 94—102.
- [19] CHEN L H, ZHANG L, TU L H, *et al.* Sex-related differences in physiological and ultrastructural responses of *Populus cathayana* to Ni toxicity[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, **36**(7): 1 937—1 946.
- [20] MATTINA M I, LANNUCCI-BERGER W, MUSANTE C, *et al.* Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, **124**(3): 375—378.
- [21] KANG L N(康丽娜), WU F ZH(吴福忠), HE ZH H(何振华), *et al.* Effects of Pb stress on biomass distribution pattern and Pb accumulation in(*Populus deltoides* × *Populus nigra*)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*(农业环境科学学报), 2012, **31**(3): 484—490(in Chinese).
- [22] DAWSON T E, EHRLINGER J R. Gender-specific physiology, carbon isotope discrimination, and habitat distribution in Boxelder, *Acer Negundo*[J]. *Ecology*, 1993, **74**: 798—815.
- [23] LI J Y(李俊钰), XU X(胥 晓), YANG P(杨 鹏), *et al.* Effects of aluminum stress on ecophysiological characteristics of male and female *Populus cathayana* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(1): 45—50(in Chinese).
- [24] CHEN L H, DONG T F, DUAN B L. Sex-specific carbon and nitrogen partitioning under N deposition in *Populus cathayana*[J]. *Trees-Structure and Function*, 2014, **28**(3): 793—806.
- [25] PATTERSON T B, GUY R D, DANG Q L. Whole-plant nitrogen-and water-relations traits, and their associated trade-offs, in adjacent muskeg and upland boreal spruce species[J]. *Oecologia*, 1997, **110**(2): 160—168.
- [26] WU F Z, YANG W Q, WANG K Y, *et al.* Effect of stem density on leaf nutrient dynamics and nutrient use efficiency of dwarf bamboo[J]. *Pedosphere*, 2009, **19**(4): 496—504.
- [27] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N P ratio a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1 441—1 450.
- [28] SUN Y B, ZHOU Q X, XU Y M, *et al.* Phytoremediation for co-contaminated soils of benzo[a]pyrene(B[a]P) and heavy metals using ornamental plant *Tagetes patula*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2—3): 2 075—2 082.
- [29] BAKER A J M. Metal tolerance[J]. *New Phytologist*, 1987, **106**(S1): 93—111.
- [30] WOZNY A, KRZESLOWSKA M, TOMASZEWSKA B. Lead in Plant Cells[M]. Sorus, Poznan, Poland, 1995.

(编辑:裴阿卫)