

不同造林密度对米老排人工林枝条发育的影响

王志海, 尹光天*, 杨锦昌, 覃国铭

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520)

摘要: [目的] 探究不同造林密度对米老排枝条发育的影响规律, 为米老排修枝培育无节良材提供理论依据。 [方法] 本研究以 8 年生米老排密度试验林为研究对象, 通过调查一级枝条的数量、基径、长度、分枝角、分枝高和方位角等观测数据, 分析 5 种造林密度对米老排林分 9 m 以下枝条发育以及空间分布的影响。 [结果] 表明: 米老排枯枝层的高度随密度的增大而增高, 枝条总量和枯枝数量受密度影响不显著, 林分枯枝率随密度的增大而增大, 活枝量与密度呈负相关; 米老排树干 9 m 以下枝条基径、枝长和分枝角均随密度的增大而减小; 水平方向上, 同一密度, 不同方位的枝条基径、枝长、分枝角和数量均随方位角的增大先减小后增大, 在光照条件较好的方位区间(0~90°或 316~360°)内达到最大值; 垂直方向上, 枝条基径、长度、数量随相对位置的升高先逐渐增大, 之后无显著变化。 [结论] 造林密度对米老排枝条大小的影响显著, 高密度(2 500 株·hm⁻²)可以抑制枝条的生长; 建议根据培育目的选择合适的造林密度, 并采用目标材种培育技术, 在幼龄期对优势木及亚优势木进行人工修枝, 提高木材质量。

关键词: 米老排; 造林密度; 分枝特征; 空间分布

中图分类号: S725.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)02-0078-09

枝条是树冠的重要组成部分, 具有支撑树冠结构的作用, 同时还有运输营养物质和水分的功能^[1]。树木的分枝结构和特征决定了树冠形状和树木生长的活力^[2], 进而影响到树木生长和林分蓄积^[3-4]; 另一方面, 枝条的大小和数量与树干节疤的类型和死节的多少密切相关, 从而在很大程度上决定着木材等级和质量^[5-8]。因此, 探究枝条分布特征和发育规律, 对于了解树木生长特性和材性质量至关重要, 也成为国内外研究的热点之一。

枝条分布特征和生长规律不仅与树木的生物学特性息息相关, 也与造林密度等经营措施密不可分^[2,9]。Sattler 等^[10]对白云杉(*Picea glauca* Voss.) 按照 1 m 区分段对枝条数量研究发现, 枝条数量符合 Poisson 分布; 周元满等^[11]分析了红海榄(*Rhizophora stylosa* Griff.) 天然林的分枝规律, 认为一级和二级枝条在水平上均遵从均匀分布。许多研究表明, 林分枝下高随着密度的增大而升高^[12-14], 高密度造林有利于自然整枝^[15]; Alcorn 等^[16]分析了 2 种桉树人工林枝条发育与密度的关联, 发现随造林

密度的增加, 枝条基径和分枝角变小而枝梗死亡率提高; Wang 等^[17]通过研究造林密度对西南桦(*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don) 枝条生长特性的影响, 发现活枝数量随密度的增加而减少, 最大的枝条直径与造林密度呈显著负相关。

米老排(*Mytilaria laosensis* Lec. l. c) 是金缕梅科(Hamamelidaceae) 壳菜果属常绿阔叶乔木, 具有生长速度快和干形通直圆满等特点^[18], 在林分改造、水源涵养和用材林建设等方面应用广泛; 然而, 由于米老排自然整枝能力偏低, 导致树干节疤数量较多, 进而影响木材的开发和利用。对于用材树种而言, 树干基部至树高 6~8 m 的木材部分占整个树木未来价值的 90%^[19], 树干下部的枝条发育对于林木早期生长和后期的木材利用都至关重要^[17]; 而密度控制是人工林经营的重要措施^[14], 高密度造林可以加速枝条死亡,

促进枝条快速愈合^[20-21]; 低密度有利于大径材的培育, 可以延长枝条存活时间^[22-23]。合理调节林分密度有利于提高人工林培育的效率和质量^[24]。

收稿日期: 2018-09-30 修回日期: 2018-12-22

基金项目: 院所基本科研业务费专项基金(CAFYBB2018SZ002)和广东省林业科技创新项目(2016KJCX004)

* 通讯作者: 尹光天, 研究员. 主要研究方向: 人工林定向培育. E-mail: yinguangtian@126.com

为此,本研究通过调查不同密度试验林 80 株标准木枝条总量、枯枝存量和活枝量,实测树干 9 m 以下一级枝条的基径大小、长度、分枝角等指标,探究不同造林密度对米老排枝条发育的影响效应,为培育米老排无节良材和优质用材林提供理论依据。

1 试验区概况

试验地位于广东省云浮市郁南县西江林场(23°07' N, 111°51' E)。由于地形细微的变化,坡向多为北坡、东北坡或西北坡,海拔 150~270 m;该区域属于南亚热带季风气候,年均气温 21.2℃,年均降水量 1 600 mm,年均湿度 82%,土壤为赤红壤,pH 值为 4.0,有机质含量 30.11 g·kg⁻¹,全氮 1.23 g·kg⁻¹,全磷 0.16 g·kg⁻¹,全钾 18.12 g·kg⁻¹[14]。

表 1 8 年生米老排密度试验林的基本特征

Table 1 Stand characteristics of 8-year-old *M. laosensis* plantation with different planting densities

株行距 Spacing/(m×m)	造林密度/(株·hm ⁻²) Planting density	保存率/% Survival rate	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average tree H	优势高/m Advantage tree H	活枝高/m Height under living branch
4×4	625	98.5	17.1	13.9	15.9	4.2
3×4	833	97.0	16.6	13.6	15.8	5.3
3×3	1 111	95.4	15.4	13.6	15.7	6.8
2×3	1 667	95.4	14.1	13.1	15.9	7.9
2×2	2 500	90.2	13.0	13.1	15.4	8.1

2.2 数据采集

根据林分平均胸径和平均树高,在每个小区选择 4 株标准木(远离林缘),20 个小区共 80 株标准木;采用活体实测的方法,于 2018 年 3—4 月对所有标准木进行测量;在每株标准木树干 9 m 高的范围内,以 1 m 为区分段,将区分段内所有一级分枝从低到高逐一编号,记录每个枝条的状态(枯枝或活枝),测量每个枝条的实际高度,并用游标卡尺测量枝条基径,卷尺测量枝长,角度尺测量分枝角,用罗盘仪测量枝条方位角(正北方向为 0°,将方位分为 8 个区间,对应的方位角分别为 0°~45°、46°~90°、91°~135°、136°~180°、181°~225°、226°~270°、271°~315°和 316°~360°);对于树干 9 m 高以上部分,因量测难度大只计算枯枝和活枝数量。

2.3 数据处理

共采集到 80 株样木 5 033 个一级分枝的基径、长度、方位角、分枝角、分枝高和枝条状态等数据,利用 Excel 软件对数据进行初步处理,计算单株林木枝条总量、活枝数量、枯枝存量和枯枝率(枯枝数量与枝条总量的比值),统计不同密度样木 9 m 以下各

试验林营建于 2010 年 3 月,材料来源于同一种源培育的实生苗;采用随机区组试验设计,共设置 5 个造林密度,即 2 500(株行距 2 m×2 m)、1 667(2 m×3 m)、1 111(3 m×3 m)、833(3 m×4 m)和 625(4 m×4 m)株·hm⁻²;每处理 4 次重复,共 20 个小区,每小区种植 120 株左右,其面积在 500 m² 以上,每个小区四周设置 1~2 行米老排作为保护行。

2 研究方法

2.1 样地调查

于 2018 年 1 月对米老排密度试验林内的林木进行每木检尺,调查胸径、树高和枝下高等生长数据,不同造林密度的米老排林分基本特征见表 1。

方位区间和垂直区间的枝条数量;利用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计,分析不同造林密度对林分枝下高(活枝高和枯枝高)和树干枝条总量、活枝数量、枯枝量与枯枝率的影响,由于树干 9 m 以上枝条数量为观测数值,因此,除对单株林木枝条总量的分析以外,再对树干 9 m 以上和 9 m 以下的枝条数量进行分析;同时分析树干 9 m 高以下的分枝形态(枝条基径、枝长和分枝角)和空间(水平和垂直)分布规律的影响,经双因素方差分析得知密度与方位之间、密度与垂直高度之间不存在交互作用,因此,利用单因素方差分析和 Duncan 多重比较进行差异显著性分析,用 prism 软件制图。

3 结果与分析

3.1 不同密度林分枝下高和枝条数量

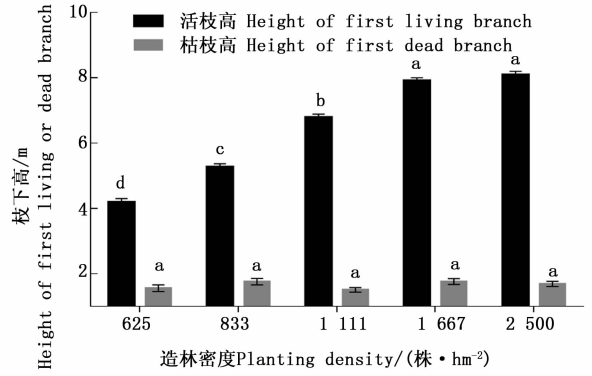
3.1.1 枝下高 从图 1 可看出:密度对米老排枯枝高的影响不显著($P > 0.05$),第一枯枝高均出现在 1~2 m 内,但对活枝高的影响极显著($P < 0.01$);随着密度的增大,活枝高逐步递增,不同密度下林木的活枝高变化范围为 4.2~8.2 m,密度 625 株·hm⁻²

的活枝高约为 $2\ 500\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的一半,这表明随着密度的逐渐增大,枯枝层的高度越高。

3.1.2 枝条数量 表2表明:密度对米老排树干枝条总量和枯枝数量影响不显著($P > 0.05$),但枝条总量随密度的增大呈减少的趋势;密度对活枝数量影响极显著($P < 0.01$),随着密度的增大,活枝数量不断减少,最低密度的活枝数量是最高密度的1.6倍;枯枝率在高密度($2\ 500\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$)时达到最大值72.86%,并伴随着林分密度的减小,在密度为 $625\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最小值。这说明随着密度的增大,林分郁闭度逐步提高,林内光照减弱,枯枝层的高度相对较高,导致活枝数量减少。

3.2 不同密度米老排的分枝特征

3.2.1 基径和枝长 图2、3表明:米老排树干9 m以下一级枝条基径和长度均随密度的增大总体呈减小的趋势,且这2个指标均在 $833\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 密度时达到最大值,分别为 $19.78\ \text{mm}$ 和 $1.57\ \text{m}$,在 $2\ 500$



注:图中不同小写字母表示处理间的差异极显著($P < 0.01$),下同。

Note: The figures in the table were average \pm standard error. Different lowercase letters in the same line indicated significant differences among different densities at 0.01 level. The same below.

图1 造林密度对米老排林分枝下高的影响

Fig. 1 Effect of planting densities on height of first living or dead branch of *M. laosensis*

表2 造林密度对米老排枝条数量和枯枝率的影响

Table 2 Effects of planting densities on branch number and dead branch rate of *M. laosensis* plantation

项目 Items	造林密度 Planting density/(tree \cdot hm ⁻²)					
	625	833	1 111	1 667	2 500	
总量 Total	113 \pm 4.2a	106 \pm 6.0a	108 \pm 4.4a	102 \pm 3.6a	101 \pm 3.7a	
枝条数量 Branch number	9 m 以下 Below 9 meters	73 \pm 3.4a	63 \pm 4.4a	65 \pm 3.4a	64 \pm 3.3a	66 \pm 3.2a
	9 m 以上 More than 9 meters	40 \pm 2.5a	43 \pm 3.3a	43 \pm 1.8a	38 \pm 1.7a	35 \pm 2.5a
	枯枝 Dead	71 \pm 4.1a	63 \pm 4.8a	73 \pm 4.1a	72 \pm 3.9a	74 \pm 3.5a
	活枝 Live	43 \pm 2.1A	43 \pm 3.1A	35 \pm 1.8AB	30 \pm 1.3B	27 \pm 1.3B
枯枝率/% Dead branch rate	61.86 \pm 2.18B	59.74 \pm 2.41B	67.06 \pm 1.73AB	69.92 \pm 1.82A	72.86 \pm 1.40A	

注:数据为平均值 \pm 标准误差,同行不同大写字母表示处理间差异极显著($P < 0.01$),同行不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

Notes: The figures in the table were average \pm standard error. Different capital letters in the same line indicated significant differences among different orientation at 0.01 level, and different lowercase letters in the same line indicated significant differences among different orientation at 0.05 level. The same below.

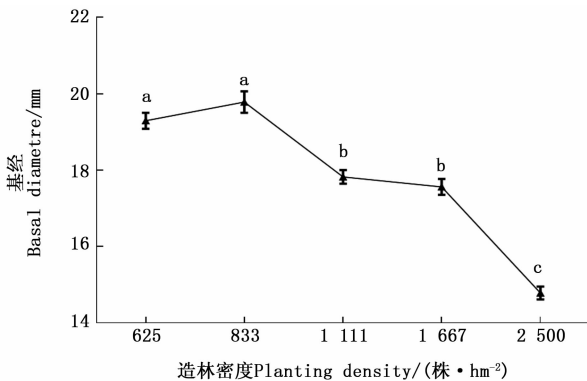


图2 造林密度对米老排林枝条基径的影响

Fig. 2 Effect of planting densities on the basal diameter of branch of *M. laosensis*

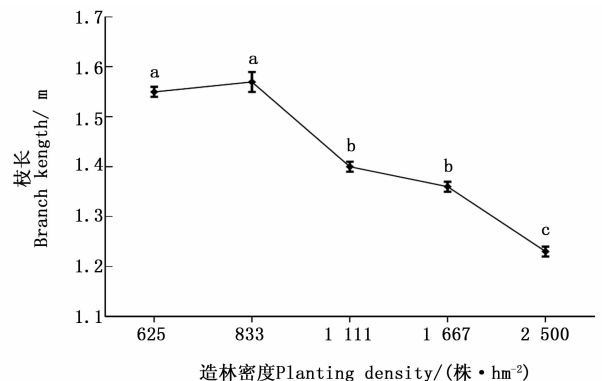


图3 造林密度对米老排林枝条长度的影响

Fig. 3 Effect of planting densities on the branch length of *M. laosensis*

株·hm⁻²密度时降为最小值,分别为14.78 mm和1.23 m,不同密度间的枝条基径和枝长的极差分别为5.0 mm和0.34 m。方差分析结果显示:不同密度之间的基径、枝长达到极显著差异($P < 0.01$) (图

2、3),但差异体现于低密度(625、833株·hm⁻²)、中密度(1 111、1 667株·hm⁻²)和高(2 500株·hm⁻²)密度间;枝条基径(x)和枝长(y)呈明显的线性相关(图4),可用 $y = a + bx$ 表示。

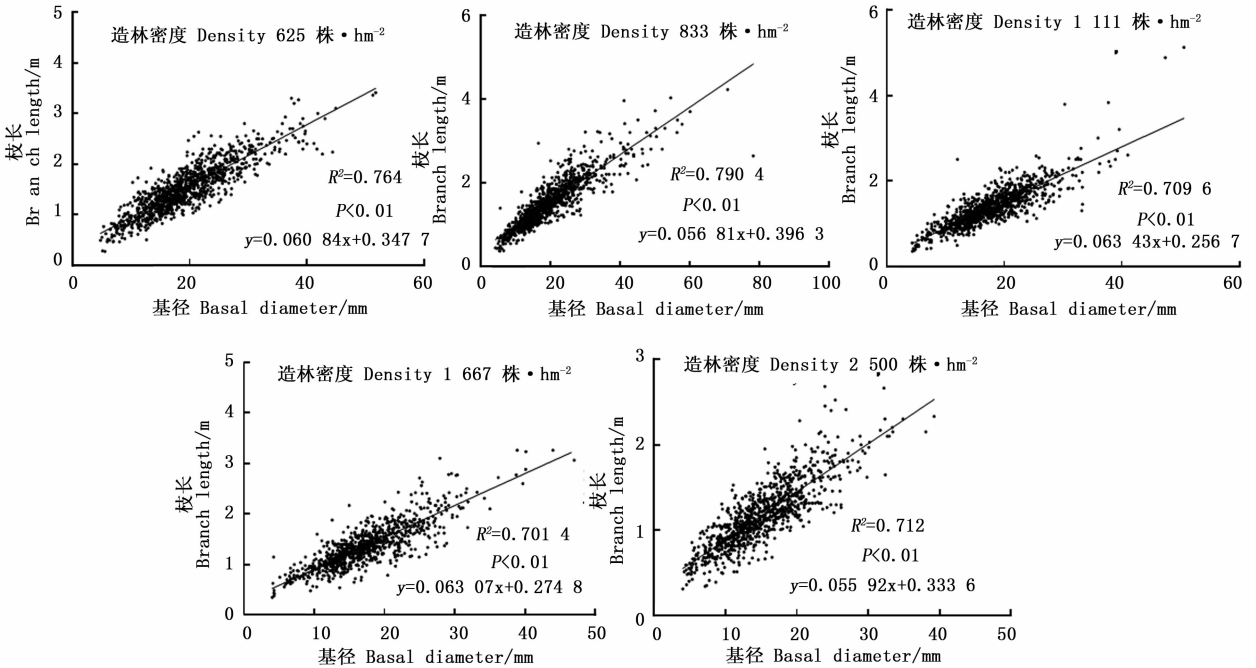


图4 标准木枝长(y)与基径(x)的回归分析

Fig. 4 The regression analysis between the branch length and branch diameter of standard trees

3.2.2 分枝角 图5表明:分枝角随着密度的增大呈明显减小的趋势($P < 0.01$),不同密度的分枝角变化范围大致为52°~57°,其中,625和833株·hm⁻²密度间差异不显著,但均显著大于其他3种密度。这可能是因为密度越大,枝条的水平生长空间变小、竞争加剧导致。

靠近正北方向(方位角为0°)的枝条比其他方位的枝条基径较大、枝长较长、分枝角较大、枝条数量较多(表3)。各密度的枝条基径和枝长均随方位角的增大先减小后增大,大部分都在方位区间为0°~45°或46°~90°时达到最大值,不同密度基径最大值分别为21.3、21.1、19.4、19.3、16.5 mm,枝长最大值分别为1.68、1.63、1.49、1.51、1.24 m;基径和枝长均随密度的增大呈现减小的趋势,枝条基径和枝长在方位区间136°~180°或181°~225°内值最小,均在正南方向附近。

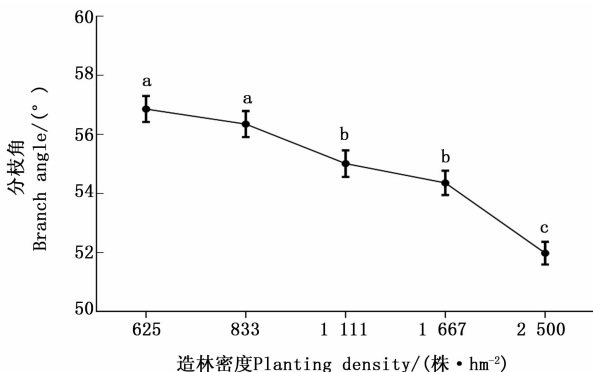


图5 造林密度对米老排分枝角的影响

Fig. 5 Effect of planting densities on the branch angle of *M. laosensis*

3.3 不同密度米老排枝条的空间分布

3.3.1 水平分布 通过分析同一密度不同方位的枝条基径、长度、分枝角和枝条数量分布规律得知:

从正北方向(方位角为0°)开始,各密度的分枝角先随方位角的增大而减小,在方位区间136°~180°或181°~225°分枝角最小;之后,分枝角随方位角的增大而增大,在方位区间0°~45°或316°~360°内达到最大值。不同方位的枝条数量变化范围大致为7~11个,各个密度均在方位角区间为0°~45°时枝条数量最多。

3.3.2 垂直分布 各密度在树干1 m高以下几乎无枝条;随着高度的不断升高,各密度枝条数量、枝条基径和枝长均先逐渐增大后趋于稳定,分枝角则逐渐减小(表4)。在1~2 m高度区间枝条数量最

表3 不同密度米老排枝条水平分布规律
Table 3 The horizontal distribution of branch of *M. laosensis*plantation with different planting densities

分枝特征 Branch characteristics	造林密度/ (株·hm ⁻²) Densities	方位区间 Azimuth range/(°)							
		0~45	46~90	91~135	136~180	181~225	226~270	271~315	316~360
基径/mm Basal diameter	625	21.3±0.57A	21.0±0.64AB	19.6±0.60ABC	18.2±0.57C	17.3±0.51C	18.1±0.52C	18.9±0.62BC	18.9±0.58BC
	833	20.9±0.80ab	21.1±0.79a	21.1±0.91a	18.5±0.85bcd	17.9±0.66d	18.1±0.68cd	20.0±0.73abcd	20.4±0.83abc
	1111	19.4±0.45A	19.2±0.51A	17.0±0.54BCD	15.8±0.45D	16.8±0.65BCD	16.3±0.44CD	18.2±0.48ABC	18.7±0.53AB
	1667	19.3±0.63A	18.7±0.58AB	18.6±0.61AB	15.9±0.58C	16.0±0.53C	16.8±0.50BC	16.2±0.47C	18.2±0.67ABC
	2500	16.4±0.44A	16.5±0.52A	15.1±0.44AB	13.6±0.46BCD	12.8±0.48D	13.1±0.44CD	14.9±0.49ABC	15.1±0.53AB
枝长/m Branch length	625	1.68±0.04A	1.67±0.05A	1.51±0.04B	1.44±0.04B	1.39±0.04B	1.4±0.04B	1.49±0.04B	1.51±0.04B
	833	1.52±0.05ABC	1.60±0.05ABC	1.63±0.06A	1.42±0.05BC	1.40±0.04C	1.39±0.05C	1.53±0.05ABC	1.62±0.06AB
	1111	1.49±0.03A	1.49±0.04A	1.34±0.04ABC	1.26±0.03C	1.33±0.06BC	1.26±0.03C	1.40±0.03ABC	1.44±0.04AB
	1667	1.51±0.05A	1.48±0.04AB	1.40±0.04ABC	1.30±0.05C	1.35±0.05ABC	1.32±0.04BC	1.28±0.03C	1.40±0.05ABC
	2500	1.23±0.03AB	1.24±0.03A	1.18±0.03ABC	1.10±0.03BC	1.06±0.03C	1.08±0.03C	1.15±0.04ABC	1.16±0.04ABC
分枝角/° Branch angle	625	63.9±1.04AB	56.0±0.82C	50.5±1.23D	44.5±1.18E	46.7±1.09DE	49.8±1.10D	60.6±1.05B	65.6±1.07A
	833	63.1±1.21AB	59.8±1.28AB	51.6±1.29DE	49.5±1.45DE	47.3±1.16E	54.2±1.14CD	58.8±1.24BC	64.4±1.40A
	1111	61.1±1.07A	53.9±1.36B	46.3±1.23C	44.2±1.38C	44.1±1.35C	52.1±1.24B	59.9±1.06A	61.4±1.17A
	1667	61.5±0.90A	57.2±1.14AB	51.3±1.28C	47.9±1.33CD	46.1±1.10D	51.8±1.22C	56.5±1.21B	59.1±1.14AB
	2500	58.7±1.06AB	52.7±1.06CD	46.7±1.14EF	43.9±0.97F	45.7±1.27EF	49.9±1.07DE	55.6±1.19BC	61.4±1.04A
枝条数量/个 Branch numbers	625	11.5±0.62A	9.2±0.97AB	8.2±0.55B	7.6±0.66B	8.2±0.71B	7.9±0.43B	9.8±0.74AB	10.4±0.86AB
	833	10.3±0.65A	9.0±0.77AB	7.4±0.74AB	6.2±0.66B	7.3±0.62B	7.4±1.05AB	8.7±0.55AB	7.2±0.67B
	1111	10.7±0.72A	8.1±0.72AB	7.1±0.79B	6.8±0.72B	6.8±0.34B	7.9±0.82AB	9.1±0.57AB	9.3±0.72AB
	1667	9.1±0.86a	8.7±0.80a	8.0±0.52a	6.6±0.65a	6.9±0.59a	6.9±0.60a	8.7±0.84a	8.6±0.49a
	2500	10.4±0.60A	9.3±0.87AB	6.9±0.57B	8.0±0.70AB	7.1±0.65B	8.0±0.67AB	8.0±0.56AB	8.4±0.44AB

注:数据为平均值±标准误差,同行不同大写字母表示方位间差异极显著($P<0.01$),同行不同小写字母表示方位间差异显著($P<0.05$)。

Notes: The figures in the table were average ± standard error. Different capital letters in the same line indicated significant differences among different orientation at 0.01 level, and different lowercase letters in the same line indicated significant differences among different orientation at 0.05 level. The same below.

表4 不同密度米老排枝条的垂直分布规律
Table 4 The vertical distribution of branch of *M. laosensis*plantation with different planting densities

分枝特征 Branch characteristics	造林密度/ (株·hm ⁻²) Densities	高度区间 Height range/m							
		1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9
基径/mm Basal diameter	625	17.0 ± 0.75BC	16.5 ± 0.58C	18.2 ± 0.48ABC	19.2 ± 0.55AB	20.0 ± 0.54A	20.4 ± 0.61A	20.0 ± 0.54A	20.1 ± 0.58A
	833	15.8 ± 1.08C	16.4 ± 0.70C	18.6 ± 0.68ABC	17.0 ± 0.59BC	20.2 ± 0.59AB	21.7 ± 0.88A	21.7 ± 0.82A	22.0 ± 0.77A
	1111	15.3 ± 0.51D	16.4 ± 0.51CD	16.4 ± 0.50CD	16.9 ± 0.45BCD	18.2 ± 0.41ABC	18.6 ± 0.46AB	18.8 ± 0.48AB	19.2 ± 0.53A
	1667	17.4 ± 0.84ABCE	16.0 ± 0.59CD	16.7 ± 0.47BCD	15.6 ± 0.53D	17.3 ± 0.43ABC	18.8 ± 0.57AB	18.3 ± 0.52ABC	19.3 ± 0.74A
	2500	14.7 ± 0.73abc	14.2 ± 0.44bc	15.4 ± 0.50ab	13.5 ± 0.41c	14.3 ± 0.42abc	14.7 ± 0.43abc	15.0 ± 0.44abc	15.9 ± 0.55a
枝长/m Branch length	625	1.39 ± 0.06BC	1.37 ± 0.04C	1.48 ± 0.04ABC	1.54 ± 0.04ABC	1.56 ± 0.04AB	1.58 ± 0.04A	1.56 ± 0.04AB	1.53 ± 0.04ABC
	833	1.26 ± 0.07D	1.35 ± 0.05BCD	1.49 ± 0.05ABC	1.32 ± 0.04CD	1.56 ± 0.04AB	1.64 ± 0.05A	1.62 ± 0.05A	1.60 ± 0.05A
	1111	1.18 ± 0.05C	1.29 ± 0.04BC	1.29 ± 0.03BC	1.34 ± 0.03ABC	1.40 ± 0.03AB	1.44 ± 0.04AB	1.48 ± 0.04A	1.47 ± 0.04A
	1667	1.33 ± 0.06BC	1.30 ± 0.05BC	1.39 ± 0.03ABC	1.23 ± 0.03C	1.32 ± 0.03BC	1.46 ± 0.04AB	1.42 ± 0.05ABC	1.55 ± 0.05A
	2500	1.09 ± 0.05B	1.16 ± 0.04AB	1.25 ± 0.04A	1.10 ± 0.03B	1.11 ± 0.03B	1.15 ± 0.03AB	1.12 ± 0.03AB	1.21 ± 0.03AB
分枝角/(°) Branch angle	625	70.6 ± 2.33A	67.5 ± 1.60A	61.5 ± 1.40B	56.5 ± 1.25C	52.1 ± 0.98CD	53.1 ± 0.99CD	49.9 ± 0.76D	52.0 ± 0.97CD
	833	74.7 ± 2.17A	66.1 ± 1.91B	63.1 ± 1.75B	61.3 ± 1.36BC	56.5 ± 1.13CD	52.2 ± 0.97DE	52.7 ± 0.99DE	49.9 ± 0.90E
	1111	66.9 ± 2.90A	62.3 ± 1.87A	56.5 ± 1.39B	54.4 ± 1.40BC	54.1 ± 1.20BC	51.6 ± 1.11BC	49.2 ± 1.02C	51.1 ± 1.04BC
	1667	62.7 ± 2.36A	60.4 ± 1.53AB	52.9 ± 1.20C	56.6 ± 1.27BC	54.2 ± 1.18C	52.3 ± 1.10C	52.8 ± 1.03C	52.0 ± 0.98C
	2500	62.6 ± 2.51A	57.6 ± 1.38B	53.4 ± 1.33BC	51.7 ± 1.15C	51.2 ± 1.06C	51.4 ± 1.14C	49.7 ± 1.06C	50.5 ± 0.96C
枝条数量/个 Branch numbers	625	3.2 ± 0.57C	7.1 ± 0.77B	7.9 ± 0.82B	8.0 ± 0.70B	11.2 ± 0.54A	10.9 ± 0.97A	12.2 ± 0.69A	12.3 ± 0.85A
	833	2.1 ± 0.49C	6.3 ± 0.80B	6.6 ± 0.68B	8.1 ± 1.02AB	10.9 ± 0.89A	9.2 ± 0.67AB	10.0 ± 1.00A	10.4 ± 0.89A
	1111	3.4 ± 0.54D	6.3 ± 0.45C	7.7 ± 0.82BC	7.5 ± 0.47BC	9.1 ± 0.71AB	9.6 ± 0.88AB	10.6 ± 1.00A	11.4 ± 0.58A
	1667	3.0 ± 0.70D	6.0 ± 0.62C	8.6 ± 0.71ABC	7.2 ± 0.89BC	10.8 ± 0.89A	7.6 ± 0.60BC	11.1 ± 0.89A	9.4 ± 1.02AB
	2500	2.9 ± 0.65D	6.4 ± 0.64C	8.1 ± 0.82ABC	7.9 ± 0.91BC	9.6 ± 0.48AB	10.4 ± 1.00AB	9.5 ± 0.69ABC	11.2 ± 1.03A

注:数据为平均值±标准误差,同行不同大写字母表示高度间差异极显著(P<0.01),同行不同小写字母表示高度间差异显著(P<0.05)。

Note: The figures in the table were average ± standard error. Different capital letters in the same line indicated significant differences among different height at 0.01 level, and different lowercase letters in the same line indicated significant differences among different height at 0.05 level. The same below.

少,在7~8 m 区间枝条数量达到最大值,其变化范围为3~12个,自高度7 m 之后枝条数量无显著变化。总体上,林木中上部的枝条基径和枝长较下部枝条大;自高度5 m 开始,不同密度处理的枝条基径和枝长变化较小,并在8 m 后达到最大值之后趋于稳定,其基径最大值分别为20.1、22.0、19.2、19.3、15.9 mm,枝长最大值分别为1.58、1.64、1.48、1.55、1.25 m。各密度分枝角在0~2 m 区间内最大,随着垂直高度的上升逐渐减小,在7~9 m 区间内减至最小值;各密度平均分枝角最小值相差不大,不同垂直高度的分枝角的极值幅度为10.7°~24.8°,其中,低密度(625和833株·hm⁻²)的分枝角在垂直方向上变化较小,平均值变化范围约为50°~63°,中密度和高密度(1 111、1 667和2 500株·hm⁻²)的分枝角在垂直方向上的变化幅度较大,最大值与最小值相差约18°~25°。

4 讨论

4.1 密度与枝下高及枝条数量

不同密度对米老排枯枝高的影响不显著,但林木活枝高随密度的增大而升高,这与黄宝灵等^[24]对尾叶桉(*Eucalyptus tereticornis* Smith.)和李洁等^[25]对银合欢(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.)得出的结论一致。米老排的自然整枝能力较低,大多数枯枝虽然干枯,但并未凋落,因此,活枝高这一单一指标不一定能表示自然整枝能力的高低。单株林木枝条总量和枯枝存量受密度的影响不显著,这与Alcorn等^[16]对2个桉树种的研究结论部分一致,表明米老排枝条发育主要受基因控制,与环境因子关联不大;而活枝数量与密度呈显著负相关,表明林分环境明显影响活枝的保存,这与Wang等^[17,26]对西南桦以及Mäkinen等^[27]对欧洲云杉(*Picea abies* (L.) Karst.)的研究结果一致。

4.2 密度与分枝形态

米老排枝条的基径和枝长呈现随密度的增大逐渐减小的趋势,这与Wang^[5]对西南桦、Gort等^[28]对欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)和Alcorn等^[16]对4年生大叶桉(*Eucalyptus robusta* Smith)的研究结果基本一致。分枝角受林分密度的影响较大,呈随密度的减小逐渐变大的趋势,这可能是由于密度的减小,导致枝条的生长空间变大,水平竞争力减小,枝条与树干形成的夹角变大,更有利于枝叶吸收阳光。这与Gort^[28]和Wang^[26]的研究结果不一致,Gort对欧洲

赤松分枝角的研究表明,分枝角受基因控制,与密度无关,可能是不同树种的遗传特性及与环境的相互作用所致;Wang的研究结果表明,西南桦的分枝角虽有随密度减小而增大的趋势,但这种差异并不显著,可能是由于研究对象是5年生的西南桦优势木,受光照的制约作用相对标准木的弱,后续工作中将继续探讨不同造林密度对米老排优势木分枝特征的影响。

4.3 密度与枝条的空间分布

水平方向上,同一密度、不同方位的米老排阳面的枝条基径、枝长和分枝角的大小较阴面的大,在方位角0°~360°范围内,随方位角的逐渐增大,枝条数量呈先减少后增多的趋势,这与肖锐等^[29]对樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.)的研究结果一致。这些分枝指标的最大值一般在方位角为0°~45°区间内达到最大值,但有些密度的最大值出现在方位角316°~360°区间内,这是由于试验地的坡向并不是绝对的北坡,随着地形的细微变化,坡向也有细微的改变,其中,有东北坡转变为西北坡的缓慢过程。

垂直方向上,枝条数量随树干垂直高度的升高逐渐增多并趋于稳定,这与刘兆刚^[30]对樟子松的研究结果部分一致,这是冠层以下,米老排树干下部的枝条自然凋落的数量较多所致。枝条基径和枝长随高度的升高逐渐增大,与Wang^[26]对西南桦的研究结果一致。分枝角随高度的升高而减小,这与Weiskittel等^[31]对冷杉(*Abies fabri* (Mast.) Craib)的研究结果一致。

米老排树冠枝叶浓密,处于树冠下部的枝条容易失去营养生长空间形成枯枝,且不易脱落。大量研究表明,枯枝对木材质量的影响较大^[32],枯枝脱落留下的残桩随着形成层的不断生长,慢慢被包裹形成死节,死节容易脱落,从而影响美观,降低木材质量^[9,33];低密度有利于培育米老排中大径材^[34],高密度可以抑制枝条直径的生长;相关研究表明,节疤大小与枝条直径显著正相关^[32];因此,建议根据培育目的,调节密度大小,并及时采取人工修枝措施,对米老排人工林进行管理。修枝时间适宜在枝条较小、生长速度较快的幼龄期进行,伤口愈合速度快,且不易感染^[35]。由于人工修枝成本较高,建议采取目标材种培育技术,对米老排优势木及亚优势木进行修枝,培育大径级和中径级的无节材,在提高米老排木材价值的同时,最大限度的节约成本。

5 结论

通过对5种造林密度米老排人工林枝条发育规律的分析,发现不同密度对米老排枯枝高的影响不显著,米老排林活枝高与密度呈显著正相关,随密度的增大,其变化范围为4.18~8.08 m。米老排单株枝条总量和枯枝数量不受密度控制,但枯枝率随密度的增大而增大,活枝量与密度呈负相关。因此,不能通过控制枝条数量的方法抑制节疤形成,可以通过控制枝条大小,进而控制节疤大小。

米老排树干9 m以下枝条基径、枝长和分枝角均随密度的增大呈显著下降趋势,分枝角的变化范围大致为 $52^{\circ}\sim 57^{\circ}$ 。此外,在水平方向上,同一密度、不同方位的枝条基径、枝长、分枝角和数量均随方位角的增大先减小后增大,在光照条件较好的方位区间($0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 或 $316^{\circ}\sim 360^{\circ}$)内达到最大值。垂直方向上,枝条数量随相对位置的升高先逐渐增多,之后无显著变化;枝条基径和枝长随高度的升高先逐渐增大,在8 m达到最大值后趋于稳定;分枝角随垂直高度的升高逐渐减小。根据本研究结论,应根据培育目的选择适宜的造林密度,或通过间伐调整林分密度,进而控制枝条大小。在幼龄期对米老排优势木及亚优势木进行人工修枝,培育目标材种,节约成本,提高木材质量和市场价值。

参考文献:

- [1] 刘兆刚. 樟子松人工林树冠动态三维图形模拟技术的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2007.
- [2] 董玉峰, 姜岳忠, 张明哲, 等. 不同杨树品种的分枝及与生长和干形的关联[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(2): 34-38.
- [3] 贾玮玮. 樟子松人工林枝条生长及节子大小预测模型的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2006.
- [4] 王小青, 刘杏娥, 任海青. 树冠特征对小黑杨木材性质和生长量的影响研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(6): 801-806.
- [5] Wang C S, Hein S, Zhao Z G, et al. Branch occlusion and discoloration of *Betula alnoides*, under artificial and natural pruning[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 375: 200-210.
- [6] Hein S. Knot attributes and occlusion of naturally pruned branches of *Fagus sylvatica* [J]. Forest Ecology & Management, 2008, 256(12): 2046-2057.
- [7] 陈东升, 孙晓梅, 李凤日, 等. 落叶松人工林节子内部特征变化规律研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(2): 16-22.
- [8] 郝建, 孟明君, 黄德卫, 等. 格木人工林节子的分布特征及预测模型[J]. 南京林业大学学报, 2017, 41(3): 100-104.
- [9] 王烁, 董利虎, 李凤日. 人工长白落叶松枝条存活模型[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(1): 57-66.
- [10] Sattler DF, Comeau PG, Achim A. Branch models for whitespruce (*Piceaglauca*(Moench)Voss) in naturally regenerated stands[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 325: 74-89.
- [11] 周元满, 黄剑坚, 聂页, 等. 红海榄天然林的分枝规律[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(2): 14-21.
- [12] 章志都, 徐程扬, 蔡宝军, 等. 林分密度对山桃树冠结构的影响研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 187-192.
- [13] 贾亚运, 何宗明, 周丽丽, 等. 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1177-1181.
- [14] 张阳锋, 尹光天, 杨锦昌, 等. 造林密度对米老排凋落物量及动态的影响[J]. 植物研究, 2017, 37(5): 768-777.
- [15] 孙洪刚, 张建国, 段爱国. 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.
- [16] Alcorn P J, Pyttel P, Bausch J, et al. Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 252(1): 41-51.
- [17] 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, 42. doi:10.3390/f9010042.
- [18] 刘恩, 刘世荣. 南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5103-5109.
- [19] Kint, V, Hein, S, Campioli M, et al. Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(11): 2023-2034.
- [20] Kicki Johansson. Effects of initial spacing on the stem and branch properties and graded quality of *Picea abies* (L.) karst[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1992, 7(1-4): 503-514.
- [21] Makinen H. Effect of stand density on radial growth of branches of Scots pine in southern and central Finland[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1999, 29(8): 1216-1224.
- [22] Mäkinen H. Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland[J]. Trees, 2002, 16(4-5): 346-353.
- [23] 王鹏程, 涂炳坤, 沈宝仙, 等. 杨树人工用材林栽培模式研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006, 30(6): 73-78.
- [24] 黄宝灵, 吕成群, 蒙钰钗, 等. 不同造林密度对尾叶桉生长、产量及材性影响的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(1): 81-90.
- [25] 李洁, 列志勇, 许松葵, 等. 不同密度的银合欢林生长分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(6): 70-74.
- [26] Wang C S, Zeng J, Hein S, et al. Crown and branch attributes of mid-aged *Betula alnoides* plantations in response to planting density[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2016, 32(8): 679-687.
- [27] Mäkinen H, Hein S. Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce[J]. European Journal of Forest Research, 2006, 125(3): 239-248.
- [28] Gort J, Zubizarreta-Gerendiain A, Peltola H, et al. Differences in branch characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) genetic entries grown at different spacing[J]. Annals of Forest Science, 2010, 67(7): 705-705.

- [29] 肖 锐,李凤日,刘兆刚. 樟子松人工林分枝结构的分析[J]. 植物研究, 2006,26(4):490-496.
- [30] 刘兆刚,李凤日. 樟子松人工林树冠内一级枝条空间的分布规律[J]. 林业科学,2007,43(10):19-27.
- [31] Weiskittel A R, Maguire D A, Monserud R A. Modeling crown structural responses to competing vegetation control, thinning, fertilization, and Swiss needle cast in coastal Douglas-fir of the Pacific Northwest, USA[J]. Forest Ecology & Management, 2007, 245(1):96-109.
- [32] 王春胜. 西南桦人工中幼林密度效应和修枝研究[M]. 北京:中国林业科学研究院, 2015:38-40.
- [33] 张智昌,李凤日,陈东升. 落叶松人工林节子不同生长阶段年轮数量的研究[J]. 植物研究, 2010, 30(3):320-324.
- [34] 张阳锋,尹光天,杨锦昌,等. 造林密度对米老排人工林初期生长的影响[J]. 林业科学研究,2018,31(4):83-89.
- [35] 肖祥希. 修枝对福建柏林分生长及无节材形成的影响[J]. 林业科学研究, 2005, 18(1):22-26.

Effects of Planting Density on Branch Development of *Mytilaria laosensis* Plantations

WANG Zhi-hai, YIN Guang-tian, YANG Jin-chang, QIN Guo-ming

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [**Objective**] To study the effects of planting density on branch development and provide references for improving the wood quality of *Mytilaria laosensis*. [**Method**] The effect of planting density on branch development was examined in an eight-year-old *M. laosensis* plantation with five planting densities. The branch quantity (amount, proportion), morphology (diameter, length and angle of first-branch), position (height and orientation) and branch statues (dead or live) of 80 sample trees (5 033 branches) were investigated. [**Result**] The results showed that the dead branch layer increased with the increasing densities. No close relation was found between the amount of total branches or dead branches and the planting density, but the rate of dead branch increased with the increasing planting density. The basal diameter, length and angle of branch under 9 meters decreased with the increasing planting density. In the horizontal direction, the basal diameter, length, angle and amount of branch in same density and different orientation increased at first and then decreased with the increasing position angle. It reached the maximum value in a better illumination condition in the range of position angle (0 - 90° or 316 - 360°). In the vertical direction, the amount of branch increased gradually with the relative position and then closed to the uniform distribution. The basal diameter and length of branch correlated positively with the increasing height, and then less change was observed. The branch angle decreased from bottom to top in the vertical direction. [**Conclusion**] The diameter of branch is affected by planting density significantly. The branch growth is inhibited by high density (2500 tree · hm⁻²). It is suggested that the planting density should be chosen according to the cultivation aim, and pruning should be made as early as possible on the dominant or co-dominant trees, so as to improve effectively the wood quality.

Keywords: *Mytilaria laosensis*; planting density; branch characteristics; spatial distribution

(责任编辑:徐玉秀)