

文章编号: 1001-1498(2006)02-0211-05

马褂木种源磷效率特性差异研究

王 剑^{1,2}, 周志春^{*}, 饶龙兵¹, 金国庆¹, 李建民³

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2 山东农业大学, 山东 泰安 271018

3. 福建省林业科技推广总站, 福建 福州 350003)

摘要: 设计了低磷 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和高磷 ($180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 两个磷素处理水平的盆栽实验, 研究马褂木 6 个代表性种源的磷效率特性差异及其相关性状的关系。结果表明, 马褂木种源磷效率差异较大, 其值变化在 15.4% ~ 38.9%。结合考虑种源对磷肥的敏感性及在不同磷素水平下的生长表现, 认为湖南通道为耐低磷型或高磷效率的优良种源, 而贵州黎平和湖南邵阳则分别为磷素中等敏感型和磷素敏感型优良种源。研究发现, 马褂木种源磷效率与磷素的吸收效率有关, 而与磷素的利用效率相关性较小。低磷水平下种源的干物质生产能力可很好地指示磷效率的大小。高磷效率的种源在磷胁迫条件下具有干物质积累量高、叶片宽大、数量多、须侧根发达等特点, 而低磷效率种源的干物质积累量低、叶片窄小、须侧根不发达, 并呈现缺磷症状。

关键词: 马褂木; 种源; 低磷胁迫; 磷效率

中图分类号: S722.3 文献标识码: A

Characteristics of Phosphorus Efficiency of Different Provenances in *Liriodendron chinense*

WANG Jian¹, ZHOU Zhichun¹, RAO Longbing¹, JIN Guoqing¹, LI Jianmin²

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang China 2. Shandong Agriculture University, Taian 271018

Shandong China 3. The Extending Center for Forestry Science and Technology of Fujian Province, Fuzhou 350003 Fujian China)

Abstract Soil culture experiments at two phosphorus levels ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were conducted to study the characteristics of phosphorus efficiency of different provenances of *Liriodendron chinense*. The result showed that phosphorus efficiency varied from 15.4% to 38.9% with the provenances tested. Based on the sensitivity to phosphorus supply and growth performance at two phosphorus levels, the provenance from Tongdao of Hunan could be considered as a superior provenance with high phosphorus efficiency or high tolerability to phosphorus stress, while that from Liping of Guizhou and Shaoyang of Hunan were two excellent provenances with moderate and strong sensitivity to phosphorus supply respectively. It was found that PE was significantly and positively related to P absorption, but P use efficiency. The dry matter accumulation of provenance under low phosphorus stress was a good indicator of its phosphorus efficiency. Compared with the provenances with low PE, the provenances with high PE possessed greater dry matter accumulation, more and larger leaves, extensive lateral root system and more fibrous roots in phosphorus stress. Provenances with low phosphorus efficiency were observed to appear symptoms of phosphorus deficiency.

Key words *Liriodendron chinense*, provenances, low phosphorus stress, phosphorus efficiency

收稿日期: 2005-03-15

基金项目: 福建省科技厅重点项目“马褂木营养高效种源选择及共生菌根研究”(2003N040)

作者简介: 王 剑 (1980-), 男, 山东泰安人, 山东农业大学与中国林科院亚林所联合培养在读硕士研究生。

* 通讯作者: 周志春 (1963-), 男, 江苏丹阳人, 博士, 研究生, 博士生导师。

土壤中全磷含量很高,但其有效磷含量却很低,尤其是我国长江以南红壤的有效磷含量更加缺乏,成为影响该地区作物和林木生长的主要限制因子之一^[1]。传统的农林业生产主要是通过改土施肥等措施提高产量,却较少考虑通过植物育种技术以提高植物对磷素的吸收和利用。大量施用磷肥其实是一种高投入、低产出、高污染的栽培技术措施,对于我国这样一个磷矿资源缺乏的国家来说是不可取的。已有研究表明,不同植物对土壤磷素的吸收和利用存在显著差异,植物磷效率的差异不仅存在于种间,而且存在于种内不同品种间,并在植物的生理生化过程中表现出来^[2]。从植物营养性状遗传改良入手,挖掘和筛选磷素高效利用的植物基因型,以补充替代传统方法所需要的能源和化学资源,具有重要的现实意义。

马褂木 (*Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg.) 是我国南方山地优先发展的乡土阔叶树种之一,其适应性强、速生丰产性能显著、材质优异,适宜作为纸浆纤维材和胶合板用材定向培育。鉴于我国南方土壤普遍缺磷是制约人工林发展的瓶颈因子,项目组在开展我国南方重要针叶用材树种马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 耐低磷育种的同时,同时启动了亚热带地区重要阔叶用材树种马褂木磷效率的育种。基于前文^[3]对马褂木种源根系生长和干物质积累与磷素关系的研究,本文则进一步报道马褂木不同地理种源磷效率特性差异的研究结果。

1 材料与方 法

1.1 材料来源

选择浙江遂昌、福建武夷山、江西庐山、湖南邵阳、湖南通道、贵州黎平 6 个马褂木种源进行磷肥盆栽试验。盆栽试验基质取自亚林所虎山的贫瘠缺磷酸性红壤,其有机质含量为 $6.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 N 和全 P 含量分别为 0.34 、 $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水解 N、有效 K 和有效 P 含量分别 30.97 、 220.68 、 $5.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 4.47。

1.2 盆栽试验设计

种源磷素盆栽试验设置在亚林所内。基质土壤经过风干过筛后,与珍珠岩、过磷酸钙一起混合均匀并装盆,土壤和珍珠岩的质量比为 3:1,设置低磷(不施磷肥, - P)和高磷(过磷酸钙 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, + P)两种磷素水平处理。试验用磷肥为浙江绍兴产,含 P_2O_5 12.4%,低磷和高磷水平

盆栽基质的有效 P 含量分别为 5 、 $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每种磷素水平处理都有 6 个种源参试,每种源 32 盆。营养杯(盆)直径 10 cm,高 12 cm,每只营养杯装土约 1.5 kg。2004 年 4 月移栽芽苗(2 叶 1 芯大小),每营养杯 1 株。在芽苗开始正常生长后,每 15 d 每盆约喷施 N 和 K 各 5 mg 以保持 N、K 等营养的正常水平,直至收获。

1.3 试验收获和测定

马褂木磷素盆栽试验苗于 2004 年 9 月底起苗。不同磷水平下每种源随机选取 10 株生长正常的苗木,在测量其苗木高径生长和根系形态参数后,分单株将苗木分成根、茎、叶 3 部分,经 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min, $79 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干直到恒质量,测定各部分的干物质积累量。用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,钼锑抗比色法测定每株苗木根、茎、叶各部分的含磷量。

1.4 磷效率计算和数据分析

磷效率、吸收效率和利用效率分别按照如下公式计算^[4]:

磷效率 = 低磷胁迫下干物质积累量 / 高磷条件下干物质积累量 $\times 100\%$

磷素吸收效率 = 磷吸收量 / 株

磷素利用效率 = 干物质积累量 / 磷吸收量

用 SAS 统计软件的 ANOVA 程序按种源、磷肥水平分别进行两因素和单因素的方差分析,以检验种源、磷肥效应。采用简单相关分析估算不同磷素水平下马褂木种源磷效率与其相关性状的关联系数,以确定种源磷效率的特异性指标。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平下马褂木种源的干物质积累能力和磷效率

表 1 列出了不同磷水平下马褂木 6 个种源的干物质积累量。方差分析表明,马褂木干物质积累量存在显著的磷肥效应和种源效应。较之于低磷水平,高磷水平下马褂木种源的干物质积累量成倍增加,其增幅为 156.6% ~ 548.3%。按照种源区划,马褂木可分为东部和西部两个种源区,西部种源区又可分为西南和华中两个亚区,黔东南、湘西南、川东北则是其分布中心和优良种源区^[6-7]。研究发现,低磷条件下马褂木西部种源的干物质生产能力一般高于中部和东部种源。如湘西南的湖南通道种源具有很高的干物质积累量 ($0.505 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$),较干物质积累量最低的东部浙江遂昌种源高出 191.9%。黔东南

南的贵州黎平种源干物质生产能力也较强,高出浙江遂昌种源的 90.8%。福建武夷山属于东部种源,其苗木生长表现中等^[5],但其干物质积累量却较大,低于湖南通道种源而高于贵州黎平种源,这与该种源叶片数量多(0.259 g·株⁻¹)和根系发达(0.119 g·株⁻¹)有关。

表 1 不同磷水平下 6 个马褂木种源的干物质积累量和磷效率

种源	纬度 (°)N	经度 (°)E	干物质积累量/(g·株 ⁻¹)		磷效率/%
			-P	+P(>-P%)	
浙江遂昌	28.62	119.32	0.173	0.840 (385.7)	20.6
福建武夷山	27.72	18.00	0.449	1.153 (156.6)	38.9
江西庐山	29.58	115.98	0.317	1.043 (228.7)	30.4
湖南邵阳	27.25	111.38	0.185	1.198 (548.3)	15.4
湖南通道	26.17	109.77	0.505	1.367 (170.5)	36.9
贵州黎平	26.23	109.15	0.330	1.200 (263.6)	27.5

磷效率表示为低磷条件下的干物质积累量与高磷水平下的差异,可较好地反映植物对低磷胁迫的适应能力及在磷胁迫下的生长表现。表 1 结果发现,低磷胁迫下干物质生产能力高的湖南通道和福建武夷山两种源磷效率最大,分别为 36.9% 和 38.9%,其干物质的生产对磷肥的敏感性较低;贵州黎平和江西庐山两种源的磷效率中等,分别为 27.5% 和 30.4%,而湖南邵阳和浙江遂昌两种源的磷效率最低,仅分别为 15.4% 和 20.6%,对施用磷肥最为敏感。从种源在不同磷素水平下的生长表现^[3]、磷效率大小、对磷肥的敏感性等综合考虑,可初步认定湖南通道为耐低磷型或高磷效率的优良种源,适宜在有效磷含量较低的立地上造林,而贵州黎平和湖南邵阳则分别为磷素中等敏感型和磷素敏感性优良种源,应优先在有效磷含量较高的立地上应用,或配合施用磷肥以充分发挥其生长潜力。福建武夷山和江西庐山种源的磷效率虽然较高,但在低磷素水平下的生长表现却一般;浙江遂昌种源磷效率较低,且在不同磷素水平下干物质积累量也较小,在生产中应用这 3 个种源时应慎重。

2.2 不同磷水平下马褂木种源的磷素吸收效率

统计分析结果表明(表 2),马褂木磷素吸收效率在不同种源和不同磷素处理间差异分别达到 0.1 和 0.01 的显著水平。较之于低磷处理,高磷水平下马褂木种源根、茎、叶以及全株的磷素吸收效率平均分别增加了 183.3%、333.1%、183.6% 和 146.4%。

在低磷胁迫下,不管以根、茎和叶为单元,还是以整个植株为计算单元,参试种源的磷素吸收效率差异显著($p = 0.0002 \sim 0.0799$),尤其是高磷效率的湖南通道和福建武夷山种源磷素吸收效率最高,其全株磷素吸收效率分别为 0.6803 mg·株⁻¹ 和 0.6636 mg·株⁻¹。在高磷水平下,种源间磷素吸收效率的差异虽未达到统计学上的显著水平,但其绝对值却相差巨大,仍以湖南通道和福建武夷山两种源最高。相关分析发现,种源磷效率与磷素的吸收效率密切相关($r = 0.9202$),磷素吸收效率尤其是根系和叶片磷素吸收效率的提高应是导致种源高磷效率的一个重要原因。

表 2 不同磷水平下 6 个马褂木种源的磷素吸收效率

磷水平	种源	磷素吸收效率/(mg·株 ⁻¹)			
		根	茎	叶	全株
-P	浙江遂昌	0.0494	0.0499	0.1082	0.2076
	福建武夷山	0.1821	0.0800	0.4014	0.6636
	江西庐山	0.0817	0.0772	0.2218	0.3807
	湖南邵阳	0.0433	0.0557	0.1745	0.2735
	湖南通道	0.2343	0.1134	0.3326	0.6803
	贵州黎平	0.1334	0.0771	0.2180	0.4285
显著水平(p)		0.0002	0.0799	0.0326	0.0016
+P	浙江遂昌	0.2521	0.2292	0.5709	1.0523
	福建武夷山	0.3614	0.3007	0.7280	1.3902
	江西庐山	0.3005	0.3630	0.4923	0.5559
	湖南邵阳	0.3323	0.3212	0.4652	1.1187
	湖南通道	0.4451	0.2782	1.0169	1.6847
	贵州黎平	0.3602	0.4711	0.8573	0.6886
显著水平(p)		0.5386	0.2202	0.4409	0.5606

2.3 不同磷水平下马褂木种源的磷素利用效率

磷素利用效率是指植物吸收单位磷量后所生产的干物质量,用以说明植物体内磷素的代谢利用效率。表 3 按磷素水平列出了各种源根、茎、叶和全株磷素利用效率的估算值。研究发现,低磷水平下马褂木全株和茎的磷素利用效率在种源间差异较小,但根系和叶片磷素利用效率的种源差异却达到了极显著水平($p = 0.0091 \sim 0.0001$)。叶片的磷素利用效率以湖南通道种源最高(1.2931 g·mg⁻¹),而根系的磷素利用效率则以湖南邵阳种源最高(1.3324 g·mg⁻¹)。在高磷水平下,除茎外,根、叶和全株的磷素利用效率的种源差异都未达到统计学上的显著水平。较之于低(缺)磷处理,高磷水平下马褂木种源叶片(湖南通道除外)和全株磷素利用效率均有所提高,增幅分别为 38.9%~259.9% 和 6.0%~

36.6%, 而根和茎的磷素利用效率有增有减, 规律性较小。叶片和全株的磷素利用效率以福建武夷山和湖南邵阳种源最高, 湖南通道等种源次之。从相关分析结果来看, 马褂木种源磷效率和(全株、根、茎、叶)磷素利用效率的相关性较小 ($r = 0.7542 \sim 0.4813$), 较难依据磷素利用效率来确切地估算种源磷效率的大小, 这与马尾松种源磷效率的研究结果相异^[8]。

表 3 不同磷水平下 6 个马褂木种源的磷素利用效率

磷水平	种源	磷素利用效率 / ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$)			
		根	茎	叶	全株
- P	浙江遂昌	0.7812	0.7376	0.6362	0.6540
	福建武夷山	0.6758	0.8107	0.6588	0.6969
	江西庐山	0.9624	0.7536	0.8915	0.8251
	湖南邵阳	1.3324	0.9193	0.6132	0.8527
	湖南通道	0.6703	0.7502	1.2931	0.8738
	贵州黎平	0.7416	0.9153	0.6727	0.7682
	显著水平 (p)	0.0001	0.2951	0.0091	0.1123
+ P	浙江遂昌	0.9579	0.7742	1.0680	0.8936
	福建武夷山	0.7044	0.7101	1.9960	0.9474
	江西庐山	0.6574	0.6625	1.2380	0.8745
	湖南邵阳	0.8067	0.7588	2.2068	1.0994
	湖南通道	0.7573	1.0549	1.1800	0.9505
	贵州黎平	0.7331	0.6297	1.1380	0.8138
	显著水平 (p)	0.2573	0.0027	0.1009	0.3711

2.4 马褂木种源磷效率的相关特性分析

植物磷效率的大小有其深刻的形态学和生理学基础。由表 4 给出的马褂木种源磷效率与其苗木形态性状的相关系数可以看出, 低磷胁迫下种源磷效率与干物质积累量紧密相关 ($r = 0.9469$), 种源的干物质生产能力可很好地指示其磷效率的大小。实验观测到, 马褂木种源磷效率与叶片和根系主要生长参数的相关性显著。高磷效率的福建武夷山和湖南通道种源在低磷条件下具有叶片宽大, 数量多, 叶色浓绿, 须、侧根数多, 根体积大, 侧根总长较长的生长特点; 而低磷效率的湖南邵阳和浙江遂昌种源在磷胁迫条件下其叶片窄小, 数量少, 且易枯黄脱落, 有的叶片则呈暗紫色, 茎略显紫红色呈典型的缺磷症状, 根系也不发达(表 5)。与低磷效率种源相比, 高效率种源的叶片长和叶片宽分别提高 86.1% 和 56.9%, 叶片数多 25.4%, 须根数和侧根数分别多 324.0% 和 143.5%, 侧根总长高 145.9%, 根体积大 173.7%。试验未发现种源磷效率与苗高、地径、根冠比及主根长度间的显著相关性。

表 4 低磷胁迫下马褂木种源磷效率与苗木生长、根系性状的相关系数

性状	磷效率
干物质积累量	0.9469*
苗高	0.5137
地径	-0.4514
叶片数	0.7134
叶片长	0.9892*
叶片宽	0.9730*
根冠比	-0.4443
侧根数	0.8993*
须根数	0.9532*
主根长	0.5269
侧根总长	0.8751*
根体积	0.9240*

注: * 和 ** 显著性概率分别为 0.05 和 0.01

表 5 低磷胁迫下马褂木高磷效率和低磷效率种源叶片和根系生长参数对比

性状	高磷效率种源			低磷效率种源		
	福建武夷山	湖南通道	(平均)	浙江遂昌	湖南邵阳	(平均)
叶片数 / 片	8.0	8.8	8.4	6.5	6.8	6.7
叶片长 / cm	7.0	6.4	6.7	3.9	3.3	3.6
叶片宽 / cm	7.4	8.5	8.0	5.2	5.0	5.1
侧根数 / 根	15.0	15.2	15.1	5.0	7.4	6.2
须根数 / 根	97	115	106	28	22	25
侧根总长 / cm	102.1	113.2	107.7	31.6	56.0	43.8
根体积 / cm^3	1.17	0.90	1.04	0.35	0.41	0.38

3 小结与讨论

磷是林木生长发育的必需元素, 大量研究证明, 植物为适应不同的土壤磷素环境形成了各自的适应机制和磷效率特性^[2,9]。在植物耐低磷育种实践中, 一般根据磷效率的大小并结合不同磷素环境中的生长表现以筛选耐低磷或高磷效率种质。基于盆栽实验, 本文对马褂木 6 个种源的磷效率特性作了系统研究分析, 初步确定湖南通道为耐低磷或磷高效型优良种源, 该种源不仅适宜于较好的立地条件, 而且在有效磷含量较低的立地上也表现较好; 贵州黎平和湖南邵阳分别为磷素中等敏感型和磷素敏感性优良种源, 可优先在有效磷含量较高的立地上应用, 或配合施用磷肥发挥其生长潜能。

高磷效率基因型是指在磷素营养供应不足时, 能较其它基因型获得更多干物质或经济产量。一般有两种机制: 一是在缺磷土壤上能够活化较多的难溶态磷供根系吸收, 二是体内磷素的代谢效率高,

能以少量磷维持正常生长,可分别用磷素吸收量和磷素利用效率进行量化比较。不同植物应对低磷胁迫的机制不同,或采用一种或多种机制适应低磷胁迫。周志春等^[5]研究发现,低磷胁迫下马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)种源磷效率与磷素利用效率呈显著正相关,而与磷素吸收效率的相关性较小。本文对马褂木种源磷效率的研究却获得了相反的结果,磷素吸收效率而非磷素利用效率是导致种源高磷效率的一个重要原因,这表明高磷效率马褂木种源是通过增加根系对土壤中磷素的吸收来维持其正常生长,这一点与作者对低磷胁迫下马褂木种源根系生长特征的分析相吻合,即高磷效率的马褂木种源(如湖南通道和福建武夷山种源)不仅在高磷水平下根系发达,而且在低磷胁迫条件下也具有较多的须、侧根、较大的根体积和较长的侧根总长。

小麦(*Triticum aestivum* L)、水稻(*Oryza sativa* L)、花生(*Arachis hypogaea* L)、菜豆(*Phaseolus vulgaris* L)等农作物的磷效率育种成就显著,其筛选耐低磷种质和优良品种的方法值得林木遗传育种学家的借鉴。例如为了提高小麦磷效率性状鉴定的准确性,一方面采取多年多次的鉴定,另一方面深入了解小麦的农学性状与磷效率性状的关系^[8]。本文对低磷胁迫下马褂木种源磷效率与苗木生长和根系性状进行相关性分析发现,马褂木种源磷效率与叶

片和根系主要生长参数的相关性显著,高磷效率的种源在低磷条件下须、侧根发达,且叶片宽大,数量多,叶色浓绿,而低磷效率的种源在磷胁迫条件下须、侧根较少,叶片少且窄小,呈较严重的缺磷症状。因此认为,可简单地依据低磷胁迫下马褂木叶片和须、侧根生长情况开展高磷效率种源的初选。

参考文献:

- [1] 李庆远. 中国红壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 145~ 146
- [2] 谢钰容, 周志春. 林木对低磷胁迫的适应性机制和遗传学研究进展 [J]. 林业科学研究, 2002, 14(6): 734~ 740
- [3] 李建民, 王剑, 周志春, 等. 磷素环境与马褂木种源根系生长和干物质积累 [J]. 林业科学, (待发表)
- [4] 曹靖, 张福锁. 低磷条件下不同基因型小麦幼苗对磷的吸收和利用效率及水分的影响 [J]. 植物生态学报, 2004, 24(6): 731~ 735
- [5] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松种源磷效率研究 [J]. 林业科学, 2005, 41(4): 25~ 30
- [6] 李建民. 马褂木地理遗传变异和优良种源选择. 林业科学 [J], 2001, 37(4): 41~ 49
- [7] 李建民, 周志春, 吴开云, 等. RAPD 标记研究马褂木地理种群的遗传分化 [J]. 林业科学, 2002, 38(4): 61~ 66
- [8] 王兰珍, 米国华, 陈范骏, 等. 不同品种冬小麦磷效率性状与农学性状关系的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 14(2): 355~ 360
- [9] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 44~ 50