

# 钙与硼、氮配施对酸性土壤上柚木 无性系苗期生长的影响

周再知 梁坤南 徐大平 马华明 黄桂华 张玉臣

( 中国林业科学研究院热带林业研究所 广州 510520 )

摘 要：采用 311 - A 混合最优回归设计 ,以强酸性赤红壤为培养基质 ,开展柚木苗期 Ca ,B ,N 营养元素配比盆栽试验。结果表明 :不同配比处理对柚木无性系幼苗高和地径生长 ,叶、茎、根生物量影响均达极显著水平。Ca 是促进酸性赤红壤柚木苗木高、地径生长和叶、茎、根部器官生物量积累的营养因子 ,也是柚木苗木生长的限制因子。B 对苗木生长影响不显著 ,Ca 与 B 之间不存在交互作用。苗木对 N 反应敏感 ,在低 Ca 量和不施 Ca 的情况下 ,随追施 N 量的增加 ,苗高、地径生长和总生物量积累受到抑制。贫瘠强酸性赤红壤上培育柚木 ,应适当增加 Ca( 氧化钙 )和减少 N( 尿素 )的用量。柚木苗期最适 Ca ,B ,N 配比为 :Ca: B: N = 1.2 g·kg<sup>-1</sup>: 0.4 mg·kg<sup>-1</sup>: 0.3 g·kg<sup>-1</sup> ,相应最佳营养物质配比为 :CaO: H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>: ( NH<sub>2</sub> )<sub>2</sub>CO = 1.68 g·kg<sup>-1</sup>: 2.3 mg·kg<sup>-1</sup>: 0.65 g·kg<sup>-1</sup>。

关键词：柚木；幼苗；酸性赤红壤；钙；硼；氮

中图分类号：S723.7 文献标识码：A 文章编号：1001 - 7488( 2010 )05 - 0102 - 07

## Growth Response of Teak Clone Seedlings to Calcium , Boron and Nitrogen Supply in Acid Soil

Zhou Zaizhi Liang Kunnan Xu Daping Ma Huming Huang Guihua Zhang Yuchen

( Research Institute of Tropical Forestry ,CAF Guangzhou 510520 )

**Abstract** : A potting culture experiment with optimal hybrid regression design ( 311-A ) was carried out to study the growth response of cloned teak ( *Tectona grandis* ) seedlings to calcium ( 0 - 1.2 g·kg<sup>-1</sup> ) , boron ( 0 - 0.8 mg·kg<sup>-1</sup> ) and nitrogen ( 0 - 1.2 g·kg<sup>-1</sup> ) supply in acidic lateritic red soil. Extremely significant differences were found in growth of seedling height , root collar diameter , and oven-dry weights of leaves , stems and roots between 11 treatments. Ca , a major nutrient element , was identified to be a limiting factor for teak seedling growth in acidic lateritic red soil. B had no remarkable impact on seedling growth and no interaction with Ca , whereas , there was interaction between N and Ca. The seedling height , root collar diameter and total dry mass were evidently restrained by addition of N when no or little Ca was applied. To manage teak in strongly acidic lateritic red soil , it is necessary to apply enough Ca and less N. The optimal nutrient rate in pots was Ca 1.2 g·kg<sup>-1</sup> , B 0.4 mg·kg<sup>-1</sup> and N 0.3 g·kg<sup>-1</sup> , equivalent to CaO of 1.68 g·kg<sup>-1</sup> , H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> of 2.3 mg·kg<sup>-1</sup> , and ( NH<sub>2</sub> )<sub>2</sub>CO of 0.65 g·kg<sup>-1</sup>.

**Key words** : *Tectona grandis* clone ; acidic lateritic red soil ; calcium ; boron ; nitrogen ; seedling growth

柚木( *Tectona grandis* )为著名的热带珍贵用材树种 ,天然分布于缅甸、印度、泰国和老挝。因其独特的材质及较高的经济价值 ,被亚洲、非洲、大洋洲、中(南)美洲的许多国家或地区引种。我国引种柚木有 170 多年的历史 ,遍及 7 个省(区)100 多个县(市) ( 陈存及等 ,2000 ; 马华明等 ,2003 )。然而 ,在这些引种区域内 ,酸性至强酸性土壤面积约占 2/3( 潘一峰等 ,1999 )。土壤酸化导致有效养分 ,特别是钙的流失及较高的交换性铝储量 ,严重影响柚

木的生长和发育( Zech *et al.* ,1991 )。土壤 pH 值被认为是限制柚木天然分布和生长发育的重要因子之一( Kaosa-ard ,1998 ; TEAKNET ,1999 )。柚木适宜中性和轻微偏碱性的土壤 ,最适 pH 值范围在 6.5 ~ 7.5 之间 ,玄武岩和泥炭土发育的 pH 值 < 6.0 的酸性土壤上柚木生长欠佳( Prui ,1951 ; Srisuksai ,1992 )。钙是限制柚木生长的主要营养因子( Kaosa-ard ,1981 ; Krishnapilla *et al.* ,2000 ; Mohan ,2005 )。研究表明 ,柚木的生长发育需要大量的钙 ,土壤缺钙

则柚木生长矮小( Seth, 1958; Kaosa-ard, 1981; Tewari, 1992)。土壤中的钙含量被作为柚木立地质量评价的指标( Kaosa-ard, 1998)。酸性土壤施用石灰,可提高土壤的 pH 值,增加土壤的钙量,但随施钙量的增加,植物对硼的吸收量降低( Gupta *et al.*, 1972; Shear, 1975)。挪威云杉( *Pecea abies*)林中施石灰后,其针叶中硼含量有所下降( Lehto *et al.*, 1994)。酸性土壤施用石灰导致植物缺硼或出现缺硼症状( Tanaka, 1967; 牛义等, 2003)可以通过增施硼肥措施加以纠正( Braekke, 1983b)。也有报道称,钙与硼间呈正相关关系,施硼可以增加对钙的运输与吸收( Dixon *et al.*, 1973; Yamaurehi *et al.*, 1986)。氮是植物生长需求量最大的营养元素,制约着植物的生长和产量的形成( Attiwill *et al.*, 1993)。氮也是限制柚木生长主要营养元素( Mohan, 2005)。缺硼的土壤大量施氮会加剧硼缺乏症状,降低作物的产量( 皮美美等, 1989),但也有研究表明硼氮配施可以提高作物的产量( Umesh, 1976)及树木的生长量( 黄宗益等, 1999)。钙、硼、氮配施对酸性土壤柚木生长有何影响,三者之间的相互作用及最适配比,也是酸性土壤柚木人工林经营急需解决的关键技术问题。针对上述问题,开展了钙、硼、氮不同配比苗期盆栽试验,以期为酸性土壤柚木苗木培育和人工林经营提供科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 苗木 供试材料为柚木缅甸优良种源 7544 腋芽组培移栽苗。培育过程如下:在组培室内培育未生根的组培瓶苗,练苗后将幼苗从瓶中取出,剪掉

愈伤组织,清洗,扦插在经 5% 高锰酸钾消毒的河沙苗床上。温室条件下培养(不施肥)3 个月,待用。此时,平均苗高 8.0 cm,平均地径 0.1 cm。

1.1.2 土壤 供试土壤为花岗岩上发育的赤红壤,取自中国林业科学研究院热带林业研究所(广州市龙洞)后山 0~40 cm 土层。土壤 pH 值 4.25, < 0.02 mm 的土粒含量占 36.7%,有机质 12.225 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 0.702 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.105 g·kg<sup>-1</sup>,全钾 34.881 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 71.72 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 1.09 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 44.75 mg·kg<sup>-1</sup>,交换性钙(1/2 Ca<sup>2+</sup>) 5.07 mmol·kg<sup>-1</sup>,交换性镁(1/2 Mg<sup>2+</sup>) 0.691 mmol·kg<sup>-1</sup>,交换性铝(1/3 Al<sup>3+</sup>)<sup>3</sup> 0.918 mmol·kg<sup>-1</sup>,交换性锰 11.468 mg·kg<sup>-1</sup>,有效硼 0.213 mg·kg<sup>-1</sup>,阳离子交换量 39.69 mmol·kg<sup>-1</sup>,盐基饱和度 17.56%。

1.1.3 肥料 氧化钙(分析纯),含 Ca 71.4%;硼酸(分析纯),含有效 B 17.5%;尿素(俄罗斯产),含有效 N 46%。磷钾肥:磷酸二氢钾(分析纯),含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 52.44%,含 K<sub>2</sub>O 34.8%。

### 1.2 试验设计与方法

采用 311 - A 混合最优回归设计(白厚义, 2003; 茆诗松等, 1981; 吴健等, 1988; 杨义群, 1990),以 Ca, B, N 为因子,每因子 5 水平(表 1),共计 11 个处理(表 2)。处理小区随机排列,3 次重复,每处理小区 4 株苗(每盆 1 株),即每处理共计重复 12 次。Ca, B 用量参照赤红壤巨桉( *Eucalyptus grandis*)苗石灰和硼施肥试验用量(仲崇禄, 1996)及普通木麻黄( *Casuarina equisetifolia*)苗木硼最佳施用量(仲崇禄, 1994)设定, N 用量参照柚木苗期多因素( N, P, K 和沸石)施肥试验用量(梁坤南等, 2005)设定。

表 1 柚木苗木钙、硼、氮配施试验水平编码值及有效用量

Tab. 1 Nutrient elements and their coded and natural levels in 311 - A regression design

营养元素 Element	用量范围 Range	间距 Interval	编码值和有效用量 Coding value and natural levels						
			-2	-1.414	-1	0	1	1.414	2
Ca/(g·kg <sup>-1</sup> )	0~1.2	0.3	0	0.18		0.6		1.00	1.2
B/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0~0.8	0.2	0	0.12		0.4		0.68	0.8
N/(g·kg <sup>-1</sup> )	0~1.2	0.3	0		0.3	0.6	0.9		1.2

按照 11 个处理中肥料的实际用量(表 2),分别称取氧化钙、硼酸和尿素。基质土壤经风干后过孔径 5 mm 土筛,称取 2 kg,与称量好的氧化钙、硼酸以及磷酸二氢钾(0.4 g·株<sup>-1</sup>,作底肥)充分混匀后装入上口径 16 cm,下口径 12 cm,高 20 cm,容积 3 L 的塑料营养盆中。从沙床中取出苗木,

用去离子水洗根后单株移入。尿素仅作追肥用,移苗后 1 个月开始追施,将称量好的尿素淋施土盆中,每次 1/8 用量,每半个月施 1 次(5—8 月),施满 8 次后停施。试验在具自动喷水浇灌设施的温室内进行,确保水分的定时、定量供给。

表 2 不同处理的钙、硼、氮有效用量及实际用量

Tab. 2 Natural level of independent variables and fertilizing level in different treatment

处理 Treatment	钙 Ca/ (g·kg <sup>-1</sup> )	硼 B/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	氮 N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	氧化钙 CaO/ (g·plant <sup>-1</sup> )	硼酸 H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> / (mg·plant <sup>-1</sup> )	尿素 (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO/ (g·plant <sup>-1</sup> )
1	0.60	0.40	1.2	1.68	4.6	5.22
2	0.60	0.40	0	1.68	4.6	0.00
3	0.18	0.12	0.9	0.50	1.4	3.91
4	1.00	0.12	0.9	2.80	1.4	3.91
5	0.18	0.68	0.9	0.50	7.8	3.91
6	1.00	0.68	0.9	2.80	7.8	3.91
7	1.20	0.40	0.3	3.36	4.6	1.30
8	0.00	0.40	0.3	0.00	4.6	1.30
9	0.60	0.80	0.3	1.68	9.1	1.30
10	0.60	0.00	0.3	1.68	0.0	1.30
11	0.60	0.40	0.6	1.68	4.6	2.61

### 1.3 指标测定与数据分析

试验从 2008 年 4 月 1 日开始,10 月 1 日结束,每月观测 1 次,共计 6 次。每次测定全部苗木的苗高与地径。试验结束时,测定苗高、地径后将苗木从盆中取出,叶、茎分离,分别称其鲜质量。洗净根,用滤纸吸干水分后称其鲜质量。随后将每株苗木的叶、茎、根在 70 °C 温度下烘至恒质量,分别称干质量。采用 SAS 8.0 统计分析软件(美国 SAS 软件研究所)的方差分析过程(GLM)和二次响应曲面回归分析过程(RSREG)对苗高、地径及生物量(干质量)指标进行统计分析,Duncan 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 苗高生长

移苗 1 个月,不同处理的苗高生长差异已达极显著水平( $P < 0.0001$ )2 个月后,这种差异逐渐增

大。3 个月时,处理 7 的苗高生长显著的高于其他处理;处理 8 生长最差,3 个月后几乎停止生长。4 个月时,不同处理平均苗高的高低排序与 5 个月时相一致;5 个月与 6 个月时的平均苗高,不同处理差异的相似程度则完全一致(表 3),表明对苗高的影响在 5 个月时完全趋于稳定。此时,各处理对苗高生长影响顺序,处理 7 > 处理 10 和处理 9 > 处理 2 > 处理 11 > 处理 4、处理 6 和处理 1 > 处理 5、处理 3 和处理 8。6 个月时的平均苗高,最佳处理 7(Ca: B: N = 1.2 g·kg<sup>-1</sup>: 0.4 mg·kg<sup>-1</sup>: 0.3 g·kg<sup>-1</sup>)是最差处理 8(Ca: B: N = 0 g·kg<sup>-1</sup>: 0.4 mg·kg<sup>-1</sup>: 0.3 g·kg<sup>-1</sup>)的 5.9 倍。这 2 个处理之间,B 与 N 的用量相同,钙的用量处理 7 最高,处理 8 最低。可见,在 B 与 N 用量相同的条件下,钙量(氧化钙)高低是直接影响苗高生长的主要因素。

表 3 钙、硼、氮不同配施处理对柚木苗高生长的影响<sup>①</sup>

Tab. 3 Effects of different fertilizing treatments of Ca, B and N on mean height of teak clone seedlings with time cm

处理 Treatment	第 1 月 First month	第 2 月 Second month	第 3 月 Third month	第 4 月 Fourth month	第 5 月 Fifth month	第 6 月 Sixth month
1	9.5 ± 1.45 a	11.1 ± 1.32 ab	14.3 ± 2.09 d	14.5 ± 2.25 d	15.4 ± 2.32 e	15.5 ± 2.32 e
2	9.2 ± 0.87 ab	10.9 ± 1.42 ab	17.1 ± 3.84 c	23.1 ± 4.24 c	26.1 ± 4.61 c	26.9 ± 4.67 c
3	8.2 ± 1.77 b	8.9 ± 1.73 c	9.9 ± 2.44 e	10.2 ± 3.46 e	10.5 ± 3.53 f	10.7 ± 3.41 f
4	9.6 ± 1.41 a	10.9 ± 1.49 ab	16.0 ± 4.37 cd	17.5 ± 4.51 d	18.8 ± 4.49 e	19.0 ± 4.57 e
5	9.6 ± 1.78 a	10.0 ± 1.68 bc	10.4 ± 1.63 e	10.4 ± 1.64 e	10.6 ± 1.69 f	10.7 ± 1.66 f
6	9.3 ± 1.33 ab	12.0 ± 1.71 a	15.6 ± 2.93 cd	17.0 ± 2.92 d	18.4 ± 2.69 e	18.4 ± 2.69 e
7	8.9 ± 1.07 ab	11.8 ± 1.73 a	26.9 ± 5.28 a	36.9 ± 2.81 a	46.8 ± 4.17 a	55.1 ± 6.84 a
8	9.1 ± 0.97 ab	9.2 ± 1.07 c	9.4 ± 1.13 e	9.4 ± 1.13 e	9.4 ± 1.13 f	9.4 ± 1.13 f
9	9.6 ± 1.31 a	12.0 ± 2.11 a	20.7 ± 4.64 b	27.7 ± 4.85 b	31.3 ± 5.36 b	32.2 ± 5.65 b
10	9.1 ± 0.87 ab	10.8 ± 1.97 ab	20.5 ± 3.62 b	29.8 ± 4.62 b	33.4 ± 6.38 b	34.6 ± 7.03 b
11	10.0 ± 0.96 a	11.6 ± 3.73 ab	17.5 ± 1.97 c	20.6 ± 3.05 c	22.3 ± 3.33 d	22.9 ± 3.56 d

① 列内字母相同的表示差异不显著。Means within columns with the same are not significantly different between treatments at  $p = 0.05$  using Duncan's multiple range test. 下同 The same below.

### 2.2 地径生长

移苗后 1 个月,不同处理间的地径生长差异也

已达到极显著水平( $P < 0.0001$ )。5 个月与 6 个月时平均地径的多重比较结果表明,不同处理差异相

似程度趋于一致(表 4),表明不同处理对地径生长影响在 5 个月时也已完全趋于稳定。此时,不同处理对苗木地径生长的影响高低次序为:处理 7 > 处理 9 和处理 10 > 处理 2 和处理 11 > 处理 4、处理 6

和处理 1 > 处理 3、处理 5 和处理 8。与苗高生长的影响相似,处理 7 对地径生长的促进作用最大,6 个月时达 0.77 cm,而处理 8 则相反,该处理下苗木地径基本没有生长。

表 4 钙、硼、氮不同配施处理对柚木苗地径生长的影响

Tab. 4 Effects of different fertilizing treatments of Ca, B and N on the growth of root collar diameter of teak seedlings with time

处理 Treatment	第 1 月 First month	第 2 月 Second month	第 3 月 Third month	第 4 月 Fourth month	第 5 月 Fifth month	第 6 月 Sixth month
1	0.24 ± 0.035 abcd	0.29 ± 0.027 a	0.38 ± 0.056 c	0.38 ± 0.073 c	0.39 ± 0.075 e	0.39 ± 0.075 e
2	0.27 ± 0.045 a	0.30 ± 0.056 a	0.41 ± 0.084 abc	0.54 ± 0.083 a	0.56 ± 0.083 cd	0.61 ± 0.079 cd
3	0.20 ± 0.026 ef	0.21 ± 0.043 bc	0.23 ± 0.081 d	0.23 ± 0.065 d	0.23 ± 0.070 f	0.24 ± 0.084 f
4	0.22 ± 0.034 de	0.29 ± 0.054 a	0.42 ± 0.085 abc	0.45 ± 0.095 c	0.46 ± 0.096 e	0.48 ± 0.106 e
5	0.22 ± 0.033 bede	0.22 ± 0.027 b	0.22 ± 0.037 d	0.23 ± 0.257 d	0.23 ± 0.057 f	0.23 ± 0.053 f
6	0.22 ± 0.030 de	0.29 ± 0.057 a	0.39 ± 0.061 bc	0.46 ± 0.080 bc	0.44 ± 0.095 e	0.46 ± 0.100 e
7	0.23 ± 0.035 bcde	0.32 ± 0.071 a	0.43 ± 0.057 abc	0.55 ± 0.045 a	0.72 ± 0.026 a	0.77 ± 0.079 a
8	0.18 ± 0.033 f	0.18 ± 0.040 c	0.18 ± 0.042 d	0.18 ± 0.042 d	0.18 ± 0.042 f	0.18 ± 0.042 f
9	0.25 ± 0.037 ab	0.31 ± 0.040 a	0.46 ± 0.051 a	0.58 ± 0.063 a	0.65 ± 0.076 b	0.70 ± 0.093 b
10	0.22 ± 0.034 dec	0.29 ± 0.019 a	0.43 ± 0.048 abc	0.56 ± 0.067 a	0.62 ± 0.089 bc	0.67 ± 0.085 bc
11	0.25 ± 0.034 abc	0.31 ± 0.040 a	0.45 ± 0.055 ab	0.52 ± 0.044 ab	0.53 ± 0.043 d	0.54 ± 0.049 d

2.3 生物量(干质量)积累

6 个月时,苗木不同器官(叶、茎、根)、地上部分及苗木总生物量的差异均达到极显著水平(P < 0.000 1)。处理 7 的叶片、茎、根系的生物量均显著的高于其他处理(表 5)。该处理苗木器官生物量高低依次为,叶 > 茎 > 根系,其中叶片生物量是茎的 1.9 倍,根系的 2.8 倍。

处理 10 和处理 9 的地上部分及总生物量大小无显著差异。从这 2 个处理 Ca, B, N 元素配比看,所施用的 Ca 量(0.6 g·kg<sup>-1</sup>)和 N 量(0.3 g·kg<sup>-1</sup>)均相同,仅施 B 量不同,处理 10 不施 B,而处理 9 的施 B 量为最高(0.8 mg·kg<sup>-1</sup>)。由此可见,在所给定的 B 用量范围内,B 对柚木苗生物量积累没有显著的作用。处理 10、处理 9 与处理 2 的施 Ca 量相同(0.6 g·kg<sup>-1</sup>),处理 10 和处理 9 所施 N 量相同,

仅处理 2 为不施 N。这 3 个处理地上部分及总生物量大小也无显著差异,但从生物量值大小比较看,处理 10 和处理 9 略高于处理 2,说明施 0.3 g·kg<sup>-1</sup> 的 N 比不施 N 略好。

无论是叶、茎,还是根系生物量,处理 2 都显著的高于处理 11 和处理 1,这 3 个处理所施用的 Ca 和 B 量相同,分别为 0.6 g·kg<sup>-1</sup>和 0.4 g·kg<sup>-1</sup>,而 N 的施用量以处理 1 最高(1.2 g·kg<sup>-1</sup>),其次为处理 11(0.6 g·kg<sup>-1</sup>),最少的为处理 2(0 g·kg<sup>-1</sup>),表明 N 施入量越高,越不利于各器官生物量的积累。从不同处理生物量排序结果(表 5)可知,不施钙处理(即处理 8)的各器官生物量均最低,该处理下的苗木几乎不能正常生长,与施用相同 B, N 用量的处理 7 无法相比。充分说明了酸性赤红壤上,钙对柚木苗木生物量积累的显著影响。

表 5 钙、硼、氮不同配施处理对柚木苗生物量积累的影响

Tab. 5 Effects of different fertilizing treatments of Ca, B and N on mean dry mass of each section of teak seedlings with time

处理 Treatment	叶片 Leaves	茎 Stems	根系 Roots	地上部分 Above ground section	总生物量 Total dry mass
1	0.201 c	0.733 fe	1.016 de	0.933 cd	1.949 ed
2	4.089 b	2.213 c	3.323 b	6.302 b	9.625 b
3	0.123 c	0.306 fg	0.488 de	0.428 d	0.917 e
4	0.905 c	1.239 de	1.526 cd	2.144 c	3.670 cd
5	0.040 c	0.201 fg	0.326 fe	0.241 d	0.542 e
6	0.761 c	0.965 de	1.291 d	1.726 cd	3.016 cd
7	11.123 a	5.656 a	3.980 a	16.779 a	20.759 a
8	0.023 c	0.102 g	0.154 f	0.124 d	0.278 e
9	4.443 b	3.020 b	3.586 ab	7.463 b	11.049 b
10	4.836 b	2.758 b	3.249 b	7.593 b	10.843 b
11	1.111 c	1.399 d	1.898 c	2.510 c	4.408 c

2.4 多项式回归模型及检验

为充分揭示苗木高、地径生长和生物量积累与 Ca (X<sub>1</sub>) B (X<sub>2</sub>) N (X<sub>3</sub>) 营养元素之间的定性、定量关系，

运用 RSREG 对 6 个月时的苗高、地径和总生物量指标建立三元二次多项式回归模型。方差分析表明，所建的 3 个回归模型均达到极显著水平 (P < 0.000 1)。

表 6 钙、硼、氮不同配施处理柚木苗高、地径与总生物量模型回归系数及检验<sup>①</sup>

Tab. 6 Parameter estimate and test for the growth of teak seedling height, root collar diameter and total dry mass of different fertilizing treatments of Ca, B and N

苗高模型 Seedling height model			地径模型 Root collar diameter model			总生物量模型 Total dry mass model		
变差来源 Parameter	回归系数 Estimate	P <sub>r</sub> >  t	变差来源 Parameter	回归系数 Estimate	P <sub>r</sub> >  t	变差来源 Parameter	回归系数 Estimate	P <sub>r</sub> >  t
x <sub>1</sub>	10.072	<0.000 1 **	x <sub>1</sub>	0.175	<0.000 1 **	x <sub>1</sub>	4.345	<0.000 1 **
x <sub>2</sub>	-0.748	0.370	x <sub>2</sub>	0.011	0.345	x <sub>2</sub>	-0.324	0.410
x <sub>3</sub>	-8.246	<0.000 1 **	x <sub>3</sub>	-0.121	<0.000 1 **	x <sub>3</sub>	-4.422	<0.000 1 **
x <sub>1</sub> × x <sub>1</sub>	0.846	0.477	x <sub>1</sub> × x <sub>1</sub>	-0.083	<0.000 1 **	x <sub>1</sub> × x <sub>1</sub>	0.819	0.147
x <sub>2</sub> × x <sub>1</sub>	-0.688	0.548	x <sub>2</sub> × x <sub>1</sub>	-0.009	0.579	x <sub>2</sub> × x <sub>1</sub>	-0.204	0.705
x <sub>2</sub> × x <sub>2</sub>	0.725	0.540	x <sub>2</sub> × x <sub>2</sub>	0.027	0.095	x <sub>2</sub> × x <sub>2</sub>	1.140	0.045 *
x <sub>3</sub> × x <sub>1</sub>	-8.206	<0.000 1 **	x <sub>3</sub> × x <sub>1</sub>	-0.050	0.002 **	x <sub>3</sub> × x <sub>1</sub>	-3.948	<0.000 1 **
x <sub>3</sub> × x <sub>2</sub>	1.776	0.134	x <sub>3</sub> × x <sub>2</sub>	-0.006	0.711	x <sub>3</sub> × x <sub>2</sub>	0.404	0.467
x <sub>3</sub> × x <sub>3</sub>	-2.036	0.172	x <sub>3</sub> × x <sub>3</sub>	-0.031	0.122	x <sub>3</sub> × x <sub>3</sub>	0.434	0.534

① \*\*极显著 Very signifoant (α=0.01); \* 显著 Significant(α=0.05).

从模型回归系数的显著性检验(表 6)和因变量的一次和二次项总体方差检验可知,钙、氮对苗高、地径和总生物量的生长影响达极显著水平,且两者间存在着交互作用,而硼未达到显著水平,表明钙与氮是影响苗木高、地径生长和总生物量积累的主要因素,而硼对柚木苗生长影响不大。为了解单一因子对总生物量(W)指标的影响采用“降维法”得如下方程:

$$W = 4.236 1 + 4.345 1X_1 + 0.819 1X_1^2, \quad (1)$$

$$W = 4.236 1 - 0.323 7X_2 + 1.140 4X_2^2, \quad (2)$$

$$W = 4.236 1 - 4.421 8X_3 + 0.434 0X_3^2. \quad (3)$$

依据方程(1)~(3)绘制柚木苗木总生物量单因子效应分析图(图 1)。从图 1 中可以看出钙与总生物量呈正相关,表明钙是促进苗木生物量积累的主要营养因子,而 N 与苗木的总生物量指标呈负相关,表明追施氮肥不利于苗木生物量的积累。

3 结论与讨论

1) 酸性赤红壤上, Ca, B, N 不同配施处理对柚木无性系 7544 苗期苗高、地径生长、叶、茎、根、地上部分及总生物量积累均产生显著影响。3 种营养元素中, Ca 是促进酸性赤红壤柚木无性系苗地上部分生长的主要营养因子和限制因子, B 对其生长未产生显著影响, 追施过多的 N 则不利于柚木无性系苗的生长。Ca 与 N 之间存在交互作用, 而 Ca 与 B、B 与 N 之间则无交互作用。

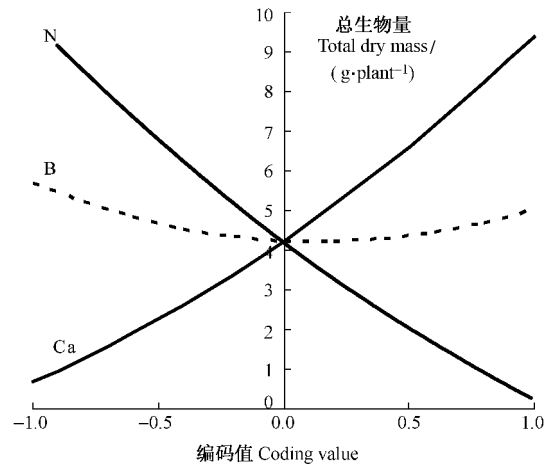


图 1 柚木苗整株生物量因子效应分析图

Fig. 1 Single factor effect on total dry mass of teak clone seedlings in fertilizing treatments

2) 11 个处理中, 处理 7 的苗高、地径生长和总生物量积累均最高, 显著高于其他 10 个处理, 分别是最差处理(处理 8)的 5.9、4.3 和 74.7 倍。处理 7 的苗木器官生物量高低顺序表现为叶 > 茎 > 根系, 其中叶片生物量是茎的 1.9 倍, 根系的 2.8 倍。酸性赤红壤柚木无性系 7544 苗期最适 Ca, B, N 配比为: Ca: B: N = 1.2 g · kg<sup>-1</sup>: 0.4 mg · kg<sup>-1</sup>: 0.3 g · kg<sup>-1</sup>, 相应的最适肥料配比为: CaO: H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>: (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO = 1.68 g · kg<sup>-1</sup>: 2.3 mg · kg<sup>-1</sup>: 0.65 g · kg<sup>-1</sup>。

3) 赤红壤为南亚热带的地带性土壤, 该类土壤

一般呈酸性(pH 值 4.5 ~ 5.5),且盐基含量普遍较低(广东科学院丘陵山区综合科学考察队,1991)。按照全国土壤普查技术标准(李淑仪等,2007),本试验所用的酸性赤红壤的交换性钙、有效硼及碱解氮含量分属极缺乏、缺乏和偏低等级。试验结果表明,在所设定的B量(0~0.8 mg·kg<sup>-1</sup>)范围内,B对柚木无性系7544苗期生长影响不显著,这可能是由于试验所设B量太低,未能达到显著促进苗木生长所需最低量所致;也可能是由于柚木无性系7544苗期硼需求量低,尽管土壤的有效硼含量也较低(0.213 mg·kg<sup>-1</sup>),但足以满足其生长所需,故对外源B不敏感。有关柚木苗木的B临界含量问题还有待研究和确定。

4) N素是柚木生长所必需的营养元素,但试验结果表明追施过多的N(尿素)则不利于柚木无性系7544苗木的生长。这主要是由于盆内土为强酸性土壤(pH 值 4.25),追施尿素可导致盆内土特别是根际土壤pH值的下降及Al<sup>3+</sup>含量的提高(本试验土壤测定结果,见后续报道),导致几乎无硝化作用的发生,严重制约柚木苗木根际对有效养分吸收的缘故。Katyal等(1988)对15个土壤的硝化活性研究表明,pH 值 4.6~5.1的土壤,几乎无硝化作用。土壤的硝化作用随pH值的升高而增强(Dancer, 1973)。即便有硝化作用的发生,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N使土壤pH值升高的幅度一般低于NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N使pH值下降的幅度(陆景陵,2003)。石锦芹等(1999)研究也表明,尿素可酸化赤红壤,降低对Ca及土壤中其他营养元素的有效吸收。可见,尿素的施用,应以不加重土壤酸化为宜。

5) 在贫瘠酸强酸性赤红壤上培育柚木,建议增施足够量的钙,特别是以石灰为钙源,适当减少N(尿素)的用量,亦或采用硝酸盐类为氮源,以提高土壤的Ca含量和pH值,提高N的有效性及促进对其他营养元素的有效吸收。

## 参 考 文 献

白厚义. 2003. 回归设计及多元统计分析. 南宁:广西科学技术出版社.  
 陈存及,陈伙法. 2000. 阔叶树种栽培. 北京:中国林业出版社.  
 广东省科学院丘陵山区综合科学考察队. 1991. 广东土地资源. 广州:广东科技出版社.  
 黄益宗,冯宗炜,黎向东. 1999. 应用“416 A”最优混合设计研究尾叶桉肥效与营养诊断. 林业科学, 35(6): 10-18.  
 皮美美,刘武定,吴礼树,等. 1989. 硼与氮磷钾配合施用对棉花产量养分吸收的影响//国际平衡施肥学术研讨会论文集. 北京:农业出版社.

潘一峰,邝炳朝,刘文明. 1999. 柚木无性系耐酸性和耐铝(Al)毒性的测定. 林业科学研究, 12(2): 152-159.  
 李淑仪,钟继洪,莫晓勇,等. 2007. 桉树土壤与营养研究. 广州:广东科学技术出版社.  
 陆景陵. 2003. 植物营养学. 北京:中国农业大学出版社.  
 马华明,梁坤南,周再知. 2003. 我国柚木的研究与发展. 林业科学研究, 16(6): 768-773.  
 茆诗松,丁元,周纪芾,等. 1981. 回归分析及其试验设计. 上海:华东师范大学出版社.  
 牛义,张盛林. 2003. 植物硼素营养研究的现状及展望. 中国农学通报, 19(2): 101-104.  
 石锦芹,丁瑞兴,刘友兆,等. 1999. 尿素和茶树落叶对土壤的酸化作用. 茶叶科学, 19(1): 7-12.  
 吴健,庄部华,吕富保. 1988. 农业栽培技术系统优化设计. 济南:山东科学技术出版社.  
 杨义群. 1990. 回归设计与多元分析在农业上的应用. 杨凌:天则出版社.  
 仲崇禄. 1994. 微量元素对普通木麻黄苗木的影响. 广东林业科技, (3): 39-45.  
 仲崇禄. 1996. 赤红壤表土育苗施石灰后施P、Zn、B对巨桉苗生长的影响. 林业科学研究, 10(3): 332-336.  
 Attiwill P M, Adama M A. 1993. Nutrient cycling in forests. New Phytol, 124: 561-582.  
 Braekke F H. 1983. Micronutrients-prophylactic use and cure of forest growth disturbances. Commun Inst For Fenn, 116: 159-169.  
 Dancer W S, Peterson L A, Chesters G. 1973. Ammonification and nitrification of N as influenced by pH and previous N treatments. Soil Sci Amer Proc, 37: 67-69.  
 Dixon B, Sagar G R, Shorrocks V M. 1973. Effects of calcium and boron on the incidence of tree and storage pit in apples of the cultivar. Egrement Russet Hort Sci, 48: 403-411.  
 Gupta U C, Cutcliffe J A. 1972. Effects of lime and boron on brown-heart leaf tissue calcium/boron ratios and boron concentration of Rutabage. Soil Sci Soc Amer Proc, 36: 936-939.  
 Kaosa-ard, A. 1981. Teak (*Tectona grandis* Linn. f.) its natural distribution and related factors. NAT Hist Bull Siam Soc, 29: 55-74.  
 Kaosa-ard A. 1998. Overview of problems in teak plantation establishment//Masakazuk, White K. Proceedings of the Second Regional Seminar on "Teak for the Future". Yangon, Myanmar: FAO.  
 Katyal J C, Cater M F, Vlek P L G. 1998. Nitrification activity in submerged soil and its relation to denitrification loss. Biol Fertil Soils, 7: 16-22.  
 Krishnapilla B, Abdul R, Mohd A. 2000. Site, technology and productivity of teak, the Malaysian experience//Enters T, Nair C T S. Proceedings of International Seminar on "Site, Technology and Productivity of Teak Plantation". Bangkok: FAO.  
 Kulkarni D H. 1951. Distribution of teak (*Tectona grandis* L. f.) on the north slope of the Satpuras with special reference to Geology//Proceedings of the Eighth Silvicultural Conference. Dehra Dun, India: Forest Research Institute, 254-263.  
 Lehto T, Malkonen E. 1994. Effects of liming and boron fertilization on

- boron uptake of *Pecea abies*. Plant and Soil ,163 :55 - 64.
- Mohan K B. 2005. Sustainable teak plantations in the tropics : the question of nutrient management//Proceedings of the International Conference on Quality Timber Product of Teak from Sustainable Forest Management. Peechi , India : Kerala Forest Research Institute ,179 - 187.
- Puri G S. 1951. Advances in the ecology of teak ( *Tectona grandis* L. f. )//Proceedings of the Eighth Silvicultural Conference , Dehra Dun , India : Forest Research Institute ,242 - 249.
- Seth S K , Khan W M A. 1958. Regeneration of teak forests. Indian Forester ,84( 8 ) :455 - 466.
- Shear C B. 1975. Calcium-related disorders of fruits and vegetables. Hort Science ,10 :361 - 365.
- Srisuksai B. 1992. Nutrient losses from teak stump harvesting// Proceeding of the Seminar on 50 Anniversary of Huay-Tak Teak Plantation : 60<sup>th</sup> Birthday Celebration of Her Majesty the Queen of Thailand. Bangkok , Thailand : Royal Forestry Dept ,169 - 179.
- Tanaka H. 1967. Boron absorption by crop plants as affected by other nutrients on the medium. Soil Sci Plant Nutr ,13 :41 - 44.
- TEAKNET. 1999. TEAK-some aspects of research and development. TEAKNET publication , No. 4. Yangon , Myanmar : San Thain Kha Press.
- Tewari D N. 1992. A monograph on teak ( *Tectona grandis* Linn. f. ). Dehra Dun , India : International Book Distributor.
- Umesh C , Gupta J , Macleod A , *et al.* 1976 . Effects of boron and nitrogen on grain yield and boron and nitrogen concentrations of barley and wheat. Soil Sci Soc Am J 40 :723 - 726.
- Yamaurehi T. 1986. Effects of boron deficiency and calcium supply on the calcium metabolism in tomato plant. Plant and Soil , 93 : 223 - 230.
- Zech W , Drechsel P. 1991. Relationships between growth , mineral nutrition and site factors of teak( *Tectona grandis* ) plantations in the rain forest zone of Liberia. Forest Ecology and Management , 41 : 221 - 235.

( 责任编辑 郭广荣 )