

## 施用磷肥对马尾松种源生长和木材基本密度的影响

刘青华<sup>1</sup>, 周志春<sup>1</sup>, 张开明<sup>2</sup>, 兰永兆<sup>2</sup>, 吴吉富<sup>2</sup>, 聂国勤<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 福建省武平县林业局, 福建 武平 364300)

**摘要:** 利用设置在福建武平的 12 年生马尾松 *Pinus massoniana* 种源与磷肥互作试验林, 研究磷肥对 5 个优良种源生长、形质和木材基本密度的影响及其间的互作效应。结果表明: 马尾松不同种源对磷肥的反应差异较大, 且因性状而异。福建武平马尾松种源属于生长对磷肥不敏感的耐低磷型优良种源; 广东高州种源的磷肥生长效果好、持续期长, 属磷肥敏感型优良种源; 广东信宜、广西岑溪和江西崇义种源对磷肥的生长反应因性状和林龄而有较大的波动, 12 年生时胸径或树高生长的磷肥效应显著 ( $P < 0.05$ )。相对于生长性状, 马尾松种源树干通直度和木材基本密度受磷肥的影响较小。研究发现: 未施磷肥的低磷条件下, 福建武平种源较其他种源表现出明显的生长优势, 其胸径、树高生长量最大, 江西崇义种源的生长表现相对较差; 当施用磷肥后, 两广种源及江西崇义种源与福建武平种源的生长差异缩小, 广西岑溪和广东高州种源生长量则超过了福建武平种源。木材基本密度和树干通直度在 3 种磷肥处理下的种源间差异较小, 仅在低磷条件下江西崇义种源的木材基本密度显著低于其他 4 个种源 ( $P < 0.05$ )。统计分析还表明, 马尾松树高和木材基本密度存在一定的种源与磷肥互作, 并依据各处理因素的主效应及其间的交互效应, 为纸浆材和锯材选出最佳组合。图 1 表 4 参 21

**关键词:** 林木育种学; 马尾松; 种源; 磷肥; 生长; 木材基本密度; 交互作用

**中图分类号:** S722      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2012)02-0185-07

## Influence of phosphorus on growth and wood basic density of *Pinus massoniana* provenances

LIU Qing-hua<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-chun<sup>1</sup>, ZHANG Kai-ming<sup>2</sup>, LAN Yong-zhao<sup>2</sup>, WU Ji-fu<sup>2</sup>, NIE Guo-qin<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China; 2. Forest Enterprise of Wuping County, Wuping 364300, Fujian, China)

**Abstract:** In order to select optimal combination of provenance and phosphorus level for pulp wood and saw timber, a 12-year-old *Pinus massoniana* (masson pine) trial was used to reveal the main effect and interaction of three phosphorus levels (0, 100 and 400 g·tree<sup>-1</sup>) and five provenances (Wuping of Fujian, Gaozhou of Guangdong, Xinyi of Guangdong, Cenxi of Guangxi, and Chongyi of Jiangxi) on growth, stem-form qualities, and wood basic density (WBD). A randomized complete design with four blocks of twenty-eight trees per plot was used and selected 6 to 8 trees inside every plot. Variance analysis was done using GLM program in SAS software. Results indicated that growth and WBD were not significant difference ( $P > 0.01$ ) for Wuping between three phosphorus levels, suggesting Wuping an excellent provenance with tolerance to low phosphorus. Gaozhou was significant increasing for growth with phosphorus level higher, and had a long duration to phosphorus. In the condition of phosphorus not supplied, Wuping had the significant largest ( $P < 0.05$ ) diameter at breast height (DBH) and height and was superior to the other provenances, whereas Chongyi was the worst, lower 19.8% and 12.7% for DBH and height than Wuping. Provenances from Gaozhou, Xinyi, Cenxi, and

收稿日期: 2011-05-05; 修回日期: 2011-06-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划专题(2006BAD01A1403); 国家自然科学基金资助项目(30872041)

作者简介: 刘青华, 助理研究员, 博士, 从事林木遗传改良研究。E-mail: liuqinghua642@163.com。通信作者: 周志春, 研究员, 博士, 从事用材树种研究。E-mail: zczhou@fy.hz.zj.cn, zczhou-risf@163.com

Chongyi had the best fertilizer efficiency; however, with Wuping differences decreased when phosphorus level were 100 and 400 g·tree<sup>-1</sup>. For WBD Chongyi was considerably lower ( $P<0.05$ ) than the other provenances under 0 g·tree<sup>-1</sup> phosphorus level. The experiment also showed that provenance by phosphorus interaction was significant for height ( $P<0.01$ ) and WBD ( $P<0.05$ ). Based on the main effects and interactions, optimal combinations of Wuping under 0 g·tree<sup>-1</sup> phosphorus level, and Gaozhou under 100 g·tree<sup>-1</sup> phosphorus level were selected for pulpwood and sawtimber, respectively. [Ch, 1 fig. 4 tab. 21 ref.]

**Key words:** forest tree breeding; *Pinus massoniana*; provenance; phosphorus; growth; wood basic density (WBD); interaction

随着短轮伐期工业用材林的规模发展及林木经营者集约理念的出现, 林木施肥已被广泛接受并逐渐成为林木培育的一项重要技术措施, 也是防止地力衰退, 维持长期稳定的地力和养分平衡的有效途径<sup>[1]</sup>。在中国南方, 土壤中的磷多以难溶性闭蓄态形式存在而被固定, 有效磷含量极低<sup>[2]</sup>, 而磷是植物生长发育必需的大量元素之一, 因此, 施磷肥已成为营造人工林的重要内容。已有研究发现, 增施磷肥可大幅提高林木生长量<sup>[3-4]</sup>, 但对于针叶树种的施肥措施已有的报道主要集中在幼林期和中龄期追肥上, 很少涉及造林时施入的基肥对林木的影响以及肥力的持效性, 仅见赵颖等<sup>[5]</sup>研究了磷基肥对马尾松 *Pinus massoniana* 生长的影响。施基肥是丰产栽培的关键技术<sup>[6]</sup>, 因此, 研究磷基肥对林木主要经济性状的影响对林业生产也显得尤为必要。由于大多数林木属于杂合体, 不同基因型对施肥的生长反应差异也较大<sup>[7-10]</sup>。马尾松是中国南方的主要造林树种, 广西岑溪、广东高州、广东信宜、江西崇义和福建武平等是福建地区生长表现较好的优良种源<sup>[11]</sup>。周志春等<sup>[2]</sup>对马尾松幼龄林研究认为, 马尾松种源与磷肥的互作效应虽较小, 但不能忽略它的存在。本研究在已有的有关 2~10 年生马尾松优良种源对磷肥生长反应及肥效持续性的基础上, 利用设置在福建省武平县的广西岑溪、广东高州、广东信宜、江西崇义和福建武平等 5 个马尾松优良种源与 3 种磷肥互作试验林的 12 年生测定材料, 继续研究磷基肥对各优良种源生长、形质和木材基本密度的影响, 以期对种源与磷肥的最佳配置提供科学理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料来源

试验材料取自设置在福建省武平县九进塘林业科技试验示范区的 12 年生马尾松优良种源与磷肥互作试验林。该试验示范区自然状况见参考文献<sup>[5]</sup>, 有广西岑溪(A1), 广东高州(A2), 广东信宜(A3), 江西崇义(A4)和福建武平(A5)等 5 个优良种源参试, 设置不施磷(P<sub>0</sub>), 中磷(P<sub>1</sub>, 100 g·株<sup>-1</sup> 钙镁磷肥)和高磷(P<sub>2</sub>, 400 g·株<sup>-1</sup> 钙镁磷肥)3 种磷肥处理。试验采用完全随机区组设计, 4 次重复, 4 列 7 行 28 株小区, 株行距为 2 m × 2 m, 各重复土壤养分状态见参考文献<sup>[2]</sup>。1997 年 4 月 1 日利用半年生容器苗上山定植, 植苗前在穴底均匀施入磷肥, 所施用磷肥为福建漳平产, 五氧化二磷质量分数为 124.0 g·kg<sup>-1</sup>。栽植时上述 5 个种源容器苗的平均高度分别为 18.37, 18.60, 18.60, 15.50 和 16.40 cm。造林后连续 3 a 劈草, 1 次·a<sup>-1</sup>, 但从造林到本次调查期间内未再施肥。

### 1.2 试验林调查和材性测定

2008 年 12 月在每重复的试验小区(4 列 7 行 28 株)内选择中间 6~8 株样木, 以避免小区边缘效应对试验结果的影响。每木测量其树高、胸径和树干通直度等指标。树干通直度按通直、较通直、一般、弯曲、严重弯曲分级, 分别记分为 5, 4, 3, 2 和 1, 分数越高越通直。同时在调查植株胸高处上坡方位用 6 mm 直径的生长锥钻取一髓心至树皮的完整无疵木芯, 并用最大含水量法<sup>[12]</sup>测定其木材基本密度。

### 1.3 数据分析

单株材积( $V$ )按公式  $V=0.000\ 062\ 341\ 803 \times D_{1.3}^{1.856\ 149\ 7} \times H^{0.956\ 849\ 2}$  估算<sup>[11]</sup>。其中,  $D_{1.3}$  为胸径,  $H$  为树高。以小区单株测定值为单元, 采用 SAS/STAT 软件中的 GLM 程序进行性状方差分析, 以检验种源、磷肥量、种源×磷肥量互作等对生长、形质和木材基本密度的影响。方差分析时树干通直度经  $\sqrt{x}$  数据转换。

## 2 结果与分析

### 2.1 马尾松种源生长、形质和木材基本密度对磷肥的遗传反应

表 1 结果表明：12 年生时，马尾松不同优良种源生长对磷基肥的遗传反应式样不同。对于胸径生长，广东高州和信宜种源仍对磷基肥较为敏感，皆表现为随磷基肥施入量的增加，胸径生长明显加快。而广西岑溪、江西崇义和福建武平种源胸径生长对磷基肥的敏感性则较小，其在 3 种磷基肥处理下胸径生长量差异不显著，属于耐磷性种源，适合在缺磷地区经营。对于树高生长，除江西崇义和福建武平种源在 3 种磷基肥下差异不显著外，广西岑溪、广东高州和信宜种源对磷肥反应较敏感，表现在较高或中等磷肥处理下具有较大的树高生长，如广西岑溪和广东信宜种源在中磷立地下，12 年生时平均树高分别为 11.55 和 11.30 m，分别是缺磷处理下树高生长量的 1.11 倍和 1.10 倍；广东高州种源在高磷处理下树高生长量最大，比缺磷处理下高 10.77%。

马尾松种源树干通直度受磷基肥的影响较小，仅见福建武平种源在缺磷处理下干形要明显好于中、高磷处理下的干形，平均的得分值为 4.2 分。其他 4 个优良种源在 3 种磷基肥处理下树干通直度差异皆不明显。造林时磷基肥的施入量对广东高州、广东信宜和福建武平种源的木材基本密度影响也较小，但对广西岑溪和江西崇义种源有明显的影响，江西崇义种源在中、高磷处理下木材明显要比缺磷时的木材致密，与之相反，广西岑溪种源在缺磷处理下木材基本密度为  $0.4088 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，比中磷处理下的木材基本密度显著提高了 4.47% ( $P < 0.05$ )，但广西岑溪种源在高磷处理下木材基本密度与缺磷、中磷处理下的木材基本密度差异不明显，未达到 5% 显著概率水平。

表 1 马尾松种源生长、干形和木材基本密度在不同磷肥施用量下的比较

Table 1 Comparison on growth, stem-form and wood basic density of *Pinus massoniana* provenances between three phosphorus application levels

种源	施肥量/(g·株 <sup>-1</sup> )	胸径 / cm	树高/ m	树干通直度	木材基本密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
广西岑溪	0	11.20 ± 2.07 a	10.33 ± 0.93 b	3.9 ± 0.6 a	0.408 8 ± 0.024 6 a
	100	11.93 ± 2.54 a	11.55 ± 1.18 a	4.0 ± 0.6 a	0.391 3 ± 0.033 0 b
	400	11.68 ± 2.17 a	11.09 ± 1.35 a	3.8 ± 0.7 a	0.402 6 ± 0.024 8 ab
广东高州	0	11.09 ± 2.08 b	10.12 ± 1.20 b	3.8 ± 0.6 a	0.399 7 ± 0.041 5 a
	100	12.75 ± 2.81 a	10.42 ± 0.93 b	3.8 ± 0.6 a	0.405 0 ± 0.038 2 a
	400	13.21 ± 2.25 a	11.21 ± 1.18 a	3.9 ± 0.6 a	0.396 4 ± 0.033 0 a
广东信宜	0	10.71 ± 2.76 b	10.25 ± 1.49 b	3.8 ± 0.5 a	0.404 5 ± 0.033 5 a
	100	11.23 ± 2.07 ab	11.30 ± 1.01 a	4.0 ± 0.7 a	0.400 4 ± 0.038 5 a
	400	12.47 ± 2.40 a	10.72 ± 1.12 ab	3.9 ± 0.6 a	0.398 5 ± 0.025 9 a
江西崇义	0	9.68 ± 2.27 a	9.55 ± 1.17 a	3.9 ± 0.7 a	0.369 6 ± 0.027 8 b
	100	10.57 ± 2.55 a	9.48 ± 1.08 a	4.0 ± 0.6 a	0.401 9 ± 0.030 8 a
	400	10.55 ± 2.46 a	9.96 ± 0.92 a	3.8 ± 0.7 a	0.394 4 ± 0.042 8 a
福建武平	0	12.07 ± 3.07 a	10.94 ± 1.60 a	4.2 ± 0.6 a	0.398 2 ± 0.039 9 a
	100	11.67 ± 2.60 a	10.95 ± 0.96 a	3.7 ± 0.6 b	0.405 3 ± 0.031 8 a
	400	11.41 ± 2.75 a	10.70 ± 1.13 a	3.8 ± 0.5 b	0.396 6 ± 0.023 6 a

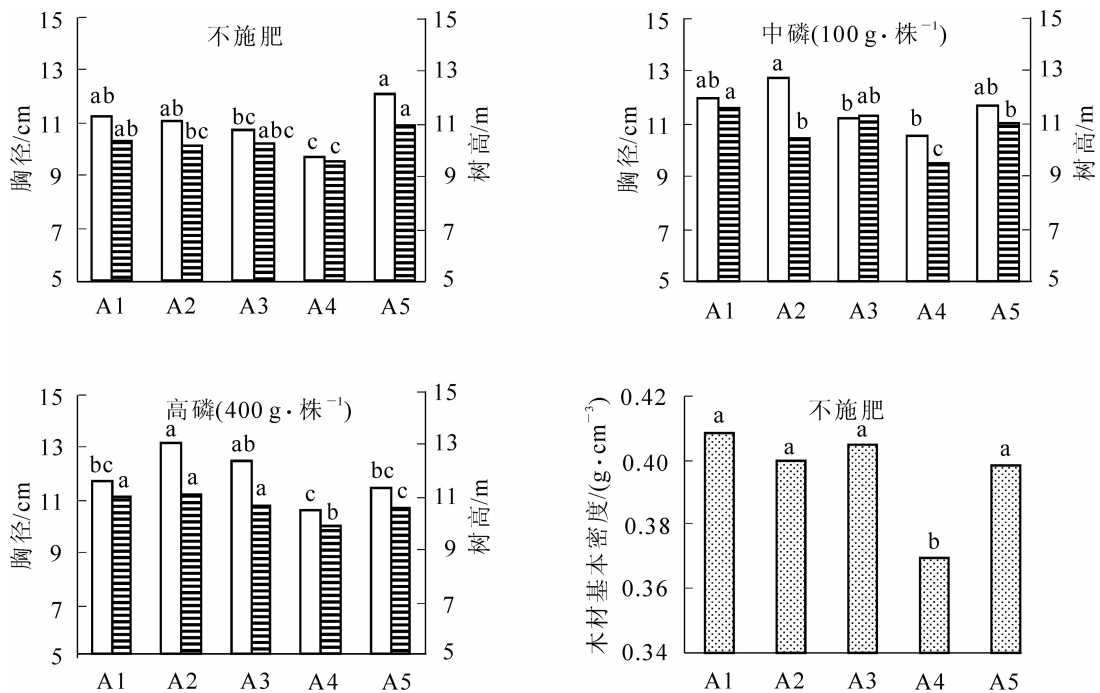
说明：表格内为平均值±标准误；不同小写字母代表在 5% 显著性水平时 5 个种源间的多重比较。

### 2.2 不同磷肥处理下马尾松生长、形质和材性的种源差异

马尾松种源效应因性状而异，且与磷肥投入量有一定关系。参试的 5 个种源皆为速生高产种源，在 3 种磷肥处理下，12 年生时的胸径和树高种源差异皆达到 5% 显著水平(图 1)。对于胸径生长，在缺磷处理下，福建武平种源生长最好，广西岑溪和广东高州种源次之，江西崇义种源最差；随着磷肥投入量的

增加,两广种源胸径生长逐渐超过福建种源,尤其是广东高州种源,在中、高磷处理下胸径生长量分别为12.75和13.21 cm,显著( $P<0.05$ )高于其他4个种源。对于树高生长,在缺磷处理下,仍为福建种源生长最好;但在中磷处理下,广西岑溪种源树高生长明显超过福建武平种源,广东信宜、广东高州种源树高生长与福建武平种源差异也缩小到小于5%显著性概率水平;在高磷处理下两广种源和福建武平种源高生长差异不显著,但皆明显比江西崇义种源高。

相对于生长性状,树干通直度的种源差异较小。在3种磷肥处理下,参试的5个种源间差异皆未达到显著概率水平。不同磷肥处理下,木材基本密度在种源间的差异也因磷肥投入量而异,仅在缺磷处理下种源间木材基本密度差异达到了极显著水平( $P<0.05$ )(图1)。两广种源和福建武平种源木材基本密度皆在 $0.390\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以上,显著高于江西崇义种源,其木材基本密度仅为 $0.369\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;而在中、高磷处理下,种源间木材基本密度差异不明显。



A1. 广西岑溪, A2. 广东高州, A3. 广东信宜, A4. 江西崇义, A5. 福建武平。  
不同小写字母为在5%显著性水平时, 5个种源间的多重比较。

图1 不同磷肥处理下5个马尾松优良种源的生长和木材基本密度

Figure 1 Comparison on growth and wood basic density between five *Pinus massoniana* provenances under different phosphorus application levels

### 2.3 马尾松生长、形质和木材基本密度的种源和施磷肥量交互作用

基因型与磷肥互作的研究是实施林木良种和施用磷肥优化配置的重要理论基础。两因素方差分析表明(表2), 12年生时马尾松胸径、树干通直度的种源 $\times$ 磷肥互作效应不显著, 意味着磷肥施用与否及多少不会影响参试种源这3个性状的相对表现。但马尾松树高和木材基本密度却受显著的种源 $\times$ 磷肥交互作用影响, 说明只有实现优良种源与磷肥的优化配置才能实现马尾松人工林的速生丰产。

### 2.4 种源和磷肥施入量的合理配置

纸浆材要求单位时间干物质(单株材积与木材基本密度的乘积)收获量最大。本研究以干物质产量(单株材积与木材基本密度的乘积)为评价指标, 按降序列出5个种源和磷肥的组合(表3), 由表3可见, 福建武平种源不论是否施磷基肥, 干物质量皆高于其它种源在3种磷肥处理下获得的干物质量, 结合生产成本, 认为若以纸浆材为培育目标, 选用当地种源(福建武平种源)在不施磷肥的情况下即可取得最佳效果。若以锯材为培育目标, 要求径生长量大、木材密度高、干形好。由于树干通直度种源、施肥量的主效应和互作效应皆不显著, 故不考虑干形, 仅以胸径、木材基本密度都不低于平均值作为约束条件, 共选出5个锯材优良组合(表4)。

表 2 马尾松种源和磷肥及其交互作用对各性状影响的双因素方差分析

Table 2 Analysis of variance describing the main and interactive effect of provenance and phosphorus on traits of *Pinus massoniana*

变异来源	自由度	胸径	树高	树干通直度	木材基本密度
区组	3	26.56**	4.76**	0.95	0.013 09**
种源	4	41.95**	19.39**	0.07	0.001 84
磷肥	2	24.09*	9.39**	0.22	0.000 77
区组×种源	12	9.88*	1.67	0.50	0.000 82
区组×磷肥	6	3.40	2.71*	0.26	0.001 66
种源×磷肥	8	9.09	3.78**	0.44	0.002 15*
区组×种源×磷肥	24	11.47**	2.47**	0.36	0.001 99**
机误	289	5.35	1.20	0.36	0.000 91

说明：数字右上角 \* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ )，\*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.05$ )。

表 3 纸浆材优良组合

Table 3 Superior combination for pulp wood

种源	磷肥量/g	干物质质量/kg
福建武平	0	15.433
福建武平	400	12.888
福建武平	100	12.818
广东信宜	400	12.247
广东信宜	0	12.188

表 4 锯材优良组合

Table 4 Superior combination for saw timber

种源	磷肥量/g	胸径/cm	木材基本密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
广东高州	100	12.75	0.405 0
广东信宜	400	12.47	0.398 5
福建武平	0	12.07	0.398 2
广西岑溪	400	11.68	0.402 6
福建武平	100	11.67	0.405 3

### 3 结论与讨论

良种和适宜的施肥是实现人工林速生丰产优质的两大技术措施。马尾松对磷肥的反应因种源和性状而异。本研究利用 12 年生材料发现，福建武平种源属于生长对磷肥不敏感的种源，其胸径、树高在 3 种磷肥处理下差异不显著，与苗期、幼龄期的生长表现一致<sup>[5]</sup>。广东信宜种源在造林 12 a 时，胸径、树高皆显现出肥效差异，高磷处理下的生长明显好于缺磷处理下的生长，相异于广东信宜种源在苗期和幼龄期生长对磷肥反应不敏感的结论，也相异于周志春等<sup>[13]</sup>基于马尾松种源苗期及幼林施磷肥试验初步发现：福建武平和广东信宜种源的磷效率较高，在低磷胁迫下具有较大的磷素吸收和利用效率，即能依靠自身潜力，获得生长所需的有效磷。究其原因，可能是因为广东信宜种源的磷效率略低于福建武平种源<sup>[13]</sup>，缺磷状态下，在造林早期根系获得的磷素能完全满足林木生长需要，但生长到一定程度时根系获得的磷素就不能完全满足林木生长需要，施入的磷肥处理就显示出生长优势。对于广西岑溪和江西崇义种源肥效分别体现在树高和胸径生长上，而广东高州属于胸径和树高生长对磷肥较敏感的种源，该研究结果符合这 3 个种源在造林早期生长对肥效的动态变化趋势<sup>[5]</sup>，表明这 3 个种源具有明显的肥效，且肥效持续时间长，初期肥效优势能连续保持，因此在造林时适当施入磷肥作基肥，有明显的增产效果。

施肥对木材密度的影响也是营林工作者关心的主要问题。因为木材密度不仅与锯材的力学强度有关，而且还决定单位体积的干物质产量，影响纸浆和纸张的性能<sup>[1,14]</sup>。但目前关于施肥对木材密度影响的结论还不完全一致。Choong 等<sup>[15]</sup>提出针叶树种造林后 1~4 a 施肥，对木材密度没有显著影响。Nicholls 和 Nelson 等<sup>[16,17]</sup>研究认为施用磷肥可使辐射松 *Pinus radiata* 木材密度降低 3%~20%。年轮密度会随降低的趋势在施肥后 2~5 a 后才会消失<sup>[14,18-19]</sup>。徐有明等<sup>[20]</sup>对湿地松 *Pinus elliotii* 幼龄林的研究发现单施磷肥或氮、磷、钾配比施肥都能够明显提高湿地松的木材基本密度。本研究结果表明，5 个马尾松参试种源木材基本密度对磷肥的反应式样也不同，广西岑溪种源在施用磷肥后木材基本密度略有下降，因此，对于广西岑溪种源在施用磷肥以求促进生长的同时要权衡由此带来的对木材密度的负面影响；江西崇义

种源则在施用磷肥后随着生长的加快,木材基本密度也明显升高;广东信宜、广东高州和福建武平种源木材基本密度则较少受施肥量影响。除生长和木材基本密度外,干形对施肥的反应也被日渐关注。本研究得出马尾松种源树干通直度基本上对磷肥不敏感,这可能与树干通直度主要受遗传控制有关<sup>[21]</sup>,施肥等育林措施对干形的影响较小。

种源与磷肥对马尾松树高生长存在显著的交互作用,即磷肥施用与否及多少会影响参试种源树高生长的相对表现,因此,施肥措施不能仅依据单个处理因素的分析结果进行简单的组合。本研究依据纸浆材和锯材不同培育目标,选出最佳施肥方案。对于纸浆材,本研究认为闽西马尾松这一中心产区的最佳种源为福建武平种源,因为其为当地种源,不仅适应性上优于其他种源,而且在不施磷肥的情况下干物质量高于其他种源施肥或不施肥情况下所获得的干物质量。由于本研究结果仅为中龄林的研究结果,因此,拟对该林分继续追踪调查,掌握福建武平种源是否在达到轮伐期时仍能保持这种优势,为在缺磷且施肥困难的地区大力推广武平种源或为其它种源配置最佳的施肥措施提供科学的理论依据。

#### 参考文献:

- [1] ZOBEL B J, van BUIJTENEN J P. *Wood Variation: Its Causes and Control* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 218 - 230.
- [2] 周志春, 吴吉富, 兰永兆, 等. 马尾松优良种源树高生长对不同磷投入水平的反应[J]. 林业科学研究, 2000, **13** (6): 667 - 672.  
ZHOU Zhichun, WU Jifu, LAN Yongzhao, et al. Height growth response of superior provenance of masson pine to different phosphorus supply [J]. *For Res*, 2000, **13** (6): 667 - 672.
- [3] 湛红辉, 温恒辉. 马尾松人工幼林施肥肥效与增益持续性研究[J]. 林业科学研究, 2000, **13** (6): 652 - 658.  
CHEN Honghui, WEN Henhui. Fertilizing effectiveness and gain sustainability of *Pinus massoniana* young plantation [J]. *For Res*, 2000, **13** (6): 652 - 658.
- [4] 卢立华, 蔡道雄, 何日明, 等. 马尾松幼林施肥效应综合分析[J]. 林业科学, 2004, **40** (4): 99 - 105.  
LU Lihua, CAI Daoxiong, HE Riming, et al. Synthetic analysis on the fertilization effects for young *Pinus massoniana* plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40** (4): 99 - 105.
- [5] 赵颖, 周志春, 吴吉富, 等. 马尾松优良种源对磷肥的生长反应和肥效持续性[J]. 林业科学, 2007, **43** (10): 64 - 70.  
ZHAO Ying, ZHOU Zhichun, WU Jifu, et al. Growth response of superior provenance of masson pine to phosphorus supply and persistence of phosphorus effect [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (10): 64 - 70.
- [6] 赖士祥. 巨尾桉施基肥造林优化选择的研究[J]. 林业勘察设计, 1998 (1): 50 - 53.  
LAI Shixiang. Study on optimal selection of basal manure for *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* [J]. *For Prospect Design*, 1998 (1): 50 - 53.
- [7] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究[J]. 生态学报, 1999, **5** (3): 417 - 421.  
WANG Qingren, LI Jiyun, LI Zhensheng. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **5** (3): 417 - 421.
- [8] 李天芳, 姜静, 王雷, 等. 配方施肥对白桦不同家系苗期生长的影响[J]. 林业科学, 2009, **45** (2): 60 - 64.  
LI Tianfang, JIANG Jing, WANG Lei, et al. Effects of prescription fertilization on the seedling growth of different families of *Betula platyphylla* [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (2): 60 - 64.
- [9] JONSSON A, ERICSSON T, ERIKSSON G, et al. Interfamily variation in nitrogen productivity of *Pinus sylvestris* seedlings [J]. *Scandinavian J For Res*, 1997, **12** (1): 1 - 10.
- [10] McKEAND S E, GRISSOM J E, RUBILAR R, et al. Responsiveness of diverse families of loblolly pine to fertilization: eight-year results from SETRES-2[C]// MCKINLEY C R. *27th Southern Forest Tree Improvement Conference*. Stillwater: Oklahoma State Univ, 2003: 30 - 33.
- [11] 周志春, 傅玉狮, 吴天林. 马尾松生长和材性的地理遗传变异及最优种源区的划定[J]. 林业科学研究, 1993, **6** (5): 556 - 564.  
ZHOU Zhichun, FU Yushi, WU Tianlin. Geographic variation in growth and wood properties and determination of the optimum provenance region for paper-pulp wood of masson pine [J]. *For Res*, 1993, **6** (5): 556 - 564.

- [12] SMITH D M. *Maximum Moisture Content Method for Determining Specific Gravity of Small Wood Samples* [R]. Amazon: US For Service, Forest Products Laboratory, 1954.
- [13] 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.  
ZHOU Zhichun, XIE Yurong, JIN Guoqing, *et al.* Study on phosphorus efficiency of different provenances of *Pinus massoniana* [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41** (4): 25 – 30.
- [14] MORLING T. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilization and thinning of scots pine [J]. *Ann For Sci*, 2002, **59** (1): 29 – 40.
- [15] CHOONG E T, BOX B H, FOGG J P. Wood properties of young loblolly pine in response to cultural management [J]. *Louisiana State Univ Fore Notes*, 1970, **88**: 1 – 3.
- [16] NICHOLLS J W P. The effect of environmental factors on wood characteristics ( II ) the effect of thinning and fertilizer treatment on the wood of *Pinus pinaster* [J]. *Silv Genet*, 1971, **20** (3): 53 – 100.
- [17] NELSON P F, HALL M J, HANSEN M W, *et al.* The effect of silvicultural practices on kraft pulping properties of radiate pine [J]. *Appita*, 1980, **33** (5): 368 – 378.
- [18] MALLONEE E H. *Effect of Thinning and Seasonal Time of Nitrogen Fertilization on the Growth of Pole Sized Loblolly Pine* [D]. Raleigh N C: North Carolina State University. Department of Forestry, 1975.
- [19] NYAKUENGAMA J G, DOWNES G M, NG J. Growth and wood density responses to later-age fertilizer application in *Pinus radiata* [J]. *IWA J*, 2002, **23** (4): 431 – 448.
- [20] 徐有明, 林汉, 李贻铨, 等. 施肥对湿地松幼林生长和木材物理力学性质的影响[J]. 林业科学, 2002, **38** (4): 125 – 133.  
XU Youming, LIN Han, LI Yiquan, *et al.* Effects of fertilization on growth increments and wood physical-mechanical properties of young slash pine [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38** (4): 125 – 133.
- [21] 刘青华, 金国庆, 张蕊, 等. 24 年生马尾松生长、形质和木材基本密度种源变异与种源区划[J]. 林业科学, 2009, **45** (10): 55 – 61.  
LIU Qinghua, JIN Guoqing, ZHANG Rui, *et al.* Provenance variation for growth, stem-form and wood density and provenance division of masson pine at 24 years old [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (10): 55 – 61.