

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.007

3种初植密度桉树林分生长、材种出材量及经济效益动态分析

张程^{1,2}, 欧阳林男¹, 陈少雄^{1*}

(1. 国家林业和草原局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 通过监测 3 种初植密度桉树人工林 16 a 的生长情况, 分析其材种出材量及经济效益, 为培育桉树中、大径材提供理论参考。[方法] 收集和分析桉树人工林 3 种初植密度 1 250、883、667 株·hm⁻² 16 a 的生长数据, 计算材种出材量, 同时分析平均生长量、内部收益率和净现值。[结果] 密度 1 250 株·hm⁻² 与密度 883、667 株·hm⁻² 的胸径生长均差异显著 ($p < 0.05$); 不同密度间林分蓄积量差异不显著 ($p > 0.05$)。中径材出材量及其年均出材量在 7~12 a 和第 16 年以密度 883 株·hm⁻² 的林分最大, 7~12 a 密度 667 株·hm⁻² > 1 250 株·hm⁻², 第 16 年密度 1 250 株·hm⁻² 超过密度 667 株·hm⁻²。密度 883 株·hm⁻² 在第 16 年开始出现大径材。密度 1 250 株·hm⁻² 的轮伐期为 7 a, 密度 883、667 株·hm⁻² 均为 9 a。9 a 时密度 1 250、883 株·hm⁻² 的净现值达到峰值, 密度 667 株·hm⁻² 在 8 a 时达到峰值, 密度 1 250、883、667 株·hm⁻² 的最大净现值分别为 30 994、40 193、31 288 元·hm⁻², 对应的内部收益率分别为 37%、41%、42%。[结论] 初植密度 883 株·hm⁻² 有最高的净现值、内部收益率以及较高的生长潜力, 667 株·hm⁻² 次之, 1 250 株·hm⁻² 最低。

关键词: 桉树; 中、大径材; 初植密度; 出材量; 经济效益

中图分类号: S792.39

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)04-0058-08

密度控制是影响林分提质增产的关键技术之一, 对林木个体间竞争、林地生产潜力发挥、目标材种培育以及经济效益提高均有显著影响^[1]。国内外学者对密度控制方面开展了大量研究, 其中, 包括杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)^[2-3]、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)^[4-5]、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)^[6]、西桦 (*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don)^[7]、落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)^[8] 等树种, 研究集中于林分结构、林木生长效果、林木自然稀疏、林下植被、土壤养分效应等^[3, 9-11], 也有部分对出材量及经济效益进行了讨论, 如湛红辉等^[12] 发现, 幼林期马尾松出材量与密度正相关, 随林龄增加, 由正相关转向负相关; 郭光智等^[13] 发现, 在较高立地质量条件

下, 低初植密度是影响中、大径材形成的关键因子; 孙洪刚等^[14] 研究得到木材径阶随间伐次数增加而增大, 即保留株数越少, 形成大径材的可能性更大; 卢立华等^[15] 对 14 年生杉木不同密度的生长和经济效益进行分析, 发现间伐处理有利于提高大径材出材比例及出材径级, 密度为 500 株·hm⁻² 的大径材蓄积量最大, 1 000 株·hm⁻² 可获得最可观的经济收益。

桉树 (*Eucalyptus* L'Herit) 目前主要分布于南方十省, 作为南方重要用材林树种, 栽植面积达 546 万 hm², 因其速生丰产, 在缓解国内木材市场供求矛盾上起到了重要作用^[16]。随着桥梁、家具等产业的快速发展, 小径级木材已经难以满足市场的需求。新兴产业的发展以及木材产业发达国家对原

收稿日期: 2021-01-06 修回日期: 2021-04-08

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题 (2016YFD0600502); 广东省林业科技创新项目 (2019KJCX005); 湛江桉树培育国家长期科研基地运行补助 (2020132509)

* 通讯作者: 陈少雄, 博士, 研究员, 主要从事桉树人工林培育研究。E-mail: sxchen01@163.com

木出口的严格管控使国内市场高质量木材供不应求的局面更加紧张,从而促使更多学者探索影响桉树中、大径材培育的关键因素,初植密度就是其中之一^[17-18]。桉树虽然在密度试验方面研究较多,但大多是在林木生长、林分产量、木材材性等方面,而在结合目标材种进行出材情况及经济效益分析方面,陈少雄等^[19]结合拟合公式和尾径划分标准来计算尾巨桉不同材种出材量百分比,并分析经济效益,但未展示各径级材种的出材量情况。Emilio等^[20]分析蓝桉(*Eucalyptus globulus* Labill.)林10a采收期时1000、1428、1667、2000株·hm⁻²密度下的经济效益,发现1000株·hm⁻²的净现值最高,预测其为风险最低的投资,1667、2000株·hm⁻²会带来更多成本,收益偏低,但该研究缺乏材种情况分析。基于初始栽植密度,根据径阶来划分桉树材种,分析出材量及其价值的有关报道很少。本研

究结合广西东门林场华侨分场尾巨桉(*E. urophylla* S.T.Blake × *E. grandis* W.Hill ex Maiden)初植密度试验林16a的观测资料,对不同初植密度的中、大径材出材量、经济效益及林分生长进行系统分析,为该树种规划造林密度、培育目标材种提供科学依据。

1 试验区概况

试验地位于广西国有东门林场华侨分场21林班(22°17′~22°30′N, 107°14′~108°00′E),年平均气温21.8℃左右,极端高温41℃,极端低温-0.1℃,年降水量约1300mm,土壤类型为砖红壤,各土层化学组成见表1。前作为柠檬桉(*Eucalyptus citriodora* Hook.)。试验地向阳坡,坡度为5°~10°。

表1 土壤化学组成

Table 1 Chemical composition of soil

母岩 Parent rock	土层 Soil layer/cm	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	pH	水解性氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)
砂 Sand	1~33	34.8	39	5.0	33.7	30.6	5.3
泥 Mud	33~70	13.0	40	5.7	70.4	2.0	极少
岩 Rock	70~130	10.7	32	6.7	29.3	1.3	3.0

采用机耕全垦方式整地,深度为30~35cm;所有苗木均为尾巨桉DH32-13的扦插苗,并选择营养杯培育,苗高为15~25cm;以100g·株⁻¹钙镁磷肥作为基肥;1993年4月2日定植。

2 研究方法

2.1 试验设计与观测

该试验选择随机区组设计,设1250、883、667株·hm⁻²3种密度处理,各密度均设置4次重复。所有试验小区面积为20m×20m,合计12个小区;相邻小区间隔4m。追肥2次,首次在栽植后2个月内进行,最后1次在造林后38个月时完成。施用的氮肥为尿素,含N463g·kg⁻¹;钾肥为氯化钾,含K600g·kg⁻¹;磷肥为钙镁磷,含P160g·kg⁻¹。追肥时在距立木基部水平距离20cm的位置挖15cm见方的小穴,待施完3种肥后覆土。所有试验小区均去除边缘立木,测量中间部分树木,调查范围如下:密度1250株·hm⁻²各小区24株(3行×8株),883株·hm⁻²各小区15株

(3行×5株),667株·hm⁻²各小区10株(2行×5株),栽植9a内逐年对各小区进行胸径(DBH)和树高(H)测量,第12年生和第16年生也对以上3个处理的树高与胸径进行调查。

2.2 统计

结合各标准地逐年测量的树高、胸径等数据,依据桉树大径材培育技术规程(LY/T2909—2017)^[21],按照大径材(胸径DBH≥28cm)、中径材(DBH16~26cm)、小径材(DBH8~14cm)分径阶统计每个小区各个材种的林分蓄积量。

2.3 龄级划分

桉树人工林按照龄级划分为幼龄林(5a以下)、中龄林(6~10a)、近熟林(11~15a)、成熟林(16~25a)、过熟林(26a以上)^[22]。

2.4 数量成熟龄及轮伐期确定依据

根据欧建德等^[23]研究,以材积平均生长量达最大值时的年龄为数量成熟龄,并以数量成熟龄作为轮伐期的确定依据^[19]。

2.5 计算方法与依据

2.5.1 营林成本 由以下6部分组成：(1) 机耕整地费用， $1\,027.5\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；(2) 基肥费用（施工、肥料），钙镁磷复合肥 $100\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ，上述3种密度的基肥成本分别为 205.1 、 137.6 、 $109.3\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；(3) 造林费用（桉树苗及定植、运输），上述3种密度的造林费用分别为 328.5 、 254.9 、 $109.3\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；(4) 追肥2次费用，上述3种密度单次追肥的费用均以 $722\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为准；(5) 抚育费用，定植后3 a内每年均进行1次机抚，单次费用 $75\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；(6) 地租费用，从造林前1年开始产生，依据市场价格 $1\,500\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.5.2 单株材积与林分蓄积计算 平均实验形数法计算桉树单株材积^[19]：

$$V = f \times G_{1.3} \times (H + 3) \quad (1)$$

式(1)中： V 材积 (m^3)； f 桉树的实验形数，取值 0.4 ^[24]； $G_{1.3}$ 胸高断面积 (m^2)； H 树高 (m)。

林分蓄积为每个标准地的所有单株立木材积之和，换算为每公顷的蓄积量 ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)。

2.5.3 木材销售价格 按照径阶来计算桉木价格，并进行销售。(1) 大径材（锯材） $1\,200\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ ；(2) 中径材（旋切材） $800\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ ；(3) 小径材（纸浆材） $400\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.5.4 采伐成本 包括 $30\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ 的运输等费用以

及 $80\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ 的砍伐人工费。

2.5.5 净现值 指逐年收益值与逐年开支现值的总数差值^[25]。净现值 > 0 ，代表的是除开支外的利润；若为负值，营林收益将无法与成本持平。

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

式(2)中： NPV 净现值， C_t 在周期 t 内的净现金流量， n 包括的年数， i 贴现率（林业取 12% ^[19]）。

2.5.6 内部收益率 指使一项设计的净现值为零时得到的贴现率^[25]。

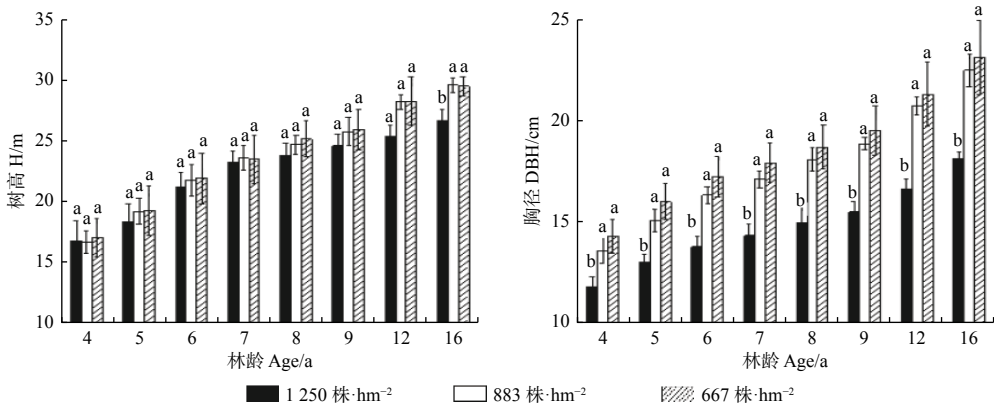
$$\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (3)$$

式(3)中： IRR 为内部收益率，其他符号同公式(2)。

3 结果与分析

3.1 林木生长过程

3.1.1 树高生长过程 图1表明：12 a内，3种密度间的树高生长差异较小，16 a内的树高生长量均呈随密度减小而增大的趋势，密度 $1\,250\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的树高平均生长量一直最低，且与密度 883 、 $667\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的差距随林龄增加而增大。这说明中、幼林阶段造林密度对桉树树高生长影响不大。



注：不同小写字母代表不同密度间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

Notes: Different lowercase letters indicate significant difference among different densities at 0.05 level. The same as below.

图1 3种初植密度的林分平均树高和胸径生长

Fig. 1 The average height and DBH growth of three initial spacing

3.1.2 胸径生长过程 图1表明：密度越大，胸径生长量越小，密度 $1\,250\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与密度 883 、 $667\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的平均胸径生长量随林龄的增加逐渐

拉开差距，且密度 $1\,250\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与密度 883 、 $667\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的胸径差异显著 ($p < 0.05$)。从第4年开始，除密度 $1\,250\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 外的林分均有少数立木

达到中径材标准,大径材立木最先出现在密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 中。

3.1.3 蓄积量生长过程 第4~5年蓄积量随密度增大而增大,第6~7年蓄积量不再随密度的增大

而增大,第8年后林分平均蓄积生长量均是密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的最大,密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的最低(表2)。经方差分析,3种密度间林分平均蓄积量的生长差异均不显著($p > 0.05$)。

表2 3种初植密度的林分平均蓄积量生长过程

Table 2 The average stand volume of three initial spacing

初植密度 Initial spacing/ (株·hm ⁻²)	平均蓄积量 Average stand volume/(m ³ ·hm ⁻²)							
	4 a	5 a	6 a	7 a	8 a	9 a	12 a	16 a
1 250	110.54 ± 13.63 a	146.69 ± 15.08 a	186.26 ± 19.21 a	218.84 ± 19.25 a	244.63 ± 22.98 a	270.71 ± 20.22 a	322.66 ± 23.56 a	404.04 ± 19.90 a
883	104.26 ± 12.79 a	145.26 ± 13.91 a	186.43 ± 15.51 a	218.46 ± 18.96 a	255.40 ± 23.84 a	288.60 ± 22.70 a	377.82 ± 19.79 a	467.14 ± 44.23 a
667	87.63 ± 16.96 a	122.04 ± 24.18 a	158.28 ± 30.69 a	181.54 ± 33.19 a	210.35 ± 36.47 a	237.15 ± 43.79 a	305.06 ± 62.87 a	372.21 ± 61.27 a

3.2 数量成熟龄的密度效应

由图2看出:初植密度 $1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的材积平均生长量在第7年达到峰值, 883 、 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 均在第9年最高,因此,该试验林3种密度的数量成熟龄分别为7、9、9 a,即该试验采取的初植密度措施对桉树轮伐期产生了作用,表现为轮伐期随密度增大而减小的趋势。

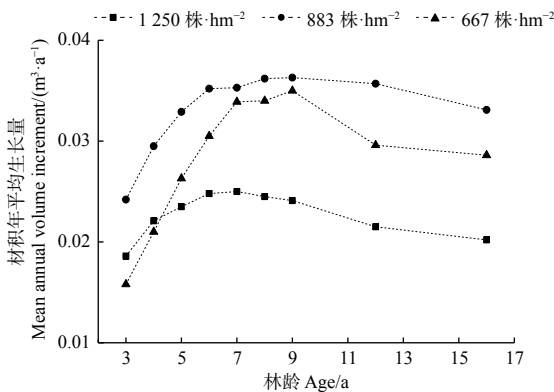


图2 3种初植密度桉树林分材积年平均生长量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of the mean annual increment of stem volume between three initial spacing

3.3 不同初植密度对林分中、大径材出材量的影响

考虑到林分的经济和生态效益,从有轮伐期(7 a)出现时开始计算出材量。桉树林分出材率按照常规数据80%计算^[26]。不同初植密度对中、大径材(旋切材和锯材)出材量和年均出材量的影响(表3)表明:中径材出材量及其年均出材量在第7年密度 $1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与密度 883 、 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 均差异显著($p < 0.05$);第8年密度 $1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$

与密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 差异显著($p < 0.05$);第12年密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与密度 $1\,250$ 、 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 差异显著($p < 0.05$)。9、16 a时中径材出材量及其年均出材量3种密度间均差异不显著($p > 0.05$)。7~12 a中径材出材量均为密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2} > 667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2} > 1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,第16年密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 仍最高,但密度 $1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 超过密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。3种密度在7~9 a均没有出现大径材,密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 在第12年最先出现大径材,第16年密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 开始出现大径材,密度 $1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 一直未出现大径材。3种初植密度的中径材年均出材量均随林龄的增加呈先上升后下降的趋势,且在9年生时达到峰值;7~12 a中径材年均出材量均为密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2} > 1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,第16年密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 仍最高,但密度 $1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 超过密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的大径材年均出材量随林龄增加逐渐递增,第16年时比密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的高。

3.4 经济效益分析

3.4.1 营林成本与销售收入 造林前1年至第16年的营林成本见表4。销售收入主要指伐倒木的销售额与采伐、运输等一系列成本的差值,即毛利润。由表5看出:开始出现轮伐期(7 a)后,密度 $883 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的毛利润远高于密度 $1\,250$ 、 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,除第9年之外,密度 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的毛利润均高于密度 $1\,250 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3.4.2 净现值 图3表明:密度 883 、 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 均在第4年出现中径材立木。图4表明:密度 $1\,250$ 、 883 、 $667 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 在其对应的轮伐期7、

表3 3种初植密度中、大径材林木出材量和年均出材量

Table 3 The stand volume and MAI of stand volume with middle and large diameter timber between three initial spacing

林龄 Age/a	材种 Wood assortment	出材情况 Timber situation	初植密度 Initial spacing/(株·hm ⁻²)		
			1 250	883	667
7	中径材 Middle diameter timber	出材量 Timber yield/(m ³ ·hm ⁻²)	78.75 ± 25.08 b	168.64 ± 15.17 a	143.25 ± 24.25 a
		年均出材量 Average annual output volume/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	11.25 ± 3.58 b	24.09 ± 2.17 a	20.46 ± 3.47 a
8	中径材 Middle diameter timber	出材量 Timber yield/(m ³ ·hm ⁻²)	128.16 ± 26.19 b	200.43 ± 22.65 a	166.24 ± 26.39 ab
		年均出材量 Average annual output volume/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	16.02 ± 3.28 b	25.06 ± 2.83 a	20.78 ± 3.30 ab
9	中径材 Middle diameter timber	出材量 Timber yield/(m ³ ·hm ⁻²)	169.44 ± 17.37 a	229.44 ± 18.14 a	187.66 ± 32.68 a
		年均出材量 Average annual output volume/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	18.82 ± 1.93 a	25.49 ± 2.02 a	20.85 ± 3.63 a
12	中径材 Middle diameter timber	出材量 Timber yield/(m ³ ·hm ⁻²)	223.34 ± 13.71 b	300.50 ± 15.49 a	226.59 ± 39.94 b
		年均出材量 Average annual output volume/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	18.61 ± 1.14 b	25.04 ± 1.29 a	18.88 ± 3.33 b
16	大径材 Large diameter timber	出材量 Timber yield/(m ³ ·hm ⁻²)	0	0	14.97
		年均出材量 Average annual output volume/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	0	0	1.25
16	中径材 Middle diameter timber	出材量 Timber yield/(m ³ ·hm ⁻²)	296.64 ± 19.58 a	331.71 ± 61.64 a	235.23 ± 45.15 a
		年均出材量 Average annual output volume/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	18.54 ± 1.22 a	20.73 ± 3.85 a	14.70 ± 2.82 a
16	大径材 Large diameter timber	出材量 Timber yield/(m ³ ·hm ⁻²)	0	39.84	59.53
		年均出材量 Average annual output volume/(m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)	0	2.49	3.72

表4 3种初植密度每年的营林成本

Table 4 The silvicultural cost of three initial spacing

林龄 Age/a	项目 Item	初植密度 Initial spacing/(株·hm ⁻²)		
		1 250	883	667
0	地租、整地、基肥 Rent、Land preparation、Base fertilizer/(元·hm ⁻²)	2 732.6	2 665.1	2 636.8
1	地租、造林、抚育、追肥 Rent、Afforestation、Tending、Top dressing/(元·hm ⁻²)	2 625.5	2 551.9	2 406.3
2	地租、抚育 Rent、Tending/(元·hm ⁻²)	1 575	1 575	1 575
3	地租、抚育、追肥 Rent、Tending、Top dressing/(元·hm ⁻²)	2 297	2 297	2 297
4~16	地租 Rent/(元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	1 500	1 500	1 500

表5 3种初植密度分年采伐减去销售成本后的毛利润

Table 5 The gross profit after deducting sales cost of three initial spacing for each year

初植密度 Initial spacing/ (株·hm ⁻²)	林龄 Age/a					元·hm ⁻²
	7	8	9	12	16	
1 250	82 226	107 969	130 528	164 141	212 391	
883	118 139	139 428	158 731	207 854	272 931	
667	99 418	115 299	130 084	173 386	228 073	

9、9 a 时的利润为 23 000~41 000 元·hm⁻²，利润顺序为密度 883 株·hm⁻² > 667 株·hm⁻² > 1 250 株·hm⁻²。7~9 a 密度 1 250、883 株·hm⁻² 的利润均逐年上升，其中，密度 1 250 株·hm⁻² 的利润上升最快，

密度 667 株·hm⁻² 的利润也上升，但在第 8 年达到峰值；9 a 后 3 种初植密度的利润均呈下降趋势，其中，密度 883 株·hm⁻² 的利润始终高于密度 1 250、667 株·hm⁻²，密度 1 250 株·hm⁻² 的利润始终最低。3 种密度达最大净现值时，密度 883 株·hm⁻² 比密度 1 250 株·hm⁻² 高 29.7%，比密度 667 株·hm⁻² 高 28.5%。

3.4.3 内部收益率 从图 5 看出：密度 1 250 株·hm⁻² 达到轮伐期 7 a 时，3 种初植密度的内部收益率均达到最大值，而此时密度 883 株·hm⁻² 的内部收益率在 3 种密度中最高，达 50% 以上，密度 1 250 株·hm⁻² 的内部收益率最低。3 种造林密度内部收益率在 7 a 后逐渐降低，但不同生长阶段的降低速度有所区别，密度 883、667 株·hm⁻² 总体上呈现先加快后减

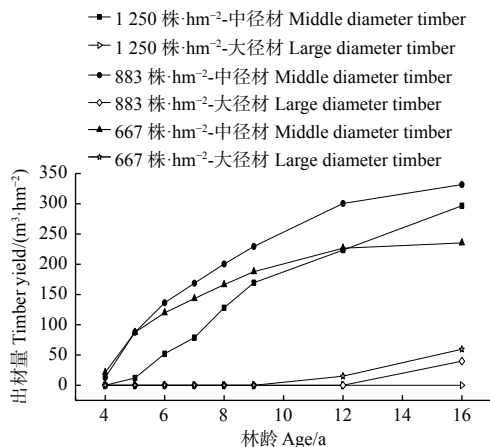


图3 3种初植密度不同林龄中、大径材出材量

Fig. 3 The stand volume of middle and large diameter timber between three initial spacing of different ages

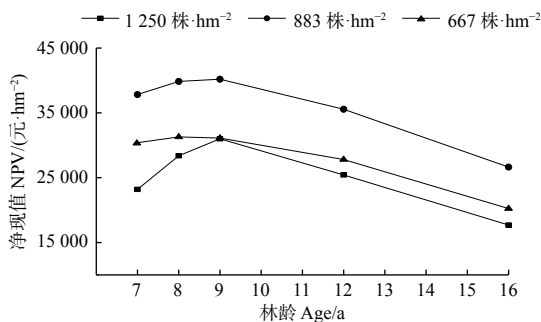


图4 3种初植密度各年度净现值

Fig. 4 The net present value of three initial spacing for each year

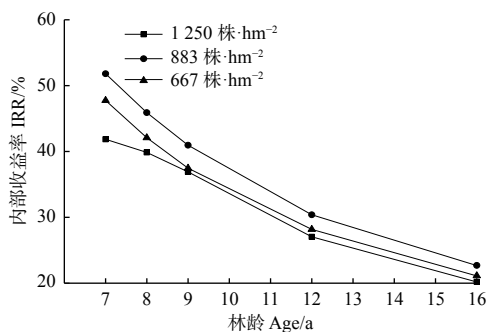


图5 3种初植密度的内部收益率

Fig. 5 The internal rate of return between three initial spacing for each year

慢的趋势。密度 667 株·hm⁻² 的内部收益率均大于密度 1250 株·hm⁻², 在 7~9 a 密度 1250 株·hm⁻² 与 667 株·hm⁻² 的内部收益率逐渐拉近, 之后差距基本无变化, 第 16 年时 3 种密度的最低内部收益率仍超过 20%。

4 讨论

4.1 林木生长与林分蓄积量

林木胸径是密度控制试验普遍关注的重要指标, 其受密度影响最大^[1]。研究结果发现, 初植密度与胸径呈负相关, 密度 1250 株·hm⁻² 的胸径与密度 883、667 株·hm⁻² 的均差异显著, 这种趋势在中、幼林阶段一直保持。有研究证实, 高种植密度会造成光照、水分及养分竞争加剧, 进而对桉树胸径生长产生不利影响^[27]。树高受造林密度的影响不大。

林分蓄积量主要由树高、胸径和造林株数共同决定。降低初植密度有助于促进单株立木生长, 提高单株材积, 但减少了林分活立木株数。造林密度所影响的林分蓄积变化量取决于减少活立木株数损失蓄积量与单位面积蓄积量增量的相对差值^[28]。本研究中, 幼林阶段总体上表现为蓄积量与造林密度正相关, 这也与桉树的速生丰产特点相契合, 该阶段与高密度相比, 低密度所减少的活立木蓄积量远超过因单株材积增大产生的单位面积蓄积量增量。

4.2 出材量及经济效益分析

胸径是材种划分的关键指标, 结合桉树大径材培育技术规程, 按胸径径阶划分小径材、中径材和大径材。本研究中, 中径材出材量逐年增加, 7 a 后中径材出材量均是 883 株·hm⁻² 最高, 第 12 年密度 667 株·hm⁻² 的样地最先出现大径材 (图 3), 说明造林密度对中、大径材的出材时间及出材比例有一定影响。吴东山等^[29] 发现, 培育较大径材的可能性随造林密度减小而增大。不同阶段桉树成材情况有所不同, 12 a 前有未成材立木和大量小径材立木, 蓄积量与出材量的关系不明显, 16 a 后大部分立木均已达到中径材, 因此, 出材量与蓄积量正相关。

木材经济价值取决于出材量、径级以及各材种的木材单价。最佳造林密度需要通过综合评价木材的经济价值来确定^[30]。蓄积量决定林分产量, 材种决定木材质量, 二者的综合效益最大化是确定合理密度的重要因素。本研究中, 密度 883 株·hm⁻² 的蓄积量在 8 a 时超过密度 1250 株·hm⁻², 经济效益与中径材出材量一直高于另外 2 种密度, 达到最大经济效益时, 密度 883 株·hm⁻² 的净现值比密度 1250 株·hm⁻² 的高 29.7%, 比密度 667 株·hm⁻² 的高 28.5%。不同时期木材价格存在一些波动, 该研究结果中的经济效益按当前的市场价格来计算, 本

文以期为指导桉树中、大径材培育及经济价值评估提供一些参考,对经营者提供一定帮助。

5 结论

3种造林密度对胸径、树高和蓄积量平均生长量的影响规律存在一定差异,不同密度间蓄积生长量差异不显著。4~16 a 生长阶段,胸径生长量受密度影响最明显,且密度 1 250 株·hm⁻² 与密度 883、667 株·hm⁻² 一直差异显著 ($p < 0.05$)。结合经济效益,并依据数量成熟年龄,密度 1 250 株·hm⁻² 的轮伐期为 7 a, 667、883 株·hm⁻² 均为 9 a。密度 1 250、883 株·hm⁻² 的净现值均在 9 a 时达到最大值,分别为 30 994、40 193 元·hm⁻², 密度 667 株·hm⁻² 在 8 a 时净现值最高,为 31 288 元·hm⁻², 对应的内部收益率分别为 37%、41%、42%。

密度 883 株·hm⁻² 的净现值和内部收益率始终最高,且远高于密度 1 250 株·hm⁻², 收益潜力较大,在 3 种造林密度中效果最佳,其次是密度 667 株·hm⁻², 密度 1 250 株·hm⁻² 的成本最高,造林效果最差。综合造林成本、胸径、树高和蓄积量,密度 883 株·hm⁻² 的造林效果最佳。

参考文献:

- [1] 温佐吾,谢双喜,周运超,等.造林密度对马尾松林分生长、木材造纸特性及经济效益的影响[J].林业科学,2000,36(S1):36-43.
- [2] 段爱国,张建国,何彩云,等.杉木人工林生物量变化规律的研究[J].林业科学研究,2005,18(2):125-132.
- [3] Farooq T H, Yan W, Chen X Y, et al. Dynamics of canopy development of *Cunninghamia lanceolata* mid-age plantation in relation to foliar nitrogen and soil quality influenced by stand density[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: 1-11.
- [4] Ali A, Dai D, Akhtar K, et al. Response of understory vegetation, tree regeneration, and soil quality to manipulated stand density in a *Pinus massoniana* plantation[J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 20: 1-15.
- [5] 王永琪,秦佳双,马姜明,等.广西马尾松人工林林下木本植物径级结构特征[J].广西科学,2020,27(6):1-8.
- [6] Wertz B, Bembenek M, Karaszewski Z, et al. Impact of stand density and tree social status on aboveground biomass allocation of Scots Pine *Pinus sylvestris* L.[J]. Forests, 2020, 11(7): 765-779.
- [7] Wang C S, Tang C, Hein S, et al. Branch development of five-year-old *Betula alnoides* plantations in response to planting density[J]. Forests, 2018, 9(1): 42-55.
- [8] 王云霓,高孝威,苏雅拉巴雅尔,等.林分密度和林龄对华北落叶松人工林生长特征的影响[J].内蒙古林业科技,2018,44(3):12-

- 16.
- [9] 李晓燕,段爱国,张建国,等.杉木幼龄期良种与密度控制的生长动态效应[J].江西农业大学学报,2020,42(4):778-787.
- [10] 孙洪刚,张建国,段爱国,等.杉木人工林自然整枝进程研究[J].林业科学研究,2014,27(5):626-630.
- [11] Lei J, Du H L, Duan A G, et al. Effect of stand density and soil layer on soil nutrients of a 37-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantation in Naxi, Sichuan Province, China[J]. Sustainability, 2019, 11(19): 5410-5439.
- [12] 湛红辉,丁贵杰,温恒辉,等.造林密度对马尾松林分生长与效益的影响研究[J].林业科学研究,2011,24(4):470-475.
- [13] 郭光智,段爱国,张建国,等.南亚热带杉木人工林材种结构长期立地与密度效应[J].林业科学研究,2020,33(1):35-43.
- [14] 孙洪刚,张建国,段爱国,等.杉木密度间伐试验林分断面面积生长效应[J].林业科学研究,2010,23(1):6-12.
- [15] 卢立华,农友,李华,等.保留密度对杉木人工林生长和生物量及经济效益的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):717-724.
- [16] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014-2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.
- [17] 马爱玉,苏世伟,何玲莉,等.中国木材节约代用的发展战略——基于历史和现状的考察[J].市场周刊:理论研究,2013(6):38-40.
- [18] 陈少雄,欧阳林男,王军锋,等.中国桉树大径材培育与利用[M].北京:中国林业出版社,2020.
- [19] 陈少雄,李志辉,李天会,等.不同初植密度的桉树人工林经济效益分析[J].林业科学研究,2008,21(1):1-6.
- [20] Emilio G B, Fabián C M, Norman M G, et al. Effect of planting density on the profitability of *Eucalyptus globulus* plantations[J]. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente, 2014, 20(1): 21-31.
- [21] 全国营造林标准化技术委员会. LY/T 2909—2017 桉树大径材培育技术规程[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [22] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,2006.
- [23] 欧建德,吴志庄,康永武,等.福建省雷大杉人工林生长模拟及其数量成熟研究[J].东北林业大学学报,2018,46(4):18-22.
- [24] 盛炜彤.不同密度杉木人工林林下植被发育与演替的定位研究[J].林业科学研究,2001,14(5):463-471.
- [25] Clutter J L, Fortson J C, Pienaar L V, et al. 用材林经理学—定量方法[M].范济洲,董乃均,于政中,等译.北京:中国林业出版社,1987.
- [26] 陈少雄,杨建林,周国福,等.不同栽培措施对尾巨桉生长的影响及经济效益分析[J].林业科学研究,1999,12(4):357-362.
- [27] Pachas A N A, Shelton H M, Lambrides C J, et al. Effect of tree density on competition between *Leucaena leucocephala* and *Chloris gayana* using a Nelder Wheel trial. I. aboveground interactions[J]. Crop and Pasture Science, 2018, 69(4): 419-429.
- [28] 王慧,郭晋平.我国森林抚育间伐研究进展[J].山西林业科技,2008(2):29-32.
- [29] 吴东山,贾婕,聂海泉,等.马尾松中幼林的密度效应[J].东北林业大学学报,2020,48(10):19-24.
- [30] 李方平,高岚.桉树人工林经济效益的影响因素分析[J].广东农业科学,2014,41(13):205-208.

Dynamic Analysis on Economic Benefit, Growth and Production of Eucalypt Plantations with Different Initial Densities

ZHANG Cheng^{1,2}, OUYANG Lin-nan¹, CHEN Shao-xiong¹

(1. China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China;

2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To study the economic benefit of *Eucalyptus* plantations with different initial planting densities by monitoring their growth. [Method] Three initial planting density treatments were tested, i.e. 1 250 tree·hm⁻², 883 tree·hm⁻² and 667 tree·hm⁻². The data of 16 years' growth were collected and analyzed to calculate the timber yield, mean annual increment (MAI), internal rate of return (IRR) and net present value (NPV). [Result] It is showed that the DBH of the plantation with initial planting density of 1 250 tree·hm⁻² was significantly different from that with the initial planting densities of 883 and 667 tree·hm⁻² in the growth process ($p < 0.05$). Meanwhile, there was no significant difference in stand volume among different initial planting densities ($p > 0.05$). The largest timber yield and MAI of middle diameter timber were at the plantation with initial planting density of 883 tree·hm⁻² in the range of 7th to 12th years and the 16th year, followed by the plantations with initial density of 667 tree·hm⁻² and 1 250 tree·hm⁻². At the 16th year, the timber yield of middle diameter timber of the plantation with initial planting density of 1 250 tree·hm⁻² exceeded that of the plantation with initial planting density of 667 tree·hm⁻². Large diameter timber began to appear at the plantation with initial planting density of 883 tree·hm⁻² at the 16th year. The harvesting rotations of the plantations with initial planting densities of 1 250, 883 and 667 tree·hm⁻² were 7, 9 and 9 years respectively. At the 9th year, The NPV of the plantations with initial planting densities of 1 250 and 883 tree·hm⁻² reached the peak, while that of 667 tree·hm⁻² was at the 8th year, The peak NPVs of the plantations with initial planting densities of 1 250, 883 and 667 tree·hm⁻² were 30 994, 40 193 and 31 288 CNY·hm⁻² and the peak IRRs were 37%, 41%, 42% respectively. [Conclusion] Overall, the plantation with initial planting density of 883 tree·hm⁻² has the highest NPV and IRR, as well as higher growth potential, followed by that with initial planting densities of 667 tree·hm⁻² and 1 250 tree·hm⁻².

Keywords: eucalypt; middle and large diameter timber; initial planting density; timber yield; economic benefit

(责任编辑:徐玉秀)