

文章编号: 100F 1498(2004) 01 0026 10

施 P 肥和外生菌根菌接种对蓝桉林 产量和养分积累的影响*

徐大平¹, Bernie Dell², 弓明钦¹, Nick Malajczuk², 王志和³

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520;

2. School of Biological Sciences and Biotechnology, Murdoch University, Perth, W. A. 6150, Australia;

3. 云南省楚雄州林业科学研究所, 云南 楚雄 678000)

摘要: 主要研究施 P 肥和接种外生菌根菌对蓝桉生长、生物量和养分积累的影响。在云南楚雄的试验表明: 接种外生菌根菌只能在幼林期促进树木生长, 3 a 后这种促进作用不显著。施 P 肥能在幼林期促进蓝桉树高和胸径的生长, 但 4.5 a 后这种促进作用也变得不显著。由于施 P 肥提高了蓝桉的保存率, 所以也显著地提高了蓝桉林的生物量。低 P 处理时, 树木保存率低, 较大的生长空间促进了树木的后期生长, 可能会导致施 P 肥对后期单株蓝桉树高和胸径生长作用不显著。施 P 肥还增加了树木 N、P 和 K 的养分积累量, 提高了上述养分的利用效率。施 P 肥同时还明显增加了林下植被和林下凋落物 P 的积累量, 但不能明显增加 N 和 K 的养分积累量。树木叶片和土壤分析结果进一步说明施 P 肥对蓝桉幼林作用明显。试验表现出接种外生菌根菌只能在低 P 情况下促进树木生长, 不能在高 P 情况下促进树木生长的基本趋势。

关键词: 蓝桉; P 肥; 外生菌根菌; 生物量; 养分积累

中图分类号: S792.39 文献标识码: A

桉树(*Eucalyptus* spp.) 是 20 世纪全球发展最快的工业用材林树种之一, 也是我国近年来发展最快、经营水平最高的工业用材林树种。随着桉树人工林经营水平的提高, 桉树施肥已成为桉树人工林经营管理的重要环节。特别是在我国的华南地区, 没有合理的施肥, 就不可能有高产的桉树人工林。我国目前已有 150 多万 hm^2 桉树人工林^[1], 主要树种为尾叶桉(*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake)、巨桉(*E. grandis* W. Hill ex Maiden)、细叶桉(*E. tereticornis* Smith.)、赤桉(*E. camaldulensis* Dehnh.)、蓝桉(*E. globules* Labill.) 以及它们之间的杂交种。有关尾叶桉和巨尾桉的施肥研究较多, 但多为 N、P、K 三元素之间的正交组合设计, 并且这些试验只是观测树木的高和径生长。这种试验设计很容易找出影响桉树生长的主要元素, 并大概找到一个适宜施肥配方供生产上初步应用, 但很难搞清在其它元素供给不是生长限制因子的前提下, 某一元素对产量的影响以及施肥对桉树人工林养分循环利用、养分经营管理和长期土壤肥力的作用, 无法给桉树人工林养分诊断和发现高产施肥配方提供理论依据。Dias 等^[2] 报道了巴西桉树人工林 P 肥梯度试验对产量和养分积累量的影响。徐大平等^[3,4] 报道了巨尾桉 P 肥梯度试

收稿日期: 2003 06 09

基金项目: 澳大利亚国际农业研究中心资助的项目(ACIAR9224); 国家自然科学基金重点项目(39630240)的部分内容

作者简介: 徐大平(1964—), 男, 安徽无为, 研究员, 博士生导师。

* 参加项目研究的还有陈羽、康文玲、王风珍等, 在此一并致谢!

验对产量、林分养分积累量和养分利用效率的影响,再次证实 P 是我国桉树产量的主要限制因子, P 肥梯度试验能得到比 N、P、K 正交试验更准确的养分诊断信息和长期养分管理数据。

蓝桉主要种植在我国的云南,主要土壤类型与广东、广西和海南的土壤类型有较大的差别。蓝桉已有的施肥研究很少,何蓉等^[5]报道了 N、P、K 三元素之间的正交组合设计对幼林生长的影响,因此,有必要进一步利用 P 肥梯度试验证实 P 对蓝桉人工林产量的影响,施肥对林分养分积累和养分利用效率的影响,进一步为蓝桉人工林养分管理提供基础数据。根据以上情况,作者在云南楚雄布置了该试验;同时考虑结合外生菌根菌接种,摸清能否通过外生菌根菌接种解决 P 缺乏的问题。

1 材料与方 法

1.1 试验地位置和土壤

试验地位于云南省楚雄市西面 35 km 处(101°25.66' E, 25°13.10' N),海拔 2 200 m,坡向东北,坡度为 10~15°。该地气候为典型的亚热带气候,年降水量为 995 mm,85% 集中在 5—10 月的雨季,旱季的月雨量小于 50 mm。年均气温为 12.4 °C。最热月为 7 月,月均气温为 21.9 °C;最冷月为 1 月,月均气温为 -1.7 °C。土壤为沉积岩上发育的红壤,具体土壤特性见表 1。

原生植被为次生灌木林,主要为云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)和一些栎类(*Quercus* spp.)的灌木。种植 3 个月前进行清杂,然后按 3 m 的行距进行带状整地,带宽 1 m。在带上按 1.5 m 的株距打穴,穴的规格为 0.5 m×0.5 m×0.4 m。

1.2 苗木培育

在楚雄林科所苗圃育苗。蓝桉的种子在消毒的沙里进行发芽,10 d 后移入育苗盘中。每个育苗盘有 64 个格,每格装大约 150 g 的育苗基质(沙:泥炭土:蛭石=1:1:1)。苗木在移植时进行了外生菌根菌接种,接种剂为液体孢子粉,接种方法见文献[6],具体接种菌种菌株见表 2。苗木每周施液体肥 1 次。接种前用显微镜检查苗木根系,接种苗木 100% 见到菌根,对照没有菌根。

1.3 试验设计和维持

试验采用裂区设计,主处理为 6 个 P 施肥水平,副处理为 4 个菌种处理(3 个菌株接种处理和 1 个对照)。试验有 4 个重复,每个副处理小区有 8 株(2 m×4 m)树木,每个主处理小区有 32 株树木。P 主处理之间有 2 行隔离行,菌种副处理之间有 1 行隔离行。隔离行的树采用标准施肥,每株施 130 g 复合肥(10% N, 5% P, 10% K)作基肥。6 个施 P 肥水平分别为:0、4、13、40、120、360 kg·hm⁻²(后文分别简称为 P₀, P₄, P₁₃, P₄₀, P₁₂₀ 和 P₃₆₀)。按以上数量计算出每个

表 1 土壤剖面的化学性质

土壤性质	土层		
	A(0~18 cm)	AB(19~40 cm)	B(41~100 cm)
pH _(KCl) 值	4.8	4.2	4.0
有机 C/(g·kg ⁻¹)	8.66	3.43	1.49
全 N/(g·kg ⁻¹)	0.85	0.51	0.36
全 P/(g·kg ⁻¹)	0.26	0.24	0.20
有效(Bray-1)P/(mg·kg ⁻¹)	8.75	1.11	0.89
全 K/(g·kg ⁻¹)	8.21	9.39	11.54
交换性 K/(cmol·kg ⁻¹)	144.71	62.85	48.44
交换性 Ca/(cmol·kg ⁻¹)	22.60	21.56	19.16
交换性 Mg/(cmol·kg ⁻¹)	3.68	4.39	6.01
>0.05 mm 沙粒含量/%	43.13	31.95	34.41
0.05~0.002 mm 粉沙粒含量/%	30.47	28.81	28.17
<0.002 mm 粘粒含量/%	26.40	39.24	37.42

表 2 苗木接种所用菌种

处理	菌株号	菌种	采集地
CM ₀		(CK)	
CM ₁	MURU LH041	<i>Sclerotium cepa</i> Person	Bridgetown, WA ^①
CM ₂	MURU LH036	<i>Pisolithus albus</i> Priest	Manjinup, WA
CM ₃	MURU LE055	<i>Laccaria latritia</i> Malencon	Bridgetown, WA

注:①澳大利亚西澳洲。

小区过磷酸钙的用量,然后均匀地撒在0.8 m宽的种植带上。根据以前的施肥试验结果^[7-9],选择其它肥料的适宜用量进行平衡施肥,尽量减小其它元素对生长的限制作用。该试验中,施了 $55.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的微量元素混合肥(9.2% Cu, 10.0% Zn, 8.5% Fe, 5.0% B和0.19% Mo)、 $111 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 CaSO_4 (50 g·株⁻¹)。尿素施了3次,分别为种植时、种植1 a和2 a后,总的N施用量为 $444 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 K_2SO_4 施了2次,分别为种植后1 a和2 a后,总的K施用量为 $222 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。当树木为2年生时,追施硼砂 $11.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (11.3% B)。

1.4 试验调查

在试验的前2 a,每半年对试验区的所有树进行每木检尺,以后每年观测一次。在6个月时测量离地10 cm的地径,以后都是测量胸径。树木单株材积公式^[10]: $V=0.4 h \cdot g$,h:树高,g:胸高断面积。

当树为4.5年生时,每个小区选择样木1株进行生物量调查。在选择样木时尽量选择试验地树木分布的不同径阶,同时分别增加选择1株最大和最小径阶树木。利用这26株树的生物量数据,建立利用胸径推算树木各组分

生物量估算模型,进一步计算试验地内每株树木的树木各组分生物量,具体模型参数见表3。

在生物量调查时,测量伐倒样木的树高和胸径。然后分成枝叶和干2部分,测量其鲜质量。在树干上每隔3 m取一个圆盘,称质量后分成干材和树皮,并称出各自的质量,然后带回实验室在85℃的条件下烘干至衡质量。对烘干的圆盘按 $1/8 \sim 1/24$ (主要根据圆盘的大小)取样进行粉碎制样,充分混合后每株树分别取一个干材样和一个树皮样进行养分分析。枝叶按不同分布层次,抽取 $1/5 \sim 1/10$ (主要根据树木的大小)作为取样样本,同时摘除全部树叶,计算枝、叶的质量比例。再分别抽取500~1000 g的新鲜枝样和叶样,将枝和叶样带回实验室在85℃的条件下烘干,然后粉碎取样进行化学分析。

树木生物量主要采用挖掘法,挖出全部大于5 cm的根系。然后再以树木位置为边界,向一边挖掘 $3 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ (树木空间的一半)范围内所有树木的根系,挖到80 cm深。然后将根系按1~5 cm和0.1~1 cm进行收集。对3个组分的根系进行取样(500~1000 g),冲洗干净,然后带回实验室烘干,取样 $1/4$ 进行粉碎,进行养分元素含量分析。

每个主处理小区设置3个 1 m^2 的小样方,收集林下植被、凋落枝和凋落叶。取样带回实验室烘干,取样进行化学分析。

每株树木的养分积累量为各组分的生物量乘以该小区样木的养分含量,累计就是小区的养分积累量。P的吸收率为施肥处理与对照生物量中P积累量的差值除以施肥量。养分利用效率为单位质量养分元素所能产生的生物量^[11]。

植物样品中N、P、K含量分析方法如下:N采用 H_2SO_4 (ZnSO_4 , FeSO_4)消化和Kjeldahl定N;P采用 $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ 消化然后用钼蓝比色法测 $\text{P}^{[12]}$;K采用 $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ 消化然后用火焰光度计测K,土壤有效P分析见参考文献[13,14]。

表3 蓝桉生物量估算模型

树木组分	a	b	相关指数 r^2
干材	-2.3004	2.2477	0.93
树皮	-3.0363	1.8114	0.92
树枝	-5.3588	2.4127	0.73
叶	-4.5900	2.3256	0.79
大根和根头(>5 cm)	-3.9528	2.2382	0.83
主根(1~5 cm)	-4.2259	1.6895	0.66
小根(<1 cm)	-3.1072	0.8283	0.68
树高	1.0422	0.6224	0.81

注: $\ln Y$ (干重或树高) = $a + b \ln X$ (胸径)

1.5 数据分析

统计时利用“Statistica”软件进行运算, 分别在主处理、副处理和不同观测时间 3 个因子间计算显著水平及其交互作用, 如果 ANOVA 显示处理间作用显著, 将进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 接种菌根菌对蓝桉生长的影响

菌根菌接种在前 2 a 能增加($p = 0.012$) 树木高生长, 但 3 a 后这种作用就不明显(表 4)。菌根菌接种在前 3 a 能增加胸径的生长量, 但在 4.5 年生时这种作用也不明显(表 4)。最好的处理为 CM₁, 接种采于西澳大利亚 Bridgetown 的 *Scleroderma* 菌株。

表 4 菌根菌接种对蓝桉生长的影响

处理	树高/m				胸径/cm			
	1 a	2 a	3 a	4.5 a	1 a	2 a	3 a	4.5 a
CM ₀ (对照)	2.77 a	6.41 a	10.68 a	11.4 a	2.1 a	6.5 a	9.5 a	12.8 a
CM ₁ (<i>Scl.</i>)	3.02 b	6.68 b	10.78 a	12.0 a	2.4 b	6.9 b	10.1 b	13.2 a
CM ₂ (<i>Pis.</i>)	2.92 b	6.34 a	10.63 a	12.0 a	2.3 b	6.6 ab	9.8 ab	13.2 a
CM ₃ (<i>Lac.</i>)	2.96 b	6.52 ab	10.85 a	12.0 a	2.3 b	6.7 ab	9.8 ab	13.2 a

注: 同一列中字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著。

在 4.5 年生时, 各个菌种处理之间在林分蓄积量和林木生物量(图 1)上没有显著的差异。各个接种处理蓄积量和生物量比对照高 4% ~ 12%, 明显小于各个处理的标准差。后文中集中讨论施 P 对蓝桉的影响, 不再涉及菌根菌接种。

菌种和 P 处理之间没有明显的($p = 0.114$)交互作用, 但总的趋势是菌根菌接种在低 P 的情况下能促进树木的生长, 在高 P 的情况下则不能促进树木的生长(图 2)。

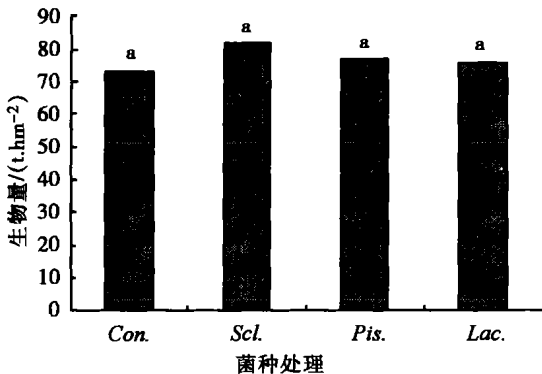


图 1 菌根菌接种对 4.5 年生蓝桉林分生物量的影响

(处理的平均信字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著。)

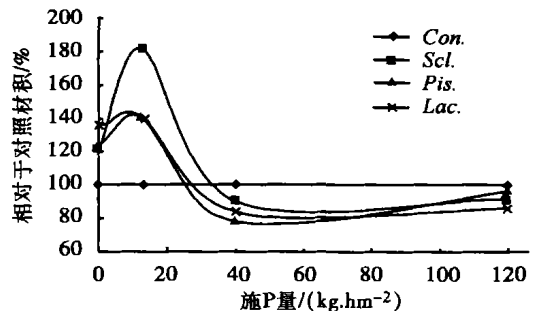


图 2 菌根菌处理和 P 肥处理之间对蓝桉生长的相互作用

2.2 施 P 肥对蓝桉生长、生物量和养分积累的影响

施 P 肥在第 1 年对蓝桉的存活率没有显著的影响, 第 2 年以后有显著的影响。随着施 P 量的增加, 树木死亡率降低(表 5)。一方面, 早期的快速生长增加了树木同其它杂灌的竞争能力而提高保存率; 另一方面, 早期的快速生长会减少周边群众人为活动造成小树死亡的可能性。

施 P 肥能显著增加 2.5 年生蓝桉初展叶 P 的含量(图 3), 随着施肥量的增加, 初展叶 P 的

含量也在增加,说明施P肥能增加早期树木对P的吸收。

表5 种植后不同施P水平对蓝桉死亡率的影响

处理	林龄/a				
	0.5 a	1 a	2 a	3 a	4.5 a
P ₀	6.3	12.5	32.8 b	35.9 b	36.2 b
P ₄	2.3	11.7	24.2 ab	27.3 b	27.6 ab
P ₁₃	3.9	8.6	19.5 a	19.5 ab	23.4 ab
P ₄₀	4.7	10.9	14.8 a	14.8 a	17.2 a
P ₁₂₀	2.3	12.5	18 a	18 ab	18.0 a
P ₃₆₀	3.8	10.1	14.8 a	15.6 ab	15.8 a

注:同一列中处理的平均值字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较(LSD)差异不显著。

施P肥能显著增加2.5年生蓝桉施肥带上0~20cm表层土壤有效P含量(图4),表层土壤有效P含量随着施肥量的增加而增加。用目前国际上普遍使用的三种土壤有效P测定方法(Olsen 1P, Mehlich 1P和Bray 1P)测得的土壤有效P变化趋势基本一致,Olsen 1P最低,Mehlich 1P居中,Bray 1P最高。P₀, P₄, P₁₃和P₄₀这4个处理间的有效P差异不显著,P₁₂₀处理的表层土壤的有效P含量均比其它处理的高,而P₃₆₀处理的表层土壤的有效P含量均比其它处理的低。虽然P₄₀同P₀, P₄和P₁₂相比,表层土壤有效P大大提高,但由于各个处理重复间方差较大,所以统计上它们之间没有显著的差异。

施P肥2.5a后不能显著增加施肥带间0~20cm表层土壤有效P含量(图4)。虽然P₁₂₀和P₃₆₀这2个处理带间表层土壤有效P有一定的提高,但没有达到显著差异。说明施肥后P在土壤中的移动性较差,即使相隔很近土壤有效P也很难提高。对于这3种分析方法来说,Bray 1更能说明土壤有效P的动态变化。

施P肥在前3a能显著($p < 0.001$)增加蓝桉高生长。在P₀, P₄和P₁₃之间,以及P₄₀, P₁₂₀和P₃₆₀之间没有显著差异,但这2组

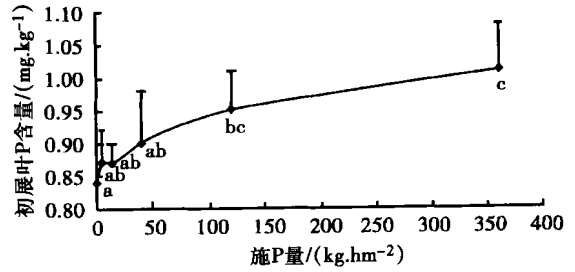


图3 施P肥对蓝桉初展叶P含量的影响 (处理的平均值字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著,平均值上的格为一个标准差。)

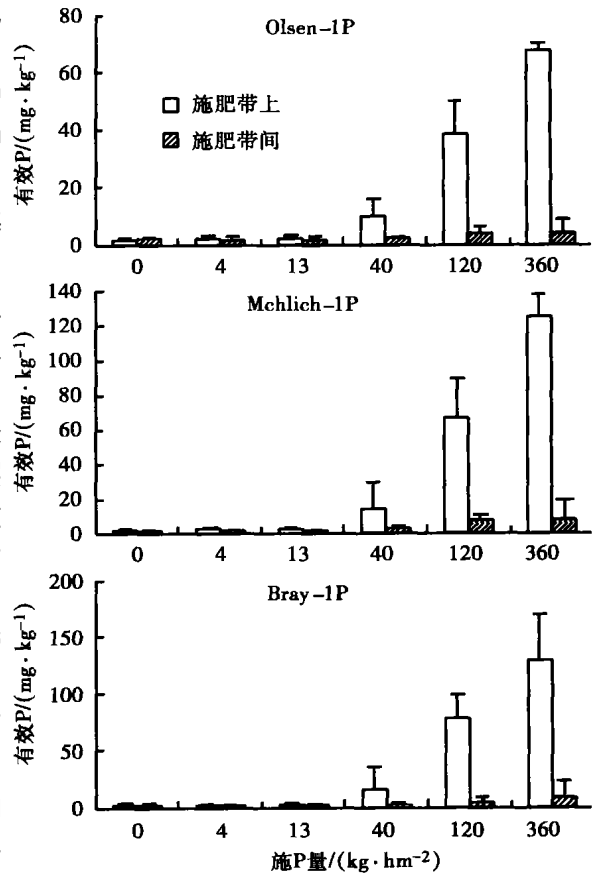


图4 施P肥2.5a后不同处理撩行带上和撩行带间土壤有效P (Olsen 1P, Mehlich 1P和Bray 1P)的对比 (处理的平均值字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著,平均值上的格为一个标准差。)

之间差异显著。在施 P 水平和观测时间之间存在显著差异 ($p < 0.001$)。施 P 的作用开始于 6 个月, 在 2 a 时达最大, 然后又下降。在 4.5 年生时, 各个处理之间树高差异不显著 (表 6)。

施 P 肥同样影响蓝桉的胸径生长 ($p < 0.001$)。2 年生时, P_0 处理的胸径小于其它处理, P_4 和 P_{13} 也比高 P 处理的胸径小。在施 P 水平和观测时间之间也存在显著差异 ($p < 0.001$)。1 年生时明显, 3 年生时变得较小。3 年生时, 3 个高 P 和 3 个低 P 处理之间没有明显差异。在 P 肥处理和观测时间之间存在交互作用, 在 4.5 年生时, 不同处理之间的胸径差异不显著 (表 6)。

表 6 施 P 肥对不同林龄蓝桉树高和胸径生长的影响

处理	树高/m					胸径/cm			
	0.5 a	1 a	2 a	3 a	4.5 a	1 a	2 a	3 a	4.5 a
P_0	0.95 a	2.36 a	5.90 a	10.27 a	13.1 a	1.6 a	6.0 a	9.6 a	11.8 a
P_4	0.99 a	2.55 b	6.16 a	10.37 a	13.1 a	1.8 b	6.3 b	9.7 a	11.8 a
P_{13}	1.10 b	2.90 c	6.39 ab	10.45 a	12.8 a	2.2 c	6.5 b	9.5 a	11.5 a
P_{40}	1.24 c	3.29 f	6.97 d	11.03 b	13.0 a	2.7 e	7.1 c	10.0 b	11.7 a
P_{120}	1.22 c	3.10 de	6.57 bc	10.93 b	13.0 a	2.5 d	6.8 bc	9.8 b	11.7 a
P_{360}	1.18 c	3.24 ef	6.78 dc	11.18 b	13.6 a	2.8 e	7.0 c	10.4 b	12.5 a

注: 同一列中平均值后字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著。

施 P 肥能显著增加桉树各组分的生物量 (表 7)。总的来说, P_0 同 P_4 、 P_{13} 、 P_{40} 之间差异不明显, 但同 P_{120} 和 P_{360} 之间差异明显, P_{360} 这个处理的生物量明显高于其它处理。

表 7 施 P 肥对 4.5 年生蓝桉人工林生物量各部分的影响

$t \cdot \text{hm}^{-2}$

处理	干材	树皮	树枝	树叶	根桩	大根	小根	合计
P_0	40.0 a	6.3 a	2.9 a	4.9 a	5.3 a	1.4 a	0.5 a	63.5 a
P_4	45.4 ab	7.1 ab	3.3 ab	5.6 ab	8.5 ab	1.6 ab	0.6 ab	72.0 ab
P_{13}	45.3 ab	7.2 ab	3.2 ab	5.6 ab	8.5 ab	1.6 ab	0.6 ab	72.0 ab
P_{40}	49.2 ab	7.8 b	3.5 ab	6.1 ab	9.2 ab	1.8 b	0.6 ab	78.2 ab
P_{120}	50.1 b	7.9 b	3.6 b	6.2 b	9.4 b	1.8 b	0.6 ab	79.6 b
P_{360}	60.4 c	9.2 c	4.4 c	7.5 c	11.3 c	2.0 c	0.7 c	95.5 c

注: 同一列中处理的平均值字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著。

施 P 肥能显著增加蓝桉的立木蓄积量 (图 5), 但前 5 个 P 处理的立木蓄积量没有显著的差异, 但 P_{360} 明显高于其他处理。

施 P 肥能增加蓝桉生物量大部分组分中 N 的积累量 (表 8)。N 主要集中在树叶和干材中。施 P 肥明显地提高树叶 N 的积累量。 P_{120} 和 P_{360} 明显高于 P_0 的树叶 N 积累量。施 P 肥也显著增加所有树木各组分生物量中 N 的积累量之和, P_{120} 和 P_{360} 明显高于其它处理, 但施 P 肥没有增加林下植被和凋落物中 N 的积累量。

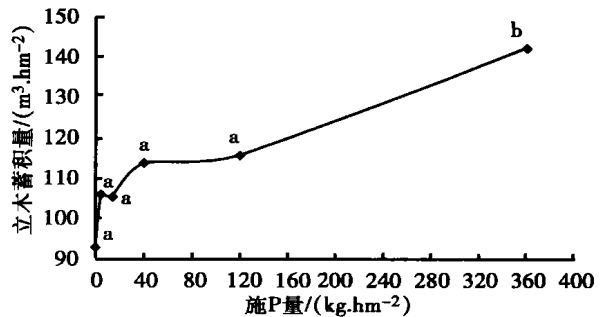


图 5 施 P 肥对 4.5 年生蓝桉立木蓄积量的影响 (字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著。)

由于各 P 肥处理之间在生物量各组分 N 含量上没有差异, 所以 N 积累量的增加主要得益

于生物量的增加。

表 8 施 P 肥对 4.5 年生蓝桉各组分、林下植物及凋落物 N、P、K 积累量的影响 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理	元素	干材	树皮	树枝	树叶	根桩	大根	小根	合计	其它
P ₀	N	45.1 a	17.8 a	11.8 ab	60.4 a	18.7 d	4.0 c	2.0 b	159.8 a	28.4 a
	P	10.7 a	4.4 bc	1.5 b	4.2 a	1.9 bc	0.5 ab	0.2 a	23.4 a	1.1 a
	K	81.8 a	30.4 a	14.9 a	37.1 a	24.0 a	6.4 a	3.1 a	197.8 a	20.3 a
P ₄	N	48.2 a	19.1 ab	12.0 ab	68.4 ab	16.7 cd	3.8 bc	1.9 ab	170.1 ab	28.1 a
	P	10.2 a	3.8 ab	1.1 a	4.9 ab	2.3 cd	0.6 b	0.3 ab	23.2 a	1.1 a
	K	97.1 abc	34.2 a	18.2 ab	46.0 ab	28.7 ab	6.9 ab	3.6 ab	234.7 ab	23.2 a
P ₁₃	N	42.7 a	18.2 a	10.0 a	65.6 ab	11.6 ab	3.1 ab	1.6 a	152.7 a	29.8 a
	P	10.9 a	3.3 a	1.3 ab	4.9 ab	1.5 ab	0.4 a	0.3 ab	22.6 a	1.0 a
	K	88.9 ab	35.1 a	15.3 a	40.9 a	27.3 ab	6.9 ab	3.6 ab	218.0 a	23.0 a
P ₄₀	N	39.8 a	19.3 ab	10.9 a	69.6 ab	9.8 a	2.7 a	1.7 ab	153.7 a	25.2 a
	P	13.1 ab	5.1 c	1.3 ab	5.3 b	1.3 a	0.5 ab	0.4 b	27.0 b	1.0 a
	K	82.9 a	34.4 a	16.9 ab	46.9 ab	23.6 a	7.3 ab	4.0 bc	216.0 a	18.5 a
P ₁₂₀	N	58.4 b	22.4 bc	12.2 ab	79.6 bc	13.6 bc	6.2 d	1.8 ab	194.3 b	33.5 a
	P	14.0 b	4.0 ab	1.3 ab	5.8 b	2.7 d	0.8 c	0.4 b	28.9 b	1.3 ab
	K	111.1 c	36.0 a	19.1 b	55.3 b	31.1 bc	8.0 bc	4.0 bc	264.7 b	26.0 a
P ₃₆₀	N	50.4 ab	23.6 c	13.8 b	87.6 c	13.6 bc	3.3 ab	1.9 b	194.2 b	38.1 a
	P	20.7 c	6.4 d	1.8 c	7.3 c	2.1 cd	0.7 c	0.9 c	40.0 c	1.7 b
	K	105.3 bc	42.7 b	24.9 c	55.1 b	33.8 c	8.9 c	4.2 c	274.9 b	30.3 a

注:其它包括林下植物和凋落物。同一列中平均值后字母相同为在 $p = 0.05$ 时多重比较差异不显著。

施 P 肥能显著增加生物量各组分 P 的积累量(表 9),同时也显著增加林下植被和凋落物的 P 含量。树木生物量中 P 的积累量主要集中在干材、树叶和树皮中,而这三部分也是采伐时树木收获的部分。P₄₀和 P₁₂₀明显高于 P₀、P₄ 和 P₁₃的生物量 P 积累量, P₃₆₀明显高于其它处理生物量 P 的积累量。

施 P 肥也显著增加树木生物量 K 的积累量,但不能显著增加林下植被和凋落物中 K 的积累量(表 9)。生物量中 K 的积累量主要集中在干材、树叶、树皮和根桩中。

施 P 肥有增加蓝桉干材和生物量 N 利用效率的趋势,最大 N 利用效率的处理为 P₄₀。在低 P 处理时,干材和生物量 P 利用效率有所提高,但在高 P 处理时(P₄₀、P₁₂₀、P₃₆₀) P 利用效率有下降的趋势。K 利用效率随 P 肥施用量变化不大。

表 9 施 P 肥对 4.5 年生蓝桉养分利用效率的比较

处理	干材的养分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{g}^{-1}$)			生物量的养分利用效率/($\text{kg} \cdot \text{g}^{-1}$)		
	N	P	K	N	P	K
P ₀	250.3	1 708.5	202.1	397.6	2 713.2	321.0
P ₄	266.8	1 955.9	193.3	423.3	3 103.4	306.8
P ₁₃	296.7	2 004.9	207.8	471.2	3 183.9	330.1
P ₄₀	319.8	1 820.6	227.6	508.5	2 894.7	361.8
P ₁₂₀	257.9	1 733.9	189.3	409.6	2 753.6	300.6
P ₃₆₀	310.9	1 509.4	219.6	491.8	2 387.8	347.4

3 讨论与结论

施 P 肥对早期蓝桉的胸径和树高生长有显著的促进作用,4.5 年生时这种促进作用变得

不显著。一方面是低 P 处理保存率低, 单一树木占有更大空间, 促进了树木后期生长; 另一方面, 该土壤缺 P 程度较低, 早期在树木根系没有充分发展时, 施 P 肥的促进作用大, 后期由于蓝桉根系的发展, 土壤吸收面积更大, 促进作用减弱。该试验说明, 在营造蓝桉速生丰产林时, 应适量施 P 肥以提高造林的保存率。

该试验结果同何蓉等^[5]在云南保山的研究结果相比, 增产幅度要低。可能同土壤缺 P 程度较低有关。同作者^[3, 4]前期在广东开平和高要赤红壤上巨尾桉和尾叶桉的研究结果相比, 增产幅度更低。施 P 肥能够增加桉树人工林的产量, 但问题是在不同土壤类型上施多少, 怎么施才能达到较好效果。在施入土壤后, 多数 P 将被土壤粘粒表面所吸附并随之产生化学反应, 所以大部分 P 变得对树木无效。广东主要土壤的 P 的最大吸附量为 $600 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 1 hm 土地 0~10 cm 的表土层就可吸收 $600 \sim 1\,000 \text{ kg}$ 的 P。一般来说, 粘粒含量越高, 单位土壤吸附面积越大, 能吸收的 P 越多, 需要的施肥量越大, 绝大部分所施 P 被 Fe、Al、Ca 和 Mg 固定而无法游动^[15]。总的来说, 在土壤 pH 高于 5.5 的情况下(主要是云南和广西中西部)桉树人工林 P 的施肥量 $20 \sim 50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 比较适合(换算成 P_2O_5 为 $45 \sim 110 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。对于土壤 pH 小于 5.0 的地区(广东、海南、福建和广西东部)来说, 施肥量应该在 $50 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (换算成 P_2O_5 为 $110 \sim 440 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 可根据经济条件具体选定用量。P 肥最好能一次集中施放, 一般不会对根系造成伤害。P 通过土壤颗粒或团聚体之间下渗移动很慢, 移动性能差, 下渗损失少, 主要通过地表径流产生少量的移动^[16], 所以, 少量多次施肥可能效果差。施 P 肥后施肥带上表层土壤有效 P 显著提高, 而相邻带间表层土壤有效 P 没有显著增加的结论也证实了移动性能差。Dias 等^[2]在巴西砖红壤上的研究表明, 大量施 P 肥在一个轮伐期后仍然能较大地提高土壤有效 P 含量。对于养分管理水平较高的林分来说, 一次大量施 P 肥等于是长期投资, 将会在以后的多个轮伐期内收回投资^[17]。

在该试验中, 施 P 除增加桉树产量外, 还能增加林分养分吸收量和养分利用效率, 但这种作用同作者在土壤更酸的广东开平和高要相比, 作用大为降低; 同时该试验施 P 肥显著地增加树木的养分吸收, 对林下植被的养分吸收量和凋落物的养分含量增加程度没有树木显著。一般来说, 所施 P 肥的养分吸收率随施肥量的增加而降低, 大部分为 $5\% \sim 30\%$, 而该试验所施 P 肥的养分吸收率都低于 5% , 再次说明土壤缺 P 程度较低。

由于土壤缺 P 程度低, 所以接种菌根菌对蓝桉生长的促进作用也有限。在第 1 年, 由于蓝桉苗木根系没有充分发展, 接种菌根菌都能明显地促进树木生长。在 2~3 a 期间, 只有个别菌株可以明显促进树木生长。3 a 后, 这种促进作用不明显, 同施 P 肥的作用随时间逐步减弱吻合, 所以, 如何需要在该地区蓝桉种植中进行菌根菌接种, 就需要找到更好的优良菌株, 才能体现增产作用, 不进行大量的菌株筛选用少数菌株在大范围内接种所能取得的增产作用值得怀疑。

施 P 肥后, 林木 P 积累量的大幅度提高和林下植被及凋落物 P 积累量的增加, 为今后林地养分管理提供了 P 的有机来源。如能在砍伐时, 保留树木枝、叶、树皮、地下部分、林下植被和凋落物于林地, 将大幅度提高林地 P 的供给量, 提高林地土壤肥力和长期生产力。

参考文献:

- [1] 胡天宇. 桉树人工林的发展历史和现状[A]. 见: 祁述雄. 中国桉树[C]. 北京: 中国林业出版社, 2002. 14 ~ 22
- [2] Dias L E, Fernandez J Q P, Barros N F, et al. Availability of phosphorus in a Brazilian oxisol cultivated with *Eucalyptus* after nine years as influenced by phosphorus fertilizer source, rate and placement[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2001, 32: 837 ~ 847
- [3] Xu D, Dell B, Malajczuk N, et al. Effects of P fertilisation on productivity and nutrient accumulation in a *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* plantation in southern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 161: 89 ~ 100
- [4] Xu D, Dell B, Malajczuk N, et al. Effects of P fertilisation and ectomycorrhizal fungal inoculation on early growth of eucalypt plantations in southern China[J]. *Plant and Soil*, 2001, 233: 47 ~ 55
- [5] 何蓉. 云南蓝桉人工林施肥效益[J]. *林业科学研究*, 1999, 12(5): 474 ~ 478
- [6] Lu X, Malajczuk N, Dell B. Mycorrhiza formation and growth of *Eucalyptus globulus* seedlings inoculated with spores of various ectomycorrhizal fungi[J]. *Mycorrhiza*, 1998, 8: 81 ~ 86
- [7] Grove T S, Malajczuk N, Gong M et al. Optimising phosphorus fertilizers and mycorrhizal fungal inoculation for growth of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*[A]. In: Brundett M, Dell B, Malajczuk N, Gong M. Mycorrhizas For Plantation Forestry In Asia[C], ACIAR Proceedings No. 62. ACIAR, Canberra, 1994. 101 ~ 107
- [8] Dell B, Malajczuk N. Boron deficiency in eucalypt plantations in China[J]. *Can J For Res*, 1994, 24: 2409 ~ 2416
- [9] Dell B, Malajczuk N, Grove T. Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts[M]. ACIAR Monograph 31. ACIAR, Canberra, 1995
- [10] Simpson J A. Fertilizer responses of forest species at Dongmen[A]. In: Proceedings of the Third Technical Exchange Seminar[C]. Dongmen State Forest Farm, Guangxi, China, 1986, 14 ~ 20
- [11] Fernandez J O P, Dias L E, Barros N F, et al. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol[J]. *For Ecol Manage*, 2000, 127: 93 ~ 102
- [12] Murphy J, Riley J P. A modified single solution for determination of phosphate in natural waters[J]. *Analysis Chemistry Acta*, 1962, 27: 31 ~ 36
- [13] Bray R H, Kurtz, L T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil[J]. *Soil Sci*, 1945, 59: 39 ~ 45
- [14] Olsen S R, Sommers L E. Phosphorus[A]. In: Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy[C]. Madison, Wisconsin, USA, 1982
- [15] Truhill S T. Barriers to a better environment[M]. London: Belhaven Press, 1990
- [16] Kirkby C A, Smythe L J, Cox J W, et al. Phosphorus movement down to a toposequence from a landscape with texture contrast soils Aust. [J]. *Journal Soil Res*, 1997, 35: 399 ~ 417
- [17] Fölster H, Khanna P K. Dynamics of nutrient supply in plantation soils[A]. In: Nambiar E K S, Brown A G. Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests[C]. ACIAR, Canberra, Australian, 1997. 339 ~ 378

Effects of Phosphorus Fertilization and Ectomycorrhizal Fungal Inoculation on Productivity and Nutrient Accumulation of *Eucalyptus globulus* Plantation

XU Da-ping¹, Bernie Dell², GONG Ming-qin¹, Nick Malajczuk², WANG Zhi-he³

(1. Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou 510520, Guangdong, China;

2. School of Biological Sciences and Biotechnology, Murdoch University, Perth, W. A. 6150, Australia;

3. Chuxiong Research Institute of Forestry, Yunnan Province, Chuxiong 678000, Yunnan, China)

Abstract: This paper dealt with the effects of P fertilization and ectomycorrhizal fungal inoculation on productivity and nutrient accumulation of *Eucalyptus globulus* plantation in Chuxiong, Yunnan. The results showed that ectomycorrhizal fungal inoculation increased tree growth of *E. globulus* in early stage of the plantations. However, the effect of ectomycorrhizal fungal treatments was no significant three years after plantation establishment. P fertilization increased tree diameter and height growth. But the effect of P treatments was not significant at 4.5 years old. P fertilization increased survival rate of planted trees. The low survival rate in low P treatments could increase tree growth in late stage of the plantation. The insignificant effect of P treatments at 4.5 years old was partly due to the change of survival rate in different P treatments. P fertilization increased N, P and K accumulation in tree biomass and nutrient use efficiency in wood and biomass production. P fertilization increased P accumulation in understorey and litter, but N and K. Leaf and soil sample analysis further proved that P fertilization promoted tree growth in the early stage. The experimental results indicated that ectomycorrhizal fungal inoculation could only increase tree growth in low P treatments instead of high P treatments.

Key words: *Eucalyptus globules*; P fertilization; ectomycorrhizal fungal inoculation; biomass; nutrient accumulation