不同杉木无性系磷素特性的比较

梁霞^{1 2} 刘爱琴¹ 马祥庆^{1 *} 冯丽贞¹ 黄益江¹

(1 福建农林大学林学院 福州 350002) (2 华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

摘要 通过土培试验,进行磷素胁迫条件下不同杉木(*Cunninghamia lanceolata*)无性系磷素特性的比较研究。结果表明:在磷胁迫条件下不同杉木无性系的干物质积累、磷素吸收效率和磷素利用效率均存在显著差异。随着磷胁迫的加剧,不同杉木无性系的干物质积累量和磷素吸收效率下降,而磷素利用效率增强。总体而言,8、9、24、37号无性系的干物质积累量受胁迫影响最小,23号无性系受胁迫影响最大。其中8号无性系的磷素吸收和利用效率均较高,24、37号无性系的磷素吸收效率较高,而9号无性系的磷素利用效率较高,23号无性系的磷素吸收和利用效率均较低。在磷胁迫条件下,杉木无性系可通过提高磷素吸收效率和利用效率途径来提高杉木对环境磷素的利用。

关键词 杉木 无性系 磷素特性 磷胁迫 磷效率

COMPARISON OF THE PHOSPHORUS CHARACTERISTICS OF DIFFERENT CHINESE FIR CLONES

LIANG Xia^{1 2} LIU Ai-Qin¹ MA Xiang-Qing^{1 *} FENG Li-Zhen¹ and HUANG Yi-Jiang¹

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

(2 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract Background and Aims Phosphorus (P) deficiency is one of the main factors that influence plant productivity in agricultural and forestry systems. Fertilization and soil improvement are the primary practices used to meet the P demands of crops in traditional agriculture and of trees in forestry management. Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), a fast-growing, evergreen coniferous tree with high yield and quality of wood, is the most important tree species of timber plantations in subtropical China. Since Chinese fir plantations range from about 20° to 30° N in latitude and 100° to 120° E in longitude, there are many different genotypes of Chinese fir among the forests in south China. Therefore, it is possible to select the Chinese fir clone with high phosphorus use efficiency.

Methods Based on the pot experiment under the different phosphorus deficiency stress (heavy, medium, slight phosphorus deficiency and normal phosphorus supply), the dry matter accumulation, phosphorus absorption efficiency, and phosphorus use efficiency of eight different Chinese fir clones were analyzed to compare their phosphorus characteristics.

Key Results There were significant differences in the dry matter accumulation, phosphorus absorption efficiency and phosphorus use efficiency among different clones under phosphorus stress. The dry matter accumulation and phosphorus absorption efficiency of different clones decreased whereas phosphorus use efficiency increased with increasing phosphorus stress. The dry matter accumulation of Clone 8, 9, 24 and 37 were influenced by phosphorus stress less than those of the other clones. Phosphorus stress significantly affected the dry matter accumulation of Clone 23. Higher phosphorus absorption and use efficiency in Clone 8, higher phosphorus absorption efficiency in Clone 24 and 37, and higher phosphorus use efficiency Clone 9 were found under phosphorus stress. However, the phosphorus absorption efficiency and phosphorus use efficiency of Clone 23 were lower than those of the other 7 clones.

Conclusion High phosphorus absorption and use efficiency of Chinese fir are the major adaptive strategy under environment with low phosphorus availability.

Key words Chinese fir, Clones, Phosphorus stress, Phosphorus use efficiency

磷作为植物生长发育的必需元素之一,在人类赖以生存的生态系统中起着不可替代的作用,磷素

不足是限制目前世界农林业生产的重要因素(王庆仁等,1998)。在长期的遗传变异过程中,植物体内形成了适应低磷环境的反应,并能在植物的生理生化过程中表现出来,这为筛选磷高效植物基因型提供了可能(马祥庆和梁霞,2004)。目前关于植物对低磷胁迫的适应性反应已有不少研究,其中尤以植物磷效率基因型的筛选为人们研究的热点(曹靖和张福锁,2000;Vance *et al.*, 2003)。通过挖掘磷素高效利用植物,筛选能活化吸收土壤固定态磷的磷素高效利用植物基因型,以补充代替传统施磷肥方法所需的能源和化学资源,可从根本上解决农林业上土壤有效磷“遗传学缺乏”的难题(Raghothama, 1999)。但目前在小麦(*Triticum aestivum*)李春俭等,2003;Gardiner & Christense, 1990)水稻(*Oryza sativa*)郭玉春等,2003)玉米(*Zea mays*)王艳等,2003)等农作物方面的研究较多,在木本植物方面的研究较少(谢钰容和周志春,2002;张焕朝等,2003;Wang *et al.*, 1991)。有关杉木(*Cunninghamia lanceolata*)磷肥施用和磷素营养方面的研究早有报道,并已取得了一定的成果(陈金林等,1996a, 1996b;俞元春等,1997),但从杉木磷效率基因型筛选角度进行的研究未见报道。

杉木作为遍及我国南方16个省区的重要造林树种在长期的系统发育过程中形成了对林地肥力不同要求的遗传变异,特别是在长期的地理生态隔离及突变选择过程中,形成了不同的地理生态类型,这些不同的地理生态类型具有不同的营养遗传性状(俞新妥,2003),并能通过不同的磷素特性(磷素吸收效率、磷素利用效率等)表现出来,这就为筛选磷营养高效利用杉木类型提供了可能。有鉴于此,本文在模拟磷素胁迫条件下进行了不同杉木无性系干物质积累、磷素吸收效率和磷素利用效率的比较测定,研究磷素胁迫条件下不同杉木无性系磷素特性的变化规律,为筛选磷高效利用杉木无性系提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料来源

在对福建省漳平五一林场杉木无性系采穗圃100多个无性系生长及适应性调查基础上,初选8种具有不同营养特性苗高30 cm左右的杉木无性系1年生苗为供试材料。试验在福建农林大学南平校区玻璃温室内进行。盆栽土壤由黄心土、粗砂土按1:3比例混合组成,盆栽土壤有机质 $0.417\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,

全氮 $0.037\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.175\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $2.78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量为痕量。

1.2 试验设计

鉴于在正常条件下不同杉木无性系对磷素吸收利用特性差异较难判断的现实,本试验通过磷胁迫进行不同杉木无性系磷素特性的比较研究。由于南方杉木产区土壤速效磷多处 $10\sim 20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围,因此取 $16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为杉木幼苗培养的正常磷浓度。利用 KH_2PO_4 施肥来进行磷胁迫控制,即待移栽入上述培养土中的杉木幼苗生长2周后,将 KH_2PO_4 依据不同浓度配制成溶液,并在2周内少量多次施入盆中培养土,由此得到4个土壤磷素胁迫等级处理:正常供磷对照(CK) $16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、轻度磷素胁迫(L) $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、中度磷素胁迫(M) $4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和重度磷素胁迫(H) $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。定期对各试验处理施氮肥和钾肥,满足杉木无性系对其它营养元素的要求。每种无性系栽植3盆,每盆1株,每株样品重复测定3次。在进行磷胁迫处理前,随机抽取不同无性系幼苗各5株,测定其生物量,取其平均值作为各杉木无性系的初始生物量。

1.3 分析测定

磷素胁迫从2002年9月开始,到12月结束,共计4个月。土培试验结束后对不同磷胁迫处理的植株进行生物量测定,采用烘干法分别测定不同处理杉木1年生叶、2年生叶、茎及根系干重,并取不同器官的植株样品进行磷素分析,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}$ 消煮、钼锑抗比色法测定植物样品的磷含量。

1.4 统计方法

杉木无性系的干物质累积量是各无性系收获时的生物量与初始生物量之差,即:

无性系干物质累积量 = 收获时生物量 - 初始生物量。

根据资源捕获量和利用效率的关系(Morris & Garity, 1993),磷素吸收效率为生产单位干物质植株磷的吸收量,表示植物从土壤介质中获得磷的能力,磷素的利用效率为吸收单位磷素所能生产的干物质质量,吸收单位磷素所生产的干物质越多,表明磷素的利用效率越高。磷素吸收效率和利用效率分别按照如下公式计算(曹靖和张福锁,2000;周志春等,2005):

磷素吸收效率 = 各器官及无性系总的磷素吸收量/各器官或全株;

磷素利用效率 = 各器官及无性系总干物质积累量/各器官及无性系总的磷吸收量。

本试验所有样品均重复测定 3 次,试验结果为 3 次测定结果的平均值。采用 SPSS11.0 数据分析软件对不同胁迫条件和同一胁迫条件下不同无性系的试验结果进行方差分析,并以小写英文字母表示同一胁迫条件下不同杉木无性系间的差异显著水平,以大写英文字母表示同一无性系在不同胁迫条件下的差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 磷胁迫对不同杉木无性系干物质积累量的影响

不同磷胁迫条件下各杉木无性系干物质积累量及显著性检验结果见表 1。双因素方差分析表明:杉木无性系根、茎、叶及总干物质积累量存在显著的无性系效应和磷胁迫效应。随磷胁迫加剧,各无性系干物质积累量均呈下降趋势,除 3 和 37 号无性系外,其它无性系间的差异均达到显著水平。不同杉木无性系间干物质积累量差异随磷胁迫程度不同而异。在重度磷胁迫条件下,除幼叶外杉木无性系各器官和总干物质积累量均存在显著差异,其中 8、9、24、37 号无性系干物质积累量较高,3、5、23 号无

表 1 磷胁迫条件下不同杉木无性系的干物质积累
Table 1 The dry matter accumulation of different Chinese fir clones under different phosphorus stress

磷水平 P levels	无性系 Clones	干物质积累量 Dry matter accumulation (g)					
		1 年生叶 One-year leaf	2 年生叶 Two-year leaf	茎 Stem	根 Root	全株 Total	根冠比 R/S
H	3	0.38 ± 0.11 ^{Aa}	1.22 ± 0.43 ^{Bb}	1.89 ± 1.06 ^{Abc}	2.82 ± 0.34 ^{Abc}	6.31 ± 3.94 ^{Ac}	0.88 ± 0.35 ^{Aa}
	5	0.75 ± 0.54 ^{Aa}	1.40 ± 0.71 ^{Ab}	1.90 ± 0.15 ^{Abc}	2.03 ± 0.0B ^{Ac}	6.08 ± 0.36 ^{Bc}	0.50 ± 0.03 ^{Ba}
	8	0.31 ± 0.02 ^{Ca}	4.50 ± 0.05 ^{Aa}	3.45 ± 0.26 ^{Bab}	6.51 ± 0.19 ^{Cab}	14.77 ± 0.01 ^{Bab}	0.79 ± 0.04 ^{ABa}
	9	0.20 ± 0.12 ^{Aa}	2.21 ± 0.12 ^{Cb}	2.69 ± 0.32 ^{Babc}	5.55 ± 0.01 ^{Cabc}	10.64 ± 0.34 ^{Cbc}	1.09 ± 0.07 ^{Aa}
	23	0.27 ± 0.23 ^{Aa}	1.57 ± 0.01 ^{Bb}	1.04 ± 0.45 ^{Ac}	2.46 ± 1.24 ^{Bbc}	5.34 ± 1.92 ^{Bc}	0.85 ± 0.16 ^{Ba}
	24	0.15 ± 0.01 ^{Ba}	2.12 ± 0.01 ^{Bb}	2.69 ± 0.04 ^{Aabc}	6.00 ± 0.82 ^{Aab}	10.96 ± 1.50 ^{Bbc}	1.21 ± 0.01 ^{Aa}
	34	0.78 ± 0.11 ^{Aa}	2.82 ± 0.43 ^{Cb}	2.37 ± 0.44 ^{Bbc}	4.28 ± 0.34 ^{Bbc}	10.25 ± 0.94 ^{Bc}	0.69 ± 0.35 ^{Aa}
	37	0.89 ± 0.22 ^{Aa}	4.69 ± 0.31 ^{Aa}	3.48 ± 0.52 ^{Aa}	8.02 ± 0.22 ^{Aa}	17.07 ± 0.83 ^{Aa}	0.90 ± 0.13 ^{Aa}
	3	0.26 ± 0.06 ^{Ac}	1.82 ± 0.37 ^{Bef}	1.04 ± 0.18 ^{Ad}	4.06 ± 0.44 ^{Ae}	7.18 ± 0.34 ^{Ac}	1.20 ± 0.55 ^{Aa}
	5	0.23 ± 0.01 ^{Ac}	2.00 ± 0.01 ^{Ae}	2.19 ± 0.01 ^{Ac}	2.08 ± 0.01 ^{ABAf}	6.50 ± 0.01 ^{ABc}	0.47 ± 0.01 ^{Bb}
M	8	0.24 ± 0.00 ^{Cc}	4.34 ± 0.00 ^{Ab}	3.47 ± 0.06 ^{Bb}	7.31 ± 0.45 ^{BCbc}	15.36 ± 1.43 ^{Bb}	0.91 ± 0.01 ^{Aab}
	9	0.41 ± 0.22 ^{Ac}	3.64 ± 0.06 ^{Bbc}	3.51 ± 0.23 ^{ABab}	6.21 ± 0.33 ^{BCcd}	13.77 ± 0.018 ^{Bb}	0.83 ± 0.10 ^{Bab}
	23	0.30 ± 0.01 ^{Ac}	1.16 ± 0.12 ^{Af}	1.18 ± 0.01 ^{Ad}	2.65 ± 0.01 ^{ABf}	5.29 ± 0.27 ^{Ac}	1.00 ± 0.09 ^{Aab}
	24	0.63 ± 0.03 ^{Ab}	2.58 ± 0.19 ^{Bcd}	2.39 ± 0.26 ^{Ab}	6.02 ± 0.95 ^{Ab}	11.61 ± 1.74 ^{Bb}	1.08 ± 0.04 ^{Aab}
	34	2.01 ± 0.01 ^{Ba}	2.36 ± 0.01 ^{Cde}	3.29 ± 0.18 ^{ABb}	5.75 ± 1.44 ^{Bd}	13.41 ± 0.15 ^{Bb}	0.75 ± 0.01 ^{Aab}
	37	0.70 ± 0.27 ^{Ab}	5.84 ± 0.86 ^{Aa}	3.87 ± 0.38 ^{Aa}	8.85 ± 1.43 ^{Aa}	19.26 ± 0.45 ^{Aa}	0.87 ± 0.22 ^{Aab}
	3	0.87 ± 0.28 ^{Ab}	4.17 ± 0.98 ^{ABb}	2.85 ± 0.47 ^{Acd}	4.14 ± 0.46 ^{Ag}	12.03 ± 3.99 ^{Ab}	1.12 ± 0.17 ^{Aa}
	5	0.14 ± 0.01 ^{Ad}	2.31 ± 0.01 ^{Ad}	1.47 ± 0.26 ^{Af}	4.89 ± 0.06 ^{ABfg}	8.81 ± 0.30 ^{ABc}	1.25 ± 0.06 ^{Aa}
	8	1.45 ± 0.04 ^{Acd}	5.76 ± 1.68 ^{Aa}	5.26 ± 0.56 ^{Aa}	0.23 ± 0.33 ^{ABbc}	20.69 ± 1.40 ^{Aa}	0.66 ± 0.03 ^{Cb}
	9	0.38 ± 0.10 ^{Acd}	4.86 ± 0.57 ^{Aab}	3.42 ± 0.28 ^{ABc}	6.62 ± 0.31 ^{Bde}	15.26 ± 0.70 ^{ABb}	0.77 ± 0.01 ^{Bb}
L	23	0.35 ± 0.02 ^{Acd}	1.84 ± 0.27 ^{Acd}	1.80 ± 0.09 ^{Aef}	3.20 ± 0.08 ^{Ag}	7.19 ± 0.28 ^{Ad}	0.83 ± 0.08 ^{Bb}
	24	0.69 ± 0.03 ^{Abc}	4.62 ± 0.08 ^{Aab}	2.43 ± 0.38 ^{Ade}	7.35 ± 0.19 ^{Acd}	15.09 ± 0.30 ^{ABb}	0.95 ± 0.09 ^{Aab}
	34	0.56 ± 0.22 ^{Abc}	4.97 ± 0.30 ^{Bab}	3.20 ± 0.02 ^{ABc}	5.85 ± 0.95 ^{Bef}	14.58 ± 0.93 ^{Bb}	0.67 ± 0.11 ^{Ab}
	37	1.69 ± 0.62 ^{Aa}	3.75 ± 0.54 ^{Abc}	4.21 ± 0.12 ^{Ab}	9.83 ± 2.16 ^{Aa}	19.48 ± 3.21 ^{Aa}	1.00 ± 0.11 ^{Aab}
	3	0.39 ± 0.07 ^{Aa}	6.86 ± 1.47 ^{Aa}	3.15 ± 0.67 ^{Aa}	10.60 ± 0.39 ^{Aa}	20.99 ± 0.56 ^{Aa}	0.97 ± 0.16 ^{Aab}
	5	0.85 ± 0.29 ^{Aa}	3.30 ± 0.90 ^{Ab}	3.77 ± 0.32 ^{Aa}	5.01 ± 0.16 ^{Aa}	12.92 ± 2.66 ^{Aa}	0.63 ± 0.20 ^{Bb}
	8	0.53 ± 0.01 ^{Ba}	7.03 ± 0.56 ^{Aa}	4.79 ± 0.56 ^{ABa}	8.59 ± 0.67 ^{Aa}	20.94 ± 1.03 ^{Aa}	0.70 ± 0.04 ^{BCab}
	9	0.57 ± 0.36 ^{Aa}	4.08 ± 0.04 ^{ABab}	3.68 ± 0.12 ^{Aa}	7.56 ± 0.39 ^{Aa}	15.89 ± 0.61 ^{Aa}	0.91 ± 0.04 ^{ABab}
	23	0.37 ± 0.10 ^{Aa}	3.30 ± 0.80 ^{Aab}	2.65 ± 0.93 ^{Aa}	8.51 ± 0.66 ^{Aa}	14.83 ± 0.35 ^{Aa}	1.35 ± 0.11 ^{ABab}
	24	0.45 ± 0.19 ^{ABa}	3.64 ± 0.21 ^{Ab}	3.60 ± 0.25 ^{Aa}	7.54 ± 0.022 ^{Aa}	15.24 ± 0.45 ^{Aa}	0.98 ± 0.06 ^{Aab}
CK	34	0.69 ± 0.15 ^{Aa}	7.08 ± 0.18 ^{Aa}	5.22 ± 0.53 ^{Aa}	11.96 ± 0.15 ^{Aa}	24.96 ± 1.01 ^{Aa}	0.92 ± 0.05 ^{Aab}
	37	1.44 ± 0.67 ^{Aa}	4.72 ± 1.24 ^{Aab}	3.53 ± 1.38 ^{Aa}	11.18 ± 0.61 ^{Aa}	20.87 ± 1.06 ^{Aa}	1.03 ± 0.23 ^{Aa}

H、M、L、CK 分别代表重度磷胁迫、中度磷胁迫、轻度磷胁迫以及正常供磷 H、M、L、CK indicate heavy phosphorus deficiency ,medium phosphorus deficiency ,slight phosphorus deficiency and normal phosphorus supply respectively 根冠比 = 地下部分干重/地上部分干重 R/S : Ratio of root to shoot (weight of above ground part) 表中所列数字为同一无性系 3 个植株样品测定值平均数 (n = 3) ,同一列中不同小写字母表示不同无性系间有显著差异 (p < 0.05) ,同一行中不同大写字母表示不同处理水平间有显著差异 Data in tables are average values from three plants , the different small letters in same column indicate significant difference between the different clones (p < 0.05) , and the different capital letters in same row indicate significant difference between the treatments

性系较低,两者的绝对值差值最大可达 11.0 mg·g⁻¹。在中度胁迫条件下不同杉木无性系间差异显著,其中 8、9、37 号无性系干物质积累量较高,3、5 号较低,24、34 号无性系介于两者之间。在轻度胁迫和正常供磷条件下,各杉木无性系间干物质积累量的绝对值差异均较小,且无性系间的差异未达到显著水平。

从表 1 可看出,随磷胁迫加重,各无性系干物质积累量的降幅明显不同,与正常供磷条件相比,8、9、24、37 号无性系在重度胁迫条件下的干物质积累量仅下降了 18.21%~33.04%,而 34 号无性系则下降了 73.06%,降幅为最大。对各无性系根冠比分析可知,在正常供磷和轻度磷胁迫条件下,除 3 和 37

号无性系根冠比大于 1 外,其它 6 个无性系介于 0.67~0.98 之间,但在中度和重度胁迫条件下,9、24 号无性系根冠比分别达到了 1.09 和 1.21。各无性系根系干重在正常供磷条件下差别不大,但在胁迫条件下,8、9、24、37 号无性系根系干重明显高于其它无性系。

2.2 磷胁迫对不同杉木无性系磷素吸收效率的影响

从表 2 可看出,随胁迫程度的加重,杉木无性系各器官和全株的磷素吸收效率均呈显著下降趋势,并在重度胁迫条件下达到最低值。在同一胁迫条件下,不同无性系的磷吸收效率也存在显著差异。重度胁迫条件下,杉木无性系叶、茎、根和全株的磷素

表 2 磷胁迫条件下不同杉木无性系的磷素吸收效率(mg·株⁻¹)
Table 2 Phosphorus absorption efficiency (mg·tree⁻¹) of different Chinese fir clones under different phosphorus stress

磷水平 P levels	无性系 Clones	磷素吸收效率 Phosphorus absorption efficiency				
		1 年生叶	2 年生叶	茎	根	全株
		One-year leaf	Two-year leaf	Stem	Root	Total
H	3	0.11±0.01 ^{Bc}	0.97±0.46 ^{Gd}	1.52±0.77 ^{Bde}	3.84±0.15 ^{Ce}	6.43±0.39 ^{Ad}
	5	0.35±0.18 ^{Bab}	1.23±0.63 ^{Bcd}	4.21±0.49 ^{Abe}	2.81±0.45 ^{Ce}	8.59±0.75 ^{Ccd}
	8	0.20±0.01 ^{Cbc}	3.88±0.45 ^{Cb}	5.64±0.74 ^{Bab}	17.66±0.52 ^{Bb}	27.36±2.71 ^{Bb}
	9	0.10±0.04 ^{Bc}	2.52±0.81 ^{Bbc}	2.44±0.54 ^{Bde}	9.72±0.76 ^{Ccd}	14.77±1.16 ^{Cc}
	23	0.05±0.03 ^{Bc}	0.74±0.23 ^{Bd}	1.02±0.40 ^{Be}	2.99±0.15 ^{Be}	4.80±0.75 ^{Bd}
	24	0.03±0.00 ^{Cc}	3.03±0.03 ^{Cb}	2.77±0.24 ^{Ccd}	10.35±1.55 ^{De}	16.18±1.81 ^{Cc}
	34	0.15±0.04 ^{Cc}	3.25±0.88 ^{Cb}	2.30±0.43 ^{Cde}	4.78±0.78 ^{Bde}	10.47±1.11 ^{Ccd}
	37	0.42±0.09 ^{Ba}	7.42±0.78 ^{Aa}	7.16±1.27 ^{Ba}	22.79±1.52 ^{Ba}	37.79±3.66 ^{Ba}
M	3	0.08±0.01 ^{Bde}	1.68±0.57 ^{Ce}	1.35±0.28 ^{Bd}	10.54±1.27 ^{Bcd}	13.64±2.12 ^{Cc}
	5	0.12±0.01 ^{Bede}	1.86±0.04 ^{Be}	2.61±0.01 ^{Be}	3.37±0.01 ^{Cd}	10.96±0.08 ^{Cc}
	8	0.02±0.01 ^{De}	6.99±0.09 ^{Cb}	4.55±0.08 ^{Bb}	13.60±0.75 ^{Be}	45.15±0.92 ^{Bb}
	9	0.23±0.09 ^{ABbc}	4.15±0.07 ^{Bd}	3.41±0.33 ^{Bbc}	16.22±1.44 ^{Be}	24.01±1.94 ^{Bd}
	23	0.14±0.01 ^{Bcd}	1.14±0.17 ^{Be}	1.19±0.19 ^{Bd}	5.09±0.06 ^{ABde}	7.55±0.43 ^{Be}
	24	0.20±0.01 ^{Be}	5.51±0.35 ^{Be}	4.34±0.35 ^{Cb}	29.12±4.66 ^{Bab}	39.17±3.94 ^{Bbc}
	34	0.97±0.01 ^{Abe}	3.28±0.11 ^{Cd}	2.31±0.37 ^{Ccd}	23.93±4.36 ^{Ab}	30.49±4.84 ^{Bcd}
	37	0.34±0.01 ^{Bb}	12.56±1.31 ^{Aa}	8.69±1.23 ^{ABa}	32.07±4.23 ^{ABa}	53.66±6.87 ^{ABa}
L	3	0.37±0.10 ^{Ab}	8.03±1.65 ^{Bbc}	5.37±0.82 ^{Acd}	18.93±0.93 ^{Ade}	32.70±3.51 ^{Bede}
	5	0.11±0.01 ^{Bb}	4.58±0.88 ^{Bbc}	2.88±0.64 ^{Bde}	14.88±1.89 ^{Be}	22.43±3.42 ^{Bde}
	8	0.34±0.03 ^{Bb}	16.98±4.42 ^{Ba}	15.81±2.21 ^{Aa}	48.72±6.85 ^{Aa}	81.84±13.51 ^{Aa}
	9	0.23±0.05 ^{ABb}	8.80±2.06 ^{Ab}	3.89±0.86 ^{Bde}	25.69±0.99 ^{Ad}	38.60±3.96 ^{Acd}
	23	0.11±0.03 ^{Bb}	3.55±0.91 ^{Be}	2.35±0.21 ^{ABe}	9.43±1.62 ^{Ae}	15.44±2.76 ^{ABe}
	24	0.51±0.04 ^{Ab}	9.43±0.32 ^{Ab}	8.03±2.08 ^{Ac}	37.00±1.38 ^{Abe}	54.96±3.81 ^{Abe}
	34	0.28±0.08 ^{BCb}	8.46±0.31 ^{Bbc}	4.84±0.06 ^{Bde}	28.46±4.66 ^{Acd}	42.03±3.12 ^{Bc}
	37	2.44±0.17 ^{ABa}	5.31±1.02 ^{Abe}	12.10±1.09 ^{ABb}	43.30±3.51 ^{Aab}	63.15±5.79 ^{Ab}
CK	3	0.22±0.03 ^{Bb}	24.52±4.05 ^{Ab}	7.11±1.36 ^{Ac}	21.62±3.41 ^{Ac}	53.46±4.84 ^{Acd}
	5	1.27±0.33 ^{Ab}	12.55±3.48 ^{Ac}	9.93±0.91 ^{Abe}	26.15±1.38 ^{Abe}	49.90±6.09 ^{Acd}
	8	0.75±0.01 ^{Ab}	36.99±2.63 ^{Aa}	14.57±1.27 ^{Aab}	44.04±5.33 ^{Aa}	96.35±9.24 ^{Aa}
	9	0.44±0.02 ^{Ab}	8.73±0.58 ^{Ac}	7.07±0.16 ^{Ac}	17.45±0.87 ^{Bcd}	39.69±1.82 ^{Ad}
	23	0.34±0.07 ^{Ab}	8.54±2.14 ^{Ac}	6.63±1.51 ^{Ac}	9.10±2.51 ^{Ad}	24.61±4.22 ^{Ae}
	24	0.36±0.11 ^{ABb}	9.32±0.51 ^{Ac}	12.46±0.89 ^{Aab}	20.31±1.23 ^{Cc}	62.45±2.73 ^{Abe}
	34	0.35±0.06 ^{Bb}	15.09±0.47 ^{Ac}	16.15±1.71 ^{Aa}	31.75±2.50 ^{Ab}	63.33±4.74 ^{Abe}
	37	3.88±0.32 ^{Aa}	13.82±1.98 ^{Ac}	13.77±3.89 ^{Aab}	28.98±8.37 ^{ABbc}	65.46±9.55 ^{Ab}

下注见表 1 Note see Table 1

吸收效率差异显著,其中 8、37 号无性系各器官的磷素吸收效率较高,23 号无性系较低,3、5、9、24、34 号无性系处于中等水平。在中度胁迫和轻度胁迫条件下表现出相似的变化规律,其中 8、24、37 无性系磷素吸收效率均较高,5、23 号无性系吸收效率较低,其它无性系介于以上两者之间。虽然正常供磷条件下各杉木无性系的吸收效率也存在统计学差异,但各无性系叶和茎的磷素吸收效率差异很小,根的差异较大,其中 5、8、34、37 号无性系根和全株的磷素吸收效率均较高,9 和 23 号无性系较低,3、24 号无性系处于中等水平。

不同磷胁迫条件下杉木无性系磷素吸收效率的比较中发现,磷胁迫引起杉木磷素吸收效率的显著

降低,但不同无性系的下降程度明显不同。无论从各器官,还是从全株来看,8、9、24、37 号无性系的磷素吸收效率受胁迫影响较小,其中 8、24、37 号无性系磷素吸收效率较高,9 号无性系保持在较低水平;3、23 号无性系受磷胁迫影响程度较大,随着胁迫程度加剧,磷素吸收效率迅速下降,5 号无性系介于两者之间。

2.3 磷胁迫对不同杉木无性系磷素利用效率的影响

从表 3 可看出,杉木无性系各器官和全株的磷素利用效率存在显著的磷胁迫效应和无性系效应。不同胁迫处理间的磷素利用效率差异达到显著水平,随磷胁迫的加重,各无性系叶、茎、根和全株的磷

表 3 不同磷胁迫条件下杉木无性系的磷素利用效率(g·mg⁻¹)
Table 3 Phosphorus use efficiency (g·mg⁻¹) of different Chinese fir clones under different phosphorus stress

磷水平 P levels	无性系 Clones	磷素利用效率 Phosphorus use efficiency				
		1 年生叶 One-year leaf	2 年生叶 Two-year leaf	茎 Stem	根 Root	全株 Total
H	3	1.39 ± 0.23 ^{Aabc}	1.58 ± 0.02 ^{Bd}	2.38 ± 0.66 ^{Aab}	2.12 ± 0.28 ^{Bcd}	1.95 ± 0.66 ^{Bb}
	5	1.62 ± 0.78 ^{Aa}	1.62 ± 0.32 ^{ABd}	0.86 ± 0.00 ^{Cd}	1.49 ± 0.24 ^{Ade}	2.12 ± 0.10 ^{Bc}
	8	0.50 ± 0.02 ^{Bbc}	5.26 ± 0.524 ^{Aa}	2.12 ± 0.05 ^{Bbc}	2.41 ± 0.11 ^{Bbcd}	2.55 ± 0.17 ^{Ba}
	9	0.39 ± 0.16 ^{Ac}	2.03 ± 0.51 ^{BCcd}	3.00 ± 0.17 ^{Ba}	3.30 ± 0.93 ^{Aab}	2.55 ± 0.50 ^{Aa}
	23	1.56 ± 0.09 ^{Aab}	3.50 ± 1.04 ^{Aab}	1.07 ± 0.18 ^{Ad}	2.02 ± 0.67 ^{Acde}	1.90 ± 0.48 ^{Ab}
	24	0.73 ± 0.01 ^{BCabc}	1.48 ± 0.01 ^{Ad}	2.62 ± 0.07 ^{Aab}	3.48 ± 0.15 ^{Aa}	2.51 ± 0.23 ^{Aa}
	34	0.99 ± 0.18 ^{Babc}	1.02 ± 0.07 ^{Bd}	1.69 ± 0.22 ^{Bc}	1.09 ± 0.05 ^{ABe}	2.05 ± 0.04 ^{Ac}
	37	1.91 ± 0.25 ^{Aa}	2.97 ± 0.03 ^{Abc}	1.70 ± 0.06 ^{Ac}	2.83 ± 0.08 ^{ABbc}	2.46 ± 0.02 ^{Aa}
M	3	0.86 ± 0.07 ^{Acd}	2.01 ± 0.07 ^{ABcd}	0.80 ± 0.02 ^{Bf}	1.57 ± 0.04 ^{Cd}	1.41 ± 0.02 ^{Ce}
	5	0.45 ± 0.01 ^{Bd}	2.15 ± 0.03 ^{ABcd}	1.84 ± 0.00 ^{Bd}	1.28 ± 0.01 ^{ABd}	1.53 ± 0.01 ^{Ae}
	8	3.84 ± 0.60 ^{Aa}	2.70 ± 0.03 ^{Bab}	2.65 ± 0.01 ^{Ac}	3.93 ± 0.09 ^{ABa}	2.39 ± 0.02 ^{Aa}
	9	0.75 ± 0.18 ^{Acd}	3.19 ± 0.01 ^{Aa}	3.62 ± 0.01 ^{Ab}	2.38 ± 0.02 ^{ABb}	2.35 ± 0.01 ^{Ab}
	23	0.65 ± 0.02 ^{Ad}	1.18 ± 0.11 ^{Be}	1.18 ± 0.14 ^{Ae}	1.38 ± 0.01 ^{ABd}	1.21 ± 0.06 ^{Af}
	24	1.97 ± 0.01 ^{Ab}	1.78 ± 0.53 ^{Ade}	2.65 ± 0.05 ^{Ac}	1.97 ± 0.21 ^{Bc}	2.00 ± 0.02 ^{Bd}
	34	1.37 ± 0.01 ^{Aa}	2.38 ± 0.00 ^{Bde}	2.18 ± 0.09 ^{Aa}	1.58 ± 0.02 ^{Ad}	1.99 ± 0.09 ^{Bd}
	37	1.76 ± 0.15 ^{ABbc}	3.00 ± 0.02 ^{Aa}	2.00 ± 0.05 ^{Ad}	2.72 ± 0.12 ^{ABb}	2.27 ± 0.13 ^{ABc}
L	3	2.06 ± 0.26 ^{Aa}	2.17 ± 0.19 ^{Ab}	1.51 ± 0.08 ^{ABcd}	4.41 ± 0.07 ^{Aa}	1.36 ± 0.11 ^{Aa}
	5	0.19 ± 0.01 ^{Bd}	1.19 ± 0.16 ^{Bc}	0.75 ± 0.01 ^{De}	1.62 ± 0.13 ^{Acd}	1.15 ± 0.08 ^{Bf}
	8	0.59 ± 0.02 ^{Bcd}	1.96 ± 0.21 ^{BCbc}	1.75 ± 0.01 ^{Cc}	1.40 ± 0.08 ^{Cde}	1.56 ± 0.01 ^{Bde}
	9	0.64 ± 0.07 ^{Ac}	2.71 ± 0.14 ^{ABab}	3.05 ± 0.23 ^{Ba}	1.71 ± 0.03 ^{BCcd}	2.07 ± 0.01 ^{Aa}
	23	1.12 ± 0.14 ^{Ab}	2.29 ± 0.01 ^{ABab}	1.38 ± 0.04 ^{Ad}	1.91 ± 0.30 ^{Abc}	1.18 ± 0.12 ^{Ac}
	24	0.94 ± 0.03 ^{Bbc}	2.26 ± 0.02 ^{Aab}	0.74 ± 0.10 ^{Be}	1.46 ± 0.11 ^{Bcd}	1.36 ± 0.02 ^{Cef}
	34	1.12 ± 0.21 ^{Bb}	3.11 ± 0.68 ^{Aa}	2.12 ± 0.01 ^{Bb}	1.20 ± 0.06 ^{ABe}	1.71 ± 0.03 ^{Ccd}
	37	1.20 ± 0.02 ^{Bb}	2.66 ± 0.02 ^{Aab}	1.47 ± 0.05 ^{Acd}	2.23 ± 0.18 ^{Bb}	1.93 ± 0.06 ^{Bbc}
CK	3	0.70 ± 0.06 ^{Ab}	1.92 ± 0.19 ^{ABb}	1.40 ± 0.11 ^{Bd}	0.46 ± 0.05 ^{Dbc}	1.02 ± 0.10 ^{Dc}
	5	0.57 ± 0.09 ^{ABb}	1.49 ± 0.02 ^{Bcd}	2.29 ± 0.01 ^{Aa}	0.87 ± 0.03 ^{Ba}	1.08 ± 0.04 ^{Bb}
	8	0.38 ± 0.01 ^{Bb}	1.34 ± 0.04 ^{Cd}	1.58 ± 0.09 ^{Ccd}	0.52 ± 0.02 ^{Db}	0.91 ± 0.03 ^{Bcd}
	9	0.74 ± 0.22 ^{Ab}	1.91 ± 0.07 ^{Cb}	1.92 ± 0.03 ^{Cb}	0.78 ± 0.01 ^{Ca}	1.26 ± 0.01 ^{Bb}
	23	0.40 ± 0.05 ^{Ab}	1.28 ± 0.08 ^{Bd}	1.11 ± 0.04 ^{Ae}	0.77 ± 0.12 ^{Ba}	0.96 ± 0.07 ^{Bc}
	24	0.57 ± 0.12 ^{Cb}	1.42 ± 0.03 ^{Acd}	1.04 ± 0.02 ^{Be}	0.64 ± 0.02 ^{Cab}	0.91 ± 0.03 ^{Dcd}
	34	1.38 ± 0.14 ^{Ba}	3.32 ± 0.01 ^{Aa}	1.69 ± 0.04 ^{Bbc}	0.86 ± 0.04 ^{Ba}	1.54 ± 0.04 ^{Da}
	37	0.53 ± 0.12 ^{Cb}	1.67 ± 0.09 ^{Bbc}	0.90 ± 0.17 ^{Be}	0.43 ± 0.08 ^{Cc}	0.74 ± 0.11 ^{Cd}

下注见表 1 Note see Table 1

素利用效率显著提高,并在重度胁迫条件下达到最高值。在同一胁迫条件下,不同无性系各器官及全株间的差异也达到显著水平,其中 8、9、24、37 号无性系各器官及全株的磷素利用效率较高,23 号无性系最低,3、5、34 号无性系介于以上两者之间。但不同无性系磷素利用效率的增加幅度明显不同,随胁迫的加重,8、9、37 号无性系的磷素利用效率增加最明显,分别增加了 60.30%、50.35% 和 69.86%,而且这 4 种无性系本身的磷素吸收效率也较高,说明这 4 种无性系能较好地适应低磷环境。虽然 24 号无性系在同一胁迫条件下的磷素利用效率较高,但随胁迫条件加剧,磷素利用效率增长缓慢。3、5、23、34 号无性系的磷素利用效率增长较快,但 23 号无性系的磷素利用效率较低,其对环境磷素的利用能力较差。

表 3 表明,重度胁迫条件下杉木无性系叶、茎、根的磷素利用效率存在明显差异,9、24 号无性系表现为根 > 茎 > 2 年生叶 > 1 年生叶,5、8、23、37 号无性系中 2 年生叶的磷素利用效率最高。随胁迫程度的减轻,它们之间的差异逐渐减小,在正常供磷条件下无明显差异。

3 结论与讨论

不同植物之间及同一植物的不同品种之间的磷素吸收和利用效率存在明显的基因型差异。在低磷的环境中,一些植物可以正常生长,但另一些植物的生长可能严重受阻甚至死亡(Fohse *et al.*, 1991)。不同植物种间或相同植物不同基因型间磷效率的差异说明,磷高效基因型的遗传学实质是长期在低磷环境胁迫压力下由于某些沉默基因的诱发表达或 DNA 序列的特定改变导致一系列适应性变化而获得高于一般基因型产量的基因个体(李继云和李振声, 1995)。本研究表明:不同杉木无性系间的干物质积累量、磷素吸收和利用效率存在显著差异,因此进行磷高效利用杉木类型的选择是可能的,具有重要现实意义。

在低磷环境条件下植物能维持正常生长代谢是植物磷营养高效率的标志,土培法被认为是矿质营养基因型筛选理想和可靠的方法(严小龙和张福锁, 1997; Gerloff, 1987)。本文通过土培试验的磷胁迫模拟研究发现,杉木无性系的磷素特性存在显著的无性系效应和磷胁迫效应。随磷胁迫程度的加重,杉木无性系的干物质积累量和磷素吸收效率下降,磷素利用效率显著增加,在同一胁迫条件下,杉木无性

系各器官及全株间的差异也达到显著水平。磷胁迫对 8、9、24、37 号无性系干物质积累量的影响相对较小,说明这 4 种无性系在磷胁迫条件下仍能保持稳定生物量,9、24 号无性系在重度磷胁迫条件下根冠比大于 1,说明磷胁迫导致了这两种无性系根系结构的改变。进一步分析表明这 4 种无性系是通过不同途径来适应环境的磷胁迫,8 号无性系的磷素吸收和利用效率均较高,24、37 号无性系具有较高的磷素吸收效率,而 9 号无性系则有较高的磷素利用效率。23 号无性系的干物质积累量受胁迫影响最大,其磷素吸收和利用效率均为最低。根系形态的改变、根系分泌物、根系对 $H_2PO_4^-$ 的吸收动力学差异以及植株对磷素的再利用等都可能造成植物间磷素效率的差异(马祥庆和梁霞, 2004)。已有研究表明,缺磷胁迫促使 8、9、24、37 号杉木无性系根际酸性磷酸酶活性明显增强,促进了植株对土壤磷素的吸收利用(梁霞等, 2005)。此外杉木无性系营养遗传特性的差异也会导致各无性系间磷素吸收和利用效率的差异。因此造成杉木无性系磷素差异的机制还需从多方面进行深入的研究。

磷素对植物生长具有重要作用,植物可通过多种途径获取环境的磷素并用于生物量积累。有研究认为磷素利用效率高的植物干物质积累量也高(何文寿, 2003),而且磷胁迫条件下磷素的吸收效率可衡量大豆(*Glycin max*)基因型的磷效率差异(童学军等, 2000)。本研究发现耐低磷环境的杉木无性系可通过提高磷素吸收效率或磷素利用效率来适应低磷环境。

参 考 文 献

- Cao J (曹靖), Zhang FS (张福锁) (2000). Phosphorus uptake and utilization efficiency in seedlings of different wheat genotypes as influenced by water supply at low soil phosphorus availability. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 731 - 735. (in Chinese with English abstract)
- Chen JL (陈金林), Shi JS (施季森), Wang GP (王光萍), Yu NJ (余能健), You WG (游为贵), Lin ZP (林志鹏), Huang DM (黄道明), Li WJ (李文杰) (1996a). A study of fertilization and afforestation density on fine family young plantation of *Cunninghamia lanceolata*. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 20(2), 20 - 23. (in Chinese with English abstract)
- Chen JL (陈金林), Yu YC (俞元春), Wang GP (王光萍), You WG (游为贵), Lin ZP (林志鹏), Huang DM (黄道明) (1996b). Analysis on growth response to fertilization in young *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Forest Research* (林业科学

- 研究), 9, 426 – 430. (in Chinese with English abstract)
- Fohse D, Claassen N, Jungk A (1991). Phosphorus efficiency of plant. II. Significant of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. *Plant and Soil*, 132, 261 – 272.
- Gerloff GC (1987). Intact-plant screening for tolerance of nutrient-deficiency stress. *Plant and Soil*, 99, 33 – 37.
- Gardiner DT, Christense NW (1990). Characterization of phosphorus efficiencies of two winter wheat cultivators. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1337 – 1340.
- Guo YC (郭玉春), Lin WX (林文雄), Shi QM (石秋梅), Liang YY (梁义元), He HQ (何华勤), Chen FY (陈芳育) (2003). Physiological adaptability of seeding rice genotypes with different P uptake efficiency under low P-deficient stress. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 14, 61 – 65. (in Chinese with English abstract)
- He WS (何文寿) (2003). Genotypic differences in phosphorus utilization efficiency among spring wheat varieties in Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas (干旱地区农业研究)*, 21 (2), 1 – 6. (in Chinese with English abstract)
- Li CJ (李春俭), Pang X (庞欣), Zhang FS (张福锁) (2003). Comparison on responses of different phosphorus-efficient wheat varieties to phosphorus-deficiency stress. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, 45, 936 – 943. (in Chinese with English abstract)
- Li JY (李继云), Li ZS (李振声) (1995). New breeding technology of crop with high acquisition to soil nutrition. *Science in China Series B (中国科学 B 辑)*, 25, 41 – 48. (in Chinese with English abstract)
- Liang X (梁霞), Liu AQ (刘爱琴), Ma XQ (马祥庆), Feng LZ (冯丽贞), Chen YL (陈友力) (2005). The effect of phosphorus deficiency stress on activities of acid phosphatase in different clones of Chinese fir. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 29, 54 – 59. (in Chinese with English abstract)
- Ma XQ (马祥庆), Liang X (梁霞) (2004). Research advances on mechanism of high phosphorus use efficiency of plants. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 15, 712 – 716. (in Chinese with English abstract)
- Morris RA, Garrity DP (1993). Resource capture and utilization in intercropping: non-nitrogen nutrients. *Field Crops Research*, 34, 319 – 334.
- Raghothama KG (1999). Phosphate acquisition. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50, 665 – 693.
- Tong XJ (童学军), Lu YG (卢永根), Yan XL (严小龙) (2000). Studies on the characteristics of phosphorus efficiency of native soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) germplasm: differences in characteristics of phosphorus efficiency of shoot and root among soybean genotype and correlation analysis. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences (中国油料作物学报)*, 22 (4), 48 – 53. (in Chinese with English abstract)
- Vance CP, Claudia US, Allan DL (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157, 423 – 447.
- Wang D, Bormann FH, Lugo AE, Bowden RD (1991). Comparison of nutrient use efficiency and biomass production in five tropical tree taxa. *Forest Ecology and Management*, 46, 1 – 21.
- Wang QR (王庆仁), Li JY (李继云), Li ZS (李振声) (1998). Dynamics and prospect on studies of high acquisition of soil unavailable phosphorus by plants. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences (植物营养与肥料学报)*, 4, 107 – 116. (in Chinese with English abstract)
- Wang Y (王艳), Sun J (孙杰), Wang RP (王荣萍), Mi GH (米国华), Zhang FS (张福锁) (2003). Differences in uptake and utilization efficiency for phosphorus and correlation in maize inbred lines. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology (应用与环境生物学报)*, 9, 479 – 481. (in Chinese with English abstract)
- Xie YR (谢钰容), Zhou ZC (周志春) (2002). Research advance on adaptation mechanism of forest tree to low-phosphorus stress and genetics of phosphorus efficiency. *Forest Research (林业科学研究)*, 15, 734 – 740. (in Chinese with English abstract)
- Yan XL (严小龙), Zhang FS (张福锁) (1997). *Genetics of Plant Nutrition (植物营养与遗传学)*. China Agriculture Press, Beijing, 1 – 30. (in Chinese)
- Yu YC (俞元春), Chen JL (陈金林), Zeng SC (曾曙才), You WG (游为贵), Lin ZP (林志鹏), Huang DM (黄道明), Li WJ (李文杰) (1997). Studies on the P utilization percent of young Chinese fir plantation. *Journal of Nanjing Forestry University (南京林业大学学报)*, 21 (1), 33 – 36. (in Chinese with English abstract)
- Yu XT (俞新妥) (2003). *The Anthology of Yu Xin Tuo (俞新妥文选)*. China Forestry Publishing House, Beijing, 7 – 10. (in Chinese)
- Zhang HC (张焕朝), Wang GP (王改萍), Xu XZ (徐锡增), Xu CK (徐成凯), Hu ZY (胡正义) (2003). Phosphate uptake characteristics of kinetics and phosphorus efficiency in clones of poplar. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 36 (6), 40 – 46. (in Chinese with English abstract)
- Zhou ZC (周志春), Xie YR (谢钰容), Jin GQ (金国庆), Chen Y (陈跃), Song ZY (宋振英) (2005). Study on phosphorus efficiency of different provenances of *Pinus massoniana*. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 41 (4), 25 – 30. (in Chinese with English abstract)