

# 铅胁迫对欧美杂交杨幼苗碳、氮和磷积累与分配的影响

康丽娜 吴福忠 杨万勤\* 谭波 夏磊

四川农业大学生态林业研究所, 四川省林业生态工程重点实验室, 成都 611130

**摘要** 为深入了解欧美杂交杨(*Populus deltoids* × *Populus nigra*)在不同铅(Pb)胁迫条件下的生长适应特性, 采用盆栽控制试验, 研究了长江上游典型酸性紫色土和钙质紫色土上欧美杂交杨碳(C)、氮(N)和磷(P)积累与分配特征对不同浓度Pb胁迫(CK: 0 mg·kg<sup>-1</sup>; T1: 200 mg·kg<sup>-1</sup>; T2: 450 mg·kg<sup>-1</sup>; T3: 2 000 mg·kg<sup>-1</sup>)的响应。欧美杂交杨总C、N和P积累量在两种土壤中均表现出随Pb胁迫程度的增加而降低的趋势, 且钙质紫色土中欧美杂交杨总C、N和P积累量在各处理浓度下均高于酸性紫色土。Pb胁迫处理明显改变了欧美杂交杨各器官C、N和P的分配格局。与对照相比, Pb胁迫处理使酸性紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显增加, 叶C、N和P积累量的比例则呈现出降低的趋势。相对于酸性紫色土, 钙质紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显降低, 其叶C、N和P积累量的比例则表现出增加的趋势。两种土壤中欧美杂交杨P的利用效率均表现出随Pb胁迫程度的增加而增加的趋势, 而T2、T3处理下两种土壤中N的利用效率均显著降低。这些结果表明, 在N素缺乏的情况下, 酸性紫色土中欧美杂交杨P的利用效率显著低于钙质紫色土, 因此酸性紫色土中植物C、N和P积累、分配与利用更易受到Pb胁迫的影响。同时也表明, 钙质紫色土中欧美杂交杨通过改变养分分配格局将资源更多地分配于养分利用器官维持自身的生长, 能更好地适应Pb胁迫环境。

**关键词** 酸性紫色土, 钙质紫色土, 养分利用, 铅胁迫, 欧美杂交杨

## Effects of Pb stress on C, N and P accumulation and allocation in *Populus deltoids* × *P. nigra* seedlings

KANG Li-Na, WU Fu-Zhong, YANG Wan-Qin\*, TAN Bo, and XIA Lei

Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecological Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

### Abstract

**Aims** Little information has been available on the effects of soil Pb pollution on plant nutrition. Our objective was to characterize the responses of poplar (*Populus deltoids* × *P. nigra*) in C, N and P accumulation and N and P use efficiency under different Pb stresses in acidic purple soil and alkaline purple soil.

**Methods** A controlled pot experiment using one-year old poplar was arranged with different treatments of four Pb concentrations (CK: 0, T1: 200, T2: 450 and T3: 2 000 mg·kg<sup>-1</sup>) in the field. Concentrations of C, N and P in plant components were measured over one growing season. We calculated C, N and P accumulation and N and P use efficiency.

**Important findings** Accumulations of C, N and P in poplar declined with increased Pb supplies in both acidic purple soil and alkaline purple soil. Accumulations of C, N and P in alkaline purple soil were larger than in acidic purple soil. Distribution patterns of C, N and P in poplar were altered in both soils when supplied with different Pb concentrations. C, N and P accumulation in fine roots significantly increased with increased Pb supplies in acidic purple soil, but decreased in fallen leaves. In contrast, C, N and P accumulation in fine roots decreased with increased Pb supplies in alkaline purple soil, but increased in fallen leaves. In addition, P use efficiency of the poplar in both soils increased with increased Pb supplies, but the N use efficiency significantly decreased under treatments T2 and T3. Results indicated that the accumulation of C, N and P in poplar had been inhibited and nutrient use efficiency of the plant had been altered by Pb stress. Moreover, the effects of Pb stress on nutrient accumulation, distribution and utilization by poplar were much less in alkaline soil compared to acidic soil.

**Key words** acidic purple soil, alkaline purple soil, nutrients utilization, Pb stress, *Populus deltoids* × *P. nigra*

人类社会工业化与城市化的快速发展, 农业生产中化肥、农药的过度应用, 富铅(Pb)燃料的大量使用等使得土壤Pb污染不断加剧, 严重威胁到环境安全及人类的生存健康(周启星等, 2007; Sinhal *et al.*, 2010; Beladi *et al.*, 2011)。Pb易被土壤吸附, 影响正常的土壤生态过程和植物生理代谢, 往往抑制植物生长。一方面, 土壤中Pb的大量存在可能直接影响土壤养分矿化, 导致土壤中养分元素的有效性降低(Gopal & Rizvi, 2008; Ashraf *et al.*, 2011), 进而影响植物对养分元素的吸收和利用(Reddy *et al.*, 2005; Sharma & Dubey, 2005); 另一方面, Pb还能通过抑制植物根系的生长(Qureshi *et al.*, 2007; 李亚藏和王庆成, 2011), 增加质膜透性等进一步降低植物碳同化的能力及新陈代谢的速率。为了更好地适应胁迫环境, 植物往往通过改变资源分配与利用格局等方式维持自身相对较好的生长发育(吴福忠等, 2010)。然而, 已有的研究更加关注重金属在植物-土壤系统中的迁移、转化和富集过程。因此, 充分认识Pb胁迫条件下植物养分的积累与分配特征, 对于揭示重金属污染环境中植物的生长适应性机制具有重要意义。

酸性紫色土和钙质紫色土是长江上游四川盆地两种典型的土壤类型, 由于土壤形成背景和工农业等活动的干扰, 土壤Pb污染日趋加剧, 严重威胁着植被的生长及当地人的生存(简毅等, 2009)。欧美杂交杨(*Populus deltoids* × *P. nigra*)生长量大、适应性广、抗逆能力强且繁殖容易, 可以很好地用于重金属污染土壤修复实践中(Wu *et al.*, 2010; Rafati *et al.*, 2011)。因此, 以欧美杂交杨为研究对象, 研究典型Pb污染酸性紫色土和钙质紫色土上不同程度Pb胁迫下欧美杂交杨幼苗对限制养分(氮(N)和磷(P))的积累与分配特征, 分析中等程度Pb胁迫与极端浓度Pb胁迫对欧美杂交杨幼苗生长适应与养分利用

机制的影响, 了解不同土壤条件下欧美杂交杨对Pb污染的耐性, 以期深入认识Pb污染条件下植物生长适应过程提供基础数据, 同时为Pb污染地区相关植物栽培利用提供理论支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地点和试验材料

试验地点为四川农业大学雅安校区农场(102°59' E, 29°58' N, 海拔620 m)。该地区属典型的华西雨屏区, 属中纬度内陆亚热带湿润气候, 具有冬无严寒、夏无酷暑、气候温和、昼夜温差小、立体气候明显等特征。年降水量1 732 mm, 多年平均蒸发量838.8 mm, 多年平均气温16.1 °C, 城区多年平均日照时数为1 019 h, 多年日照率为23%, 多年平均无霜期为298天(张健, 2009)。

供试土壤为酸性紫色土和钙质紫色土, 均采自四川农业大学读书公园。立地条件分别为林地及林地与农田过渡带, 试验采用0–20 cm的表层土壤。供试土壤基本理化性质见表1。试验材料为欧美杂交杨扦插苗, 该品种在试验中表现出良好的适应性、速生性和抗病性。

### 1.2 试验设计

为了解欧美杂交杨对Pb污染环境的耐受性及其在不同程度Pb污染条件下的生长适应特征, 根据国家环境质量和四川盆地重金属污染发展概况(Wu *et al.*, 2010), 本试验设置4个Pb胁迫梯度: 对照CK (0 mg·kg<sup>-1</sup>干土, 以Pb计)、T1 (200 mg·kg<sup>-1</sup>干土, 以Pb计)、T2 (450 mg·kg<sup>-1</sup>干土, 以Pb计)、T3 (2 000 mg·kg<sup>-1</sup>干土, 以Pb计)。

2010年2月采集供试土壤。土壤样品采回后经自然风干、磨碎、过筛(留取部分进行土壤背景值测定), 充分混匀后堆积60天装入陶盆(上口径为36 cm, 下口径25 cm, 高25 cm), 每盆装土14 kg (干土)。

表1 供试土壤基本理化性质及重金属含量(平均值±标准偏差)

Table 1 Basic physical and chemical properties and contents of heavy metals in test soil (mean ± SD)

	pH	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorous (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium (g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	全铅 Total plumbum (mg·kg <sup>-1</sup> )
酸性紫色土 Acid purple soil	5.77 ± 0.06	2.21 ± 0.08	0.53 ± 0.04	14.54 ± 0.67	19.65 ± 1.05	47.12 ± 3.67
钙质紫色土 Alkaline purple soil	8.33 ± 0.07	3.11 ± 0.09	1.29 ± 0.04	20.97 ± 1.25	14.37 ± 1.37	30.48 ± 2.85

2010年3月12日在欧美杂交杨萌动前采集插条,选取粗细均匀、生长良好的1年生半木质化插条,扦插于盆中。每盆2株,每处理5个重复。每盆施入6 g 尿素和3 g  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 以保障养分的供应。2010年4月8日待欧美杂交杨幼苗存活后,保留长势较好且生长较为一致的幼苗1株,再进行Pb处理。以疏去幼苗生物量及碳(C)和养分含量计算初始C、N和P积累量。重金属Pb以分析纯的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 与去离子水配制母液,然后稀释成处理浓度施入土壤。定期松土、除草,并适量浇水,及时将盆垫中的水归还到土壤中。

### 1.3 取样和试验分析

欧美杂交杨生长过程中及时收集凋落叶,用自来水清洗干净,蒸馏水漂洗两遍,烘干称重,保存在干燥器中。

2010年11月5日欧美杂交杨叶片全部凋落后结束试验,收获全植株,将细根、粗根、茎、叶分开,并分装在牛皮纸袋中,于65 °C烘箱中烘干至恒重,测量各器官干物质量,将细根、粗根、茎、叶样品使用不锈钢粉碎机研磨后过1 mm筛,以备C、N、P元素含量的测定。

植物样品全C采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化- $\text{FeSO}_4$ 滴定法(鲁如坤, 2000)测定。 $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮后以测定植物各器官N、P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(鲁如坤, 2000)测定。所有样品测定均重复3次。

### 1.4 数据处理及统计分析

根据试验初期和试验结束时欧美杂交杨幼树各器官C、N和P积累量差异计算欧美杂交杨C、N和P积累与分配特征。N和P利用效率表示为单位吸收量所产生的生物量,根据生物量生产和N、P积累量计算(吴福忠等, 2008)。

N利用效率 $NUE_N$ =植物生物量/N的总积累量(Sorgonà *et al.*, 2006)

P利用效率 $NUE_P$ =植物生物量/P的总积累量(Sorgonà *et al.*, 2006)

单因素方差检验(one-way ANOVA)比较不同Pb处理条件下酸性紫色土和钙质紫色土中欧美杂交杨C、N、P积累与分配以及N、P利用效率差异,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。所有分析统计均应用SPSS 11.5统计软件进行。

## 2 结果和分析

### 2.1 欧美杂交杨各器官C、N和P含量

T1处理显著降低酸性紫色土和钙质紫色土中欧美杂交杨粗根C含量( $p < 0.05$ ),其余各器官C、P含量与对照相比均无显著差异( $p > 0.05$ ) (图1)。T3处理显著降低两种土壤中欧美杂交杨细根C含量和钙质紫色土中欧美杂交杨各器官P含量( $p < 0.05$ )。两种土壤中欧美杂交杨细根、粗根和茎N含量在各处理条件下与对照相比均无显著差异。相对于钙质紫色土,酸性紫色土中欧美杂交杨各器官P含量均较高(除T2处理下粗根)。此外,两种土壤中欧美杂交杨粗根和叶的N含量表现出随Pb胁迫程度的增加先增加后降低的趋势,但细根、粗根和叶的P含量表现出降低的趋势。

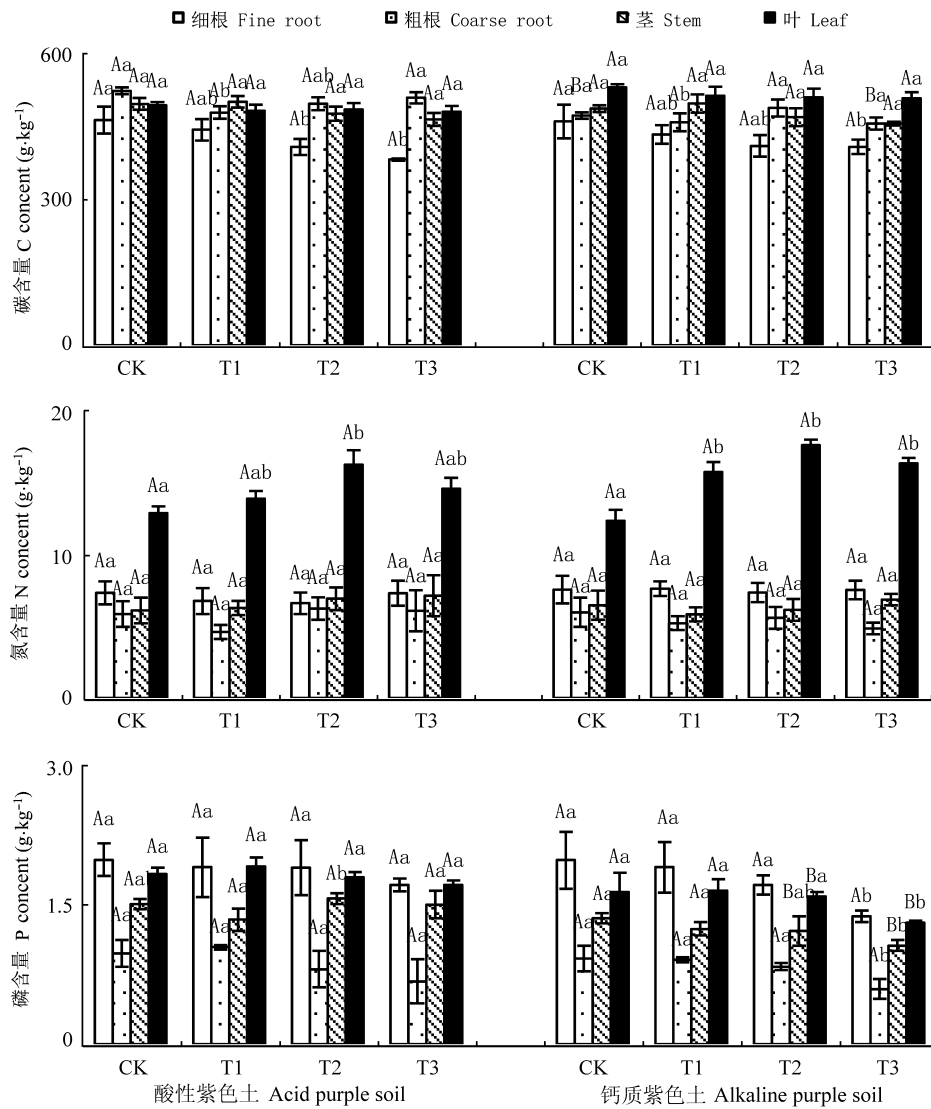
### 2.2 欧美杂交杨C、N和P积累与分配

酸性紫色土和钙质紫色土中欧美杂交杨总C、N和P积累量表现出随Pb胁迫程度的增加而降低的趋势(表2),且钙质紫色土中欧美杂交杨总C、N和P积累量在各处理浓度下均高于酸性紫色土。T1处理显著增加了酸性紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量( $p < 0.05$ ),而钙质紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量则显著降低( $p < 0.05$ )。两种土壤中,各浓度Pb处理条件下欧美杂交杨P积累量均为茎中最高,且酸性紫色土中欧美杂交杨细根和粗根P积累量显著高于钙质紫色土( $p < 0.05$ )。茎、粗根及植物总C积累量在T2和T3处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

Pb胁迫处理也明显改变了植物各器官C、N和P的分配格局(图2)。相对于对照, Pb胁迫处理使酸性紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显增加,叶C、N和P积累量的比例则呈现出降低的趋势。相对于酸性紫色土,钙质紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显降低,其叶C、N和P积累量的比例则表现出增加的趋势。

### 2.3 欧美杂交杨N和P利用效率

T1处理条件下两种土壤中叶C/N、总C/N、叶N/P、总N/P与对照相比均无显著差异( $p > 0.05$ ) (表3)。T2、T3处理条件下酸性紫色土中总C/N显著降低( $p < 0.05$ ),且T3处理条件下钙质紫色土中叶N/P、总N/P显著增加( $p < 0.05$ )。随Pb胁迫程度的增加,两种土壤中 $NUE_P$ 均表现出增加的趋势,且各处理条件下钙质紫色土中 $NUE_P$ 均显著高于酸性紫色土



**图1** 不同浓度铅处理下欧美杂交杨各器官C、N和P含量的变化(平均值±标准偏差,  $n = 5$ )。CK、T1、T2、T3的铅浓度分别为0、200、450和2 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干土。不同大写字母表示不同土壤、同一处理下的差异显著( $p < 0.05$ ); 不同小写字母表示同一土壤、不同处理间的差异显著( $p < 0.05$ )。

**Fig. 1** Variation of C, N and P contents in different organs of *Populus deltoids* × *P. nigra* under different plumbum concentration treatments (mean ± SD,  $n = 5$ ). CK, T1, T2, and T3, plumbum concentration is 0, 200, 450 and 2 000  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  dry soil, respectively. Different capital letters indicate significant differences in different soil within the same treatment, and different small letters indicate significant differences in the same soil among different treatments ( $p < 0.05$ ).

( $p < 0.05$ )。T1处理条件下, 酸性紫色土中欧美杂交杨的 $NUE_N$ 表现出增加的趋势, 而随着Pb处理浓度的增加, 两种土壤中欧美杂交杨的 $NUE_N$ 均显著降低, 且钙质紫色土中T2、T3处理条件下与对照相比差异显著( $p < 0.05$ )。

### 3 讨论

Pb不是植物生长发育所必需的元素, 较低浓度时就会对植物的生长产生毒害效应(Reddy *et al.*,

2005)。已有的研究表明, 植物在一定程度的Pb胁迫下均表现出生长受阻的现象(Kopittke *et al.*, 2007; Rossato *et al.*, 2011)。然而, 植物可以通过改变资源分配与利用方式适应胁迫环境引起的资源限制, 将有限的资源分配到不同结构和功能的器官上, 从而更好地适应环境(吴福忠等, 2008)。本试验结果表明, 欧美杂交杨总C、N和P积累量在两种不同土壤条件下均表现出随Pb处理浓度的增加而降低的趋势, 且各处理浓度下钙质紫色土中欧美杂交杨总C、N和P

表2 不同铅浓度处理下欧美杂交杨幼苗各器官的C、N和P积累量(平均值±标准偏差,  $n = 5$ )Table 2 C, N and P accumulations in different organs of *Populus deltoids* × *P. nigra* seedlings under different plumbum supplies (means ± SD,  $n = 5$ )

	处理 Treat- ment	茎积累量 Stem accumulation (g)	叶积累量 Leaf accumulation (g)	细根积累量 Fine root accumulation (g)	粗根积累量 Coarse root accumulation (g)	总积累量 Total accumulation (g)	
酸性紫色土 Acid purple soil	C	CK	24.39 ± 3.00 <sup>Aa</sup>	12.67 ± 2.12 <sup>Aa</sup>	4.86 ± 0.46 <sup>Aa</sup>	23.38 ± 0.96 <sup>Aa</sup>	65.30 ± 3.65 <sup>Aa</sup>
		T1	20.51 ± 2.07 <sup>Aab</sup>	7.96 ± 0.86 <sup>Ab</sup>	9.18 ± 1.24 <sup>Ab</sup>	18.72 ± 1.48 <sup>Ab</sup>	56.37 ± 1.53 <sup>Ab</sup>
		T2	16.59 ± 1.64 <sup>Ab</sup>	9.86 ± 0.76 <sup>Ab</sup>	4.08 ± 1.42 <sup>Aa</sup>	19.61 ± 0.79 <sup>Ab</sup>	50.15 ± 0.43 <sup>Ac</sup>
		T3	12.30 ± 1.62 <sup>Ac</sup>	5.24 ± 1.64 <sup>Ac</sup>	3.21 ± 0.17 <sup>Aa</sup>	14.35 ± 1.55 <sup>Ac</sup>	35.10 ± 1.82 <sup>Ad</sup>
	N	CK	0.31 ± 0.07 <sup>Aa</sup>	0.33 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>Aa</sup>	0.26 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	0.98 ± 0.10 <sup>Aa</sup>
		T1	0.25 ± 0.01 <sup>Aab</sup>	0.22 ± 0.06 <sup>Abc</sup>	0.14 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	0.18 ± 0.03 <sup>Ab</sup>	0.79 ± 0.04 <sup>Ab</sup>
		T2	0.26 ± 0.07 <sup>Aab</sup>	0.29 ± 0.05 <sup>Aab</sup>	0.06 ± 0.03 <sup>Aa</sup>	0.26 ± 0.04 <sup>Aa</sup>	0.87 ± 0.11 <sup>Aab</sup>
		T3	0.20 ± 0.02 <sup>Ab</sup>	0.18 ± 0.08 <sup>Ac</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>Aa</sup>	0.16 ± 0.04 <sup>Ab</sup>	0.62 ± 0.06 <sup>Ac</sup>
	P	CK	0.074 ± 0.012 <sup>Aa</sup>	0.047 ± 0.007 <sup>Aa</sup>	0.021 ± 0.002 <sup>Aa</sup>	0.044 ± 0.007 <sup>Aa</sup>	0.186 ± 0.011 <sup>Aa</sup>
		T1	0.055 ± 0.009 <sup>Abc</sup>	0.032 ± 0.004 <sup>Ab</sup>	0.039 ± 0.007 <sup>Ab</sup>	0.041 ± 0.010 <sup>Aa</sup>	0.166 ± 0.022 <sup>Ab</sup>
		T2	0.057 ± 0.009 <sup>Ab</sup>	0.036 ± 0.006 <sup>Ab</sup>	0.019 ± 0.005 <sup>Aa</sup>	0.032 ± 0.011 <sup>Ab</sup>	0.144 ± 0.021 <sup>Ac</sup>
		T3	0.043 ± 0.002 <sup>Ac</sup>	0.019 ± 0.005 <sup>Ac</sup>	0.014 ± 0.001 <sup>Aa</sup>	0.019 ± 0.003 <sup>Ac</sup>	0.095 ± 0.004 <sup>Ad</sup>
钙质紫色土 Alkaline purple soil	C	CK	36.12 ± 2.00 <sup>Ba</sup>	14.09 ± 1.85 <sup>Aa</sup>	7.78 ± 0.76 <sup>Aa</sup>	19.58 ± 2.36 <sup>Aa</sup>	77.57 ± 1.78 <sup>Ba</sup>
		T1	34.25 ± 2.70 <sup>Ba</sup>	12.33 ± 1.37 <sup>Aab</sup>	4.47 ± 0.76 <sup>Bb</sup>	17.26 ± 1.16 <sup>Aab</sup>	68.31 ± 4.47 <sup>Bb</sup>
		T2	27.21 ± 1.66 <sup>Bb</sup>	10.49 ± 0.34 <sup>Abc</sup>	4.35 ± 0.57 <sup>Ab</sup>	15.79 ± 0.81 <sup>Bb</sup>	57.84 ± 2.15 <sup>Bc</sup>
		T3	16.38 ± 2.15 <sup>Bc</sup>	8.58 ± 0.41 <sup>Bc</sup>	2.69 ± 0.29 <sup>Ac</sup>	11.27 ± 0.40 <sup>Bc</sup>	38.92 ± 2.18 <sup>Bd</sup>
	N	CK	0.46 ± 0.08 <sup>Aa</sup>	0.34 ± 0.17 <sup>Aa</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>Ba</sup>	0.25 ± 0.08 <sup>Aa</sup>	1.18 ± 0.10 <sup>Aa</sup>
		T1	0.40 ± 0.06 <sup>Ba</sup>	0.40 ± 0.06 <sup>Ba</sup>	0.08 ± 0.02 <sup>Bb</sup>	0.20 ± 0.04 <sup>Aab</sup>	1.08 ± 0.09 <sup>Bab</sup>
		T2	0.37 ± 0.08 <sup>Aab</sup>	0.32 ± 0.07 <sup>Aa</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>Ab</sup>	0.19 ± 0.02 <sup>Bab</sup>	0.95 ± 0.16 <sup>Ab</sup>
		T3	0.25 ± 0.04 <sup>Ab</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>Ab</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>Ab</sup>	0.69 ± 0.04 <sup>Ac</sup>
	P	CK	0.101 ± 0.007 <sup>Ba</sup>	0.043 ± 0.013 <sup>Aa</sup>	0.033 ± 0.007 <sup>Ba</sup>	0.038 ± 0.010 <sup>Aa</sup>	0.216 ± 0.014 <sup>Aa</sup>
		T1	0.085 ± 0.007 <sup>Bb</sup>	0.040 ± 0.005 <sup>Aa</sup>	0.020 ± 0.006 <sup>Bb</sup>	0.034 ± 0.006 <sup>Aa</sup>	0.179 ± 0.014 <sup>Ab</sup>
		T2	0.071 ± 0.011 <sup>Ac</sup>	0.033 ± 0.002 <sup>Ab</sup>	0.018 ± 0.003 <sup>Ab</sup>	0.027 ± 0.001 <sup>Bb</sup>	0.149 ± 0.009 <sup>Ac</sup>
		T3	0.038 ± 0.003 <sup>Ad</sup>	0.022 ± 0.001 <sup>Ac</sup>	0.009 ± 0.001 <sup>Bc</sup>	0.015 ± 0.002 <sup>Bc</sup>	0.084 ± 0.001 <sup>Bd</sup>

CK、T1、T2、T3, 铅浓度分别为0、200、450和2 000 mg·kg<sup>-1</sup>干土。同一列中不同大写字母表示不同土壤、同一处理下的差异显著( $p < 0.05$ ); 不同小写字母表示同一土壤、不同处理间的差异显著( $p < 0.05$ )。

CK, T1, T2, and T3, plumbum supplies is 0, 200, 450 and 2 000 mg·kg<sup>-1</sup> dry soil, respectively. In the same column, different capital letters indicate significant differences in different soil within the same treatment, and different small letters indicate significant differences in the same soil among different treatments ( $p < 0.05$ ).

积累量均高于酸性紫色土。Pb胁迫明显改变了欧美杂交杨各器官C、N和P的分配格局。与对照相比, Pb胁迫使酸性紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显增加, 而钙质紫色土中则明显降低。两种不同土壤条件下欧美杂交杨P的利用效率表现出随Pb胁迫程度的增加而增加的趋势, 且钙质紫色土中欧美杂交杨P的利用效率显著高于酸性紫色土中的。这些结果表明, 一定程度的Pb胁迫抑制植物C、N和P的积累, 改变了植物的养分利用特征; 同时也表明, 碱性土壤条件中Pb污染对植物C、N和P积累、分配与利用的影响相对较小, 可以更好地适应受污染的碱性土壤环境。

植株体内的C含量在很大程度上决定着植株的生物量, N是与植物生长发育和器官建成密切相关的养分元素(Hirel *et al.*, 2005; 苗惠田等, 2010)。Pb对植物体内养分含量的影响与植物组织和养分元素本身有关(Kibria *et al.*, 2010)。酸性紫色土和钙质紫色土中欧美杂交杨叶N含量均显著高于其他器官N含量(图1), 这是因为无论植物根部吸收多少N, 最后都会转移到地上部来维持植物体正常的新陈代谢活动(Kibria *et al.*, 2010)。植物对养分元素的吸收可以提高细胞内阳离子的有效浓度, 从而在一定程度上缓解Pb毒性。随着Pb胁迫程度的增加, 植物体内氮代谢酶类的活性, 尤其是氮代谢的限速酶——

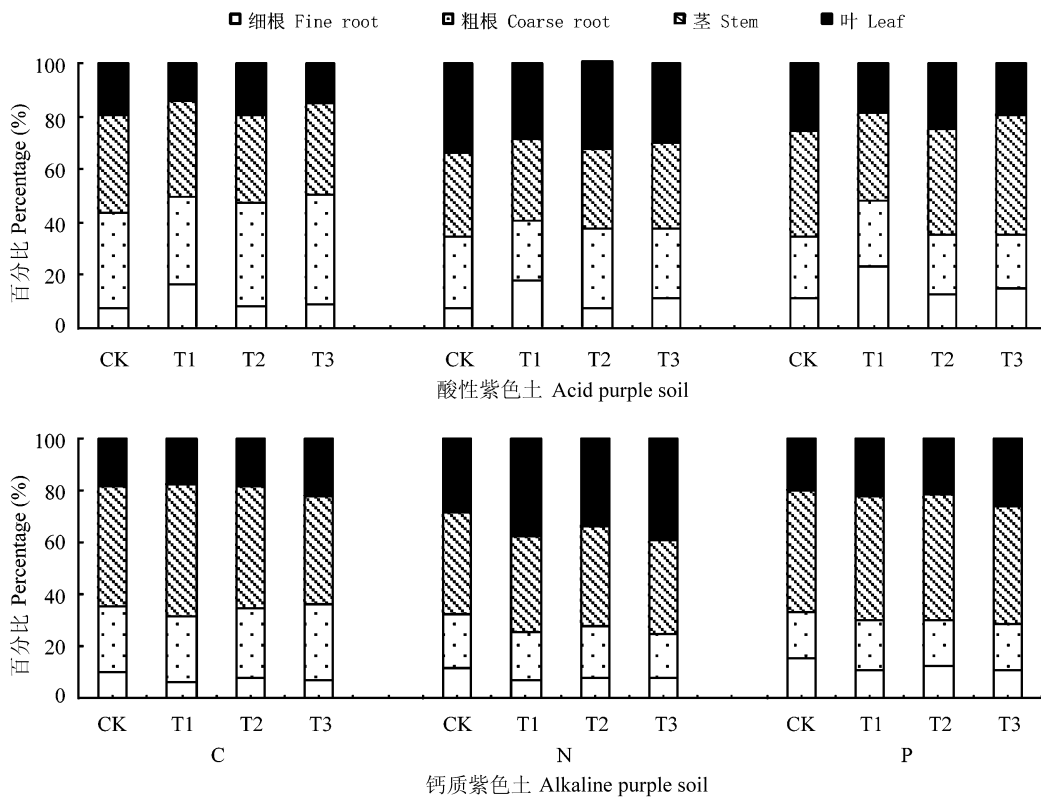


图2 不同铅浓度处理下欧美杂交杨幼苗各器官C、N和P的分配特征。CK、T1、T2、T3铅浓度分别为0、200、450和2 000 mg·kg<sup>-1</sup>干土。

Fig. 2 Allocation characteristics of C, N and P in different organs of *Populus deltoides* × *P. nigra* seedlings under different plumbum supplies. CK, T1, T2, and T3, plumbum supplies is 0, 200, 450 and 2 000 mg·kg<sup>-1</sup> dry soil, respectively.

表3 不同铅浓度处理下欧美杂交杨幼苗的叶C/N、叶N/P、总C/N、总N/P、N利用效率和P利用效率(平均值±标准偏差, n = 5)  
Table 3 Leaf C/N, leaf N/P, total C/N, total N/P, N use efficiency ( $NUE_N$ ) and P use efficiency ( $NUE_P$ ) of *Populus deltoides* × *P. nigra* seedlings under different plumbum concentration treatments (means ± SD, n = 5)

	处理 Treatment	叶C/N Leaf C/N	叶N/P Leaf N/P	总C/N Total C/N	总N/P Total N/P	N利用效率 $NUE_N$ (g mass <sup>-1</sup> )	P利用效率 $NUE_P$ (g mass <sup>-1</sup> )
酸性紫色土 Acid purple soil	CK	38.08 ± 4.16 <sup>Aa</sup>	7.13 ± 0.68 <sup>Aa</sup>	66.76 ± 6.06 <sup>Aa</sup>	5.31 ± 0.53 <sup>Aab</sup>	133.39 ± 12.46 <sup>Aab</sup>	703.27 ± 5.30 <sup>Aa</sup>
	T1	35.86 ± 4.86 <sup>Aa</sup>	7.13 ± 1.18 <sup>Aa</sup>	71.27 ± 3.65 <sup>Aa</sup>	4.76 ± 0.29 <sup>Aa</sup>	148.85 ± 7.37 <sup>Aa</sup>	707.47 ± 13.38 <sup>Aa</sup>
	T2	34.81 ± 5.24 <sup>Aa</sup>	7.87 ± 1.11 <sup>Aa</sup>	57.78 ± 6.69 <sup>Ab</sup>	6.07 ± 0.69 <sup>Abc</sup>	122.78 ± 13.62 <sup>Ab</sup>	738.53 ± 8.11 <sup>Ab</sup>
	T3	30.94 ± 8.43 <sup>Aa</sup>	9.47 ± 2.13 <sup>Aa</sup>	57.15 ± 3.43 <sup>Ab</sup>	6.50 ± 0.31 <sup>Ac</sup>	124.04 ± 8.52 <sup>Ab</sup>	805.04 ± 24.31 <sup>Ab</sup>
钙质紫色土 Alkaline purple soil	CK	34.91 ± 2.06 <sup>Aa</sup>	7.60 ± 3.35 <sup>Ba</sup>	65.96 ± 4.57 <sup>Aa</sup>	5.47 ± 0.28 <sup>Aa</sup>	135.75 ± 8.22 <sup>Aa</sup>	741.29 ± 11.33 <sup>Ba</sup>
	T1	30.88 ± 1.85 <sup>Aa</sup>	10.11 ± 0.7 <sup>Bab</sup>	63.60 ± 2.57 <sup>Ba</sup>	6.01 ± 0.06 <sup>Ba</sup>	131.61 ± 2.00 <sup>Bab</sup>	791.22 ± 9.19 <sup>Bb</sup>
	T2	33.47 ± 8.21 <sup>Aa</sup>	9.94 ± 2.18 <sup>Aa</sup>	61.98 ± 11.86 <sup>Aa</sup>	6.40 ± 1.03 <sup>Aa</sup>	119.85 ± 4.28 <sup>Abc</sup>	821.10 ± 4.73 <sup>Bc</sup>
	T3	31.59 ± 1.65 <sup>Aa</sup>	12.31 ± 0.35 <sup>Bb</sup>	56.57 ± 0.63 <sup>Aa</sup>	8.20 ± 0.27 <sup>Bb</sup>	122.79 ± 3.83 <sup>Ac</sup>	1005.94 ± 1.56 <sup>Bd</sup>

CK、T1、T2、T3, 铅浓度分别为0、200、450和2 000 mg·kg<sup>-1</sup>干土。同一列中不同大写字母表示不同土壤、同一处理下的差异显著( $p < 0.05$ ); 不同小写字母表示同一土壤、不同处理间的差异显著( $p < 0.05$ )。

CK, T1, T2, and T3, plumbum concentration is 0, 200, 450 and 2 000 mg·kg<sup>-1</sup> dry soil, respectively. In the same column, different capital letters indicate significant differences in different soil within the same treatment, and different small letters indicate significant differences in the same soil among different treatments ( $p < 0.05$ ).

硝酸还原酶的活性会受到一定的影响, 反过来又会抑制植物对N的吸收(傅晓萍等, 2010)。Xiong等

(2006)的研究结果也表明, Pb胁迫显著降低了白菜 (*Brassica pekinensis*)根部N的含量以及游离氨基酸

的含量。因此本研究中,在两种不同土壤条件下欧美杂交杨粗根和叶N含量表现出随Pb胁迫程度的增加先增加后降低的趋势(图1)。欧美杂交杨细根、粗根和叶的P含量也表现出随Pb胁迫程度的增加而降低的趋势(图1)。一方面可能是由于P是供试土壤的限制养分元素之一(朱永官, 2003; 吴福忠等, 2010; 王晶苑等, 2011); 另一方面也可能是因为P可以与Pb形成难溶性的化合物,从而调控Pb的生物有效性。这些结果充分表明,一定程度的Pb胁迫抑制了植物对养分元素的吸收,进而造成植物生物量生产的降低。尽管Pb胁迫导致养分吸收受限的具体机制还不是很清楚,但这为以后的研究提供了很好的思路。

植物各器官养分含量差异可以在一定程度上反映植物对环境变化的响应,而植物各器官C、N和P积累及其分配格局则是对环境因子变化较为综合的响应机制(Wu *et al.*, 2009)。本研究中,T1处理显著增加了酸性紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P的积累量(表2),可能是由于低浓度Pb胁迫刺激增强了植物体内某些酶的活性,使植物形成了一种自我保护的特性(李亚藏和王庆成, 2011)。然而,随着Pb胁迫程度的增加,这种保护特性会随着植物受到伤害程度的增加而逐渐消失(Uveges *et al.*, 2002; Rossato *et al.*, 2011)。因此,两种土壤中欧美杂交杨总N和P积累量随着Pb胁迫程度的增加表现出逐渐降低的趋势(表2)。Pb胁迫处理也明显改变了植物各器官中C、N和P的分配格局。与对照相比,Pb胁迫处理使钙质紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显降低(图2),这是由于Pb胁迫增强了植物根部细胞膜的透性,扰乱了对必需养分元素的吸收而造成的(Sharma & Dubey, 2005)。然而,其叶C、N和P积累量的比例则表现出增加的趋势(图2),说明在环境胁迫条件下植物吸收的养分元素会首先保证叶片的生产以保持最大的C固定率,这与Broadley等(2000)的研究结果一致。相对于钙质紫色土,酸性紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显增加,而叶C、N和P积累量的比例呈现出降低的趋势(图2)。这可能是由于Pb在碱性土壤环境中主要以磷酸盐和碳酸盐等沉淀形式存在,由于吸持、钝化或沉淀作用,降低了土壤中活性Pb的总量,植物受到伤害的程度也相应降低(Mojiri, 2011)。因此,各处理浓度下钙质紫色土中欧美杂交杨总C、N和P积

累量均较高。这些结果表明,Pb胁迫环境下,碱性土壤条件更有利于植物利用有限的养分来维持自身的正常生长。

植株体内的碳氮比(C/N)可以反映出植株的C代谢状况及植物的N利用效率,决定着植株的生物量和构成,而养分利用效率(NUE)是与植物生长和健康状况密切相关的功能性指标(Patterson *et al.*, 1997; 苗惠田等, 2010)。胁迫环境条件下,植物为了维持相对稳定的生长,通常表现出较高的资源利用效率(吴福忠等, 2008; Wu *et al.*, 2010)。极端浓度Pb胁迫条件下,虽然酸性紫色土中欧美杂交杨细根和粗根P积累量显著高于钙质紫色土(表2),但是钙质紫色土中欧美杂交杨NUE<sub>P</sub>显著高于酸性紫色土(表3)。T2、T3处理条件下,两种不同土壤条件下欧美杂交杨的NUE<sub>N</sub>均显著降低(表3),表明较高浓度Pb胁迫造成了植物体代谢紊乱,进而影响了植物对养分元素的有效利用(Qureshi *et al.*, 2007; Rossato *et al.*, 2011)。Pb胁迫促使叶片提前凋落,导致N元素大量流失。因此本研究中,酸性紫色土中欧美杂交杨叶片N/P小于10,表现出缺N的现象(Koerselman & Meuleman, 1996)。并且,由于N缺乏降低了酸性紫色土中欧美杂交杨生物量生产,使得Pb胁迫条件下酸性紫色土中欧美杂交杨NUE<sub>P</sub>相对较低。

综上所述,欧美杂交杨总C、N和P积累量在两种土壤中均表现出随Pb处理浓度的增加而降低的趋势,且钙质紫色土中欧美杂交杨总C、N和P积累量在各处理浓度下均高于酸性紫色土。此外,Pb胁迫处理明显改变各器官C、N和P的分配格局。与对照相比,Pb胁迫处理使酸性紫色土中欧美杂交杨细根C、N和P积累量的比例明显增加,而钙质紫色土中则明显降低。在N素缺乏的情况下,酸性紫色土中欧美杂交杨P的利用效率显著低于钙质紫色土,因此酸性紫色土中植物C、N和P积累与分配更易受到Pb胁迫的影响。尽管这些结果并没有完全揭示Pb对欧美杂交杨养分吸收、积累与分配的影响机制,但相对于酸性紫色土,一定程度Pb污染条件下钙质紫色土中生长的欧美杂交杨具有更加合理的养分分配与利用机制,能更好地利用有限的养分来维持自身的生长,这为Pb污染区域植物的生长适应特性的研究及欧美杂交杨的栽植推广提供了一定的科学依据。

致谢 国家科技支撑计划(2011BAC09B05)、四川省

科技支撑计划(2010NZ0051)、四川高等学校科技创新重大培育计划(2007ZZ024和09ZZ023)、四川省杰出青年学术技术带头人培育计划(2011JQ0035)和四川省科技厅应用基础项目(2012JY0047)资助。

## 参考文献

- Ashraf MY, Azhar N, Ashraf M, Hussain M, Arshad M (2011). Influence of lead on growth and nutrient accumulation in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Journal of Environmental Biology*, 32, 659–666.
- Beladi M, Kashani A, Habibi D, Paknejad F, Golshan M (2011). Uptake and effects of lead and copper on three plant species in contaminated soils: role of phytochelatin. *African Journal of Agricultural Research*, 6, 3483–3492.
- Broadley MR, Escobar-Gutiérrez AJ, Burns A, Burns IG (2000). What are the effects of nitrogen deficiency on growth components of lettuce? *New Phytologist*, 147, 519–526.
- Fu XP (傅晓萍), Dou CM (豆长明), Hu SP (胡少平), Chen XC (陈新才), Shi JY (施积炎), Chen YX (陈英旭) (2010). A review of progress in roles of organic acids on heavy metal resistance and detoxification in plants. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 1354–1358. (in Chinese with English abstract)
- Gopal R, Rizvi AH (2008). Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. *Chemosphere*, 70, 1539–1544.
- Hirel B, Andrieu B, Valadier MH, Renard S, Quilleré I, Chelle M, Pommel B, Fournier C, Drouet JL (2005). Physiology of maize II. Identification of physiological markers representative of the nitrogen status of maize (*Zea mays*) leaves during grain filling. *Physiologia Plantarum*, 124, 178–188.
- Jian Y (简毅), Yang WQ (杨万勤), Zhang J (张健), Du B (杜波), Lin J (林静), Wang A (王奥), Zhou LQ (周利强) (2009). Characteristics and ecological risk of soil pollution in the lower reaches (Wutongqiao Section) of Minjiang River. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 28, 256–262. (in Chinese with English abstract)
- Kibria MG, Maniruzzaman M, Islam M, Oaman KT (2010). Effects of soil-applied lead on growth and partitioning of ion concentration in *Spinacea oleracea* L. tissues. *Soil and Environment*, 29, 1–6.
- Koerselman W, Meuleman AFM (1996). The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 33, 1441–1450.
- Kopittke PM, Asher CJ, Blamey FPC, Menzies NW (2007). Toxic effects of Pb<sup>2+</sup> on the growth and mineral nutrition of signal grass (*Brachiaria decumbens*) and rhodes grass (*Chloris gayana*). *Plant and Soil*, 300, 127–136.
- Li YZ (李亚藏), Wang QC (王庆成) (2011). Comparison on characters of lead stress resistance of four northern broad-leaved tree species. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)* (南京林业大学学报(自然科学版)), 35(4), 143–146. (in Chinese with English abstract)
- Lu RK (鲁如坤) (2000). *Soil and Agro-Chemical Analytical Methods* (土壤农业化学分析方法). China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. 318–379. (in Chinese)
- Miao HT (苗惠田), Zhang WJ (张文菊), Lü JL (吕家珑), Huang SM (黄绍敏), Xu MG (徐明岗) (2010). Effects of long-term fertilization on assimilated carbon content and distribution proportion of maize in fluvio-aquic soil. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 43, 4852–4861. (in Chinese with English abstract)
- Mojiri A (2011). The potential of corn (*Zea mays*) for phytoremediation of soil contaminated with cadmium and lead. *Journal of Biological and Environmental Science*, 5(13), 17–22.
- Patternson TB, Guy RD, Dang QL (1997). Whole-plant nitrogen- and water-relations traits, and their associated trade-offs, in adjacent muskeg and upland boreal spruce species. *Oecologia*, 110, 160–168.
- Qureshi MI, Abidin MZ, Qadir S, Iqbal M (2007). Lead-induced oxidative stress and metabolic alterations in *Cassia angustifolia* Vahl. *Biologia Plantarum*, 51, 121–128.
- Rafati M, Khorasani N, Moattar F, Shirvany A, Moraghebi F, Hosseinzadeh S (2011). Phytoremediation potential of *Populus alba* and *Morus alba* for cadmium, chromium and nickel absorption from polluted soil. *International Journal of Environment Research*, 5, 961–970.
- Reddy AM, Kumar SG, Jyothsnakumari G, Thimmanai S, Sudhakar C (2005). Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.). *Chemosphere*, 60, 97–104.
- Rossato LV, Nicoloso FT, Farias JG, Cargnelluti D, Tabaldi LA, Antes FG, Dressler VL, Morsch VM, Schetinger MRC (2011). Effects of lead on the growth, lead accumulation and physiological responses of *Pluchea sagittalis*. *Ecotoxicology*, 21, 111–123.
- Sharma P, Dubey RS (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 35–52.
- Sinhal VK, Srivastava A, Singh VP (2010). EDTA and citric acid mediated phytoextraction of Zn, Cu, Pb and Cd through marigold (*Tagetes erecta*). *Journal of Environmental Biology*, 31, 255–259.
- Sorgonà A, Abenavoli MR, Gringeri PG, Cacco G (2006). A comparison of nitrogen use efficiency definitions in *Citrus* rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 109, 389–393.
- Uveges JL, Corbett AL, Mal TK (2002). Effects of lead contamination on the growth of *Lythrum salicaria* (purple loosestrife). *Environmental Pollution*, 120, 319–323.



- Wang JY (王晶苑), Wang SQ (王绍强), Li RL (李纫兰), Yan JH (闫俊华), Sha LQ (沙丽清), Han SJ (韩士杰) (2011). C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 35, 587–595. (in Chinese with English abstract)
- Wu FZ (吴福忠), Bao WK (包维楷), Wu N (吴宁) (2008). Growth, accumulation and partitioning of biomass, C, N and P of *Sophora davidii* seedlings in response to N supply in dry valley of upper Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 3817–3824. (in Chinese with English abstract)
- Wu FZ (吴福忠), Yang WQ (杨万勤), Zhang J (张健), Zhou LQ (周利强) (2010). Effects of cadmium stress on growth and nutrient accumulation, distribution and utilization in *Osmanthus fragrans* var. *thunbergii*. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 1220–1226. (in Chinese with English abstract)
- Wu FZ, Yang WQ, Wang KY, Wu N, Lu YJ (2009). Effect of stem density on leaf nutrient dynamics and nutrient use efficiency of dwarf bamboo. *Pedosphere*, 19, 496–504.
- Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, Zhou LQ (2010). Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoids* × *Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 268–273.
- Xiong ZT, Zhao F, Li MJ (2006). Lead toxicity in *Brassica pekinensis* Rupr.: effect on nitrate assimilation and growth. *Environmental Toxicology*, 21, 147–153.
- Zhang J (张健) (2009). *Integrated Management on Soil and Water Loss in the Hilly Area and Regional Sustainable Development in Sichuan Province* (四川盆地低山丘陵区水土流失综合治理及区域可持续发展). Sichuan Science & Technology Press, Chengdu. 105. (in Chinese)
- Zhou QX (周启星), Wei SH (魏树和), Diao CY (刁春燕) (2007). Basic principles and researching progresses in ecological remediation of contaminated soils. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 26, 419–424. (in Chinese with English abstract)
- Zhu YG (朱永官) (2003). Micro-interfacial processes in soil-plant systems and their environmental impacts. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 23, 205–210. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 刘世荣 责任编辑: 李 敏