

# 福建杉木人工林密度控制图研制及应用

田 猛<sup>1</sup>, 曾伟生<sup>2</sup>, 孟京辉<sup>1\*</sup>, 孔 雷<sup>2</sup>, 姜 鹏<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083;2. 国家林业局调查规划设计院,北京 100714;  
3. 国家林业局 昆明勘察设计院,云南 昆明 650216;4. 河北农业大学 林学院,河北 保定 071000)

**摘要:**林分密度管理是通过控制造林时初植株行距以及后继的疏伐管理,对林分密度的控制,进而实现特定的经营目标。为了实现福建杉木人工林密度量化调控,基于 Reineke 自然稀疏方程,构建福建杉木密度控制图。结果表明:1)构建了杉木人工林最优生长密度上下限以及杉木林分郁闭线;2)构建了杉木优势高模型、杉木材积模型、立地指数模型作为密度控制图的辅助方程;3)基于密度控制图,模拟了 3 种常见密度下,对杉木林分进行的 3 种不同经营措施(不进行任何经营措施,合理抚育间伐,对照性抚育间伐),获得不同经营措施下林分总收获量、林分总枯损量、林分年平均收获量等林分参数以及对相应的林分年龄,为合理安排经营密度提供参考。

**关键词:**林分密度管理;杉木人工林;密度控制图;Reineke 自然稀疏方程;不同经营措施

**中图分类号:**S753      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2015)03-0157-07

Development and Application of Density Management Diagram for  
*Cunninghamia lanceolata* Plantation in Fujian

TIAN Meng<sup>1</sup>, ZENG Wei-sheng<sup>2</sup>, MENG Jing-hui<sup>1\*</sup>, KONG Lei<sup>2</sup>, JIANG Peng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
2. Academy of Forest Inventory and Planning, Beijing 100714, China; 3. Kunming Forestry Survey and Design Institute,  
State Forestry Administration, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. College of Forestry,  
Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China)

**Abstract:** Stand density management refers to control stand density to achieve specific objective through initial spacing and subsequent thinning. In order to manage the *Cunninghamia lanceolata* plantation quantitatively, we constructed the stand density management diagram (SDMDs) for *C. lanceolata* plantation in Fujian Province based on Reineke self-thinning equation. The results were as follows: 1) Constructed the line for up and lower density limit as well as for canopy closure. 2) Developed dominant height model, tree volume model and site index model as the associated relationships for SDMDs. 3) Based on SDMD, modeled 3 different management scenario i. e., no treatment, an commercial thinning and a pre-commercial thinning for 3 stands with different densities and calculated such stand parameters as the total yield of the final clear cutting, stand mortality, average yield and the corresponding age. Hope the developed SDMD in this study might contribute to the management of *C. lanceolata* plantation.

**Key words:** stand density management; *Cunninghamia lanceolata* plantation; stand density management diagram; Reineke self-thinning; different management scenario

林分密度管理是通过控制造林时初植株行距以及后继的疏伐的管理,实现林分密度控制,进而实现

收稿日期:2014-10-20 修回日期:2014-12-15

基金项目:国家自然科学基金(31300532)。

作者简介:田猛,男,在读硕士,研究方向:森林可持续经营。E-mail:tmeng016@126.com

\* 通信作者:孟京辉,男,讲师,研究方向:森林可持续经营技术。E-mail:Jmeng@bjfu.edu.cn

特定的经营目标<sup>[1-2]</sup>。确定合理的密度是一个复杂的过程,其涉及到具体经营环境下生物学、经济学以及技术层面的诸多因素<sup>[3-4]</sup>。该过程需要量化林分密度的最高与最低阈值。对于最高密度阈值的确定,需要保证林分生长及单株林木活力保持在一定的合理范围之内,而对于最低密度阈值而言,则需要尽可能充分地利用林地<sup>[5]</sup>。实践中对于不同经营目标的林分,很难定量确定其最高及最低密度上下限,即合理密度区间。固定样地长期定位观测,通常被认为是确定某一经营目标下合理间伐时间,以及合理密度的可行方法。但是,由于其观测时间的长期性,以及结果并不能准确地应用到其立地质量及经营目标不同的林分,受到不同程度的质疑<sup>[6]</sup>。相比而言,林分密度控制图允许对不同立地条件及经营目标下的林分,不同经营措施进行模拟,进而确定合理间伐时间。

林分密度控制图是一种平均林分模型,从图面上展示了林分不同发育阶段的立木产量、林分密度和林木死亡之间的相互关系,为掌握林分密度、森林资源清查、预测林分生长、实行定量间伐、造林设计等森林资源经营管理活动提供科学依据<sup>[7-10]</sup>。林分密度控制图被认为是一个集设计、展示、评价不同经营措施的有效工具,进而为同龄林经营提供决策依据<sup>[11]</sup>。密度控制图通常可以通过自然稀疏法则进行构建。自然稀疏法则描述了生物个体大小与个体密度之间的关系,认为在对数坐标轴下两者呈现线性关系。该法则由 Yoda 模型和 Reineke 模型 2 种表示形式<sup>[12]</sup>。其中,Reineke 方程源于林业,描述了林分密度与林分平方平均直径的关系。本研究基于 Reineke 方程构建福建杉木密度控制图,并选取 3 种不同经营方案进行模拟,为杉木人工林可持续经营提供依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 数据

采用福建省全国第八次连续清查杉木人工林数据,共计 516 块样地。每个样地分为样木层面信息和样地层面信息。样木层面信息包括树种、胸径、材积、样木空间位置等信息;样地层面信息包括坡度、坡向、海拔、土壤类型等地形地貌因子。所选样地涵盖了较大范围的林分胸高断面积、林分密度、林分平方平均直径和林木平均材积等参数(表 1)。

### 1.2 研究方法

1.2.1 完满立木度样地确定 完满立木度林分的确定是自然稀疏方程构建的前提。采取 Solomon

提出的完满立木度林分确定方法:首先,假设  $\ln(N)$   $- \ln(QMD)$  关系中,其理论斜率为 -1.605,进而可以通过具有最大  $\ln(N)$  和  $\ln(QMD)$  组合的样地,确定截距  $a = \ln(N) + 1.605\ln(QMD)$ ;其次,通过上面构建的自然稀疏方程,计算每一个样地的最大林分密度( $N_{max}$ );再次,采用  $N/N_{max}$ ,计算每一块样地的相对密度指数( $RD$ )<sup>[13]</sup>;最后,对于相对密度指数  $RD > 0.7$  的样地,视之为完满立木度样地<sup>[14]</sup>。

表 1 杉木样地信息

Table 1 C. *lanceolata* plots information

林分调查因子	均值	标准差	最小值	最大值
林龄/a	19	8	3	42
株密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	1 492	1 155	15	6 941
总断面面积/(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	0.013 0	0.008 1	0.002 1	0.070 0
林分平方平均直径/cm	12.33	3.63	5.15	29.78
平均材积/m <sup>3</sup>	0.074 0	0.064 4	0.004 5	0.545 7

1.2.2 自然稀疏方程及拟合方法 选用 Reineke 自然稀疏模型<sup>[15]</sup>:

$$\ln(N) = \beta_0 + \ln(QMD) + \beta_1$$

式中,  $N$  为单位面积林木株数,  $QMD$  为平方平均直径,  $\beta_0, \beta_1$  为模型参数。

最小二乘法广泛用来估计方程参数,同时被认为是最好的估计条件平均值的方法。然而, Kmenta 认为当自变量和因变量存在随机误差时,最小二乘法估计会产生一定程度的偏差<sup>[16]</sup>。Leduc 比较了几种不同的拟合技术,发现 reduced major axis (RMA) 回归是拟合双变量关系的最优方法,尤其适于目标侧重参数值的估计<sup>[17]</sup>。本研究的目标侧重自然稀疏方程参数值的估计,而不是侧重具体函数形状,因此,采用 RMA 对 Reineke 自然稀疏方程进行拟合。

1.2.3 林分密度控制图辅助方程 密度控制图以自然稀疏模型为基础,除此之外还包括如下辅助模型:

$$\text{优势高模型: } H_d = \beta_2 \cdot QMD^{\beta_3} N^{\beta_4}$$

$$\text{材积模型: } V = \beta_5 \cdot N \cdot (QMD - \beta_6)^{\beta_7}$$

$$\text{地指数模型: } t = \frac{\beta_8}{\beta_9 + \ln(\frac{SI + \beta_{10}}{H_d})}$$

式中,  $QMD$  林分平方平均胸径;  $H_d$  为优势木平均高;  $V$  为林木材积;  $t$  为林龄,  $SI$  为立地指数,  $\beta_2 \sim \beta_{10}$  为模型参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 收获预估密度控制图构建

基于 Solomon(2002)完满立木度确定法,筛选出 20 块完满立木度样地。采用 RMA 回归,拟合

Reineke 自然稀疏方程:

$$\ln(N) = 12.509 - 1.661 \ln(QMD) \quad (1)$$

式中  $R^2$  为 0.912, 残差标准误为 0.324 5。

方程 1 反映出林分密度和林木大小的平均关系, 还非最优自然稀疏线。自然稀疏线通过对方程 1 进行向上平移, 即将方程 1 截距上移到其 95% 的置信区间的上限, 自然稀疏线如下所示:

$$\ln(N) = 13.139 - 1.661 \ln(QMD) \quad (2)$$

构建最优生长密度的上限的目的是避免由于林分密度过高而导致的自然枯死。构建最优生长密度的下限目的是在保证林地的有效利用。这 2 条最优密度上下限, 以及林分开始郁闭时的郁闭线, 组成了平行于自然稀疏线的 3 条直线。本研究中, 杉木林营造时采用方形的间距, 选择 10 cm 作为参考直径, 用来计算不同造林密度水平下的林木株数。根据杉木人工林生长相关经验, 在参考直径 10 cm 时, 株行距为 1.5 m × 1.0 m, 2.0 m × 1.5 m 和 2.0 m × 2.0 m 的杉木林, 分别接近最优生长密度的上限 (6 666)、最优密度的下限 (3 333) 以及林分郁闭时林分的密度 (2 500) (表 2), 分别是最大密度的 60.08%、30.04% 和 22.53%。在这种情况下, 假设 60% 和 30% 分别为最优生长密度的上下限, 而 20%

为林分郁闭的限度值(图 1)。

表 2 不同行距的树木株数

Table 2  $N(\text{trees} \cdot \text{hm}^{-2})$  for different spacings

胸径/cm	株行距/m			
	最大密度 (100%)	1.5×1.0 (66%)	2.0×1.5 (33%)	2.0×2.0 (23%)
10	11 097	6 667	3 333	2 500
15	5 659	3 400	1 700	1 275
20	3 509	2 108	1 054	791
25	2 422	1 455	728	546
30	1 789	1 075	538	403
35	1 385	832	416	312
40	1 110	667	333	250
45	912	548	274	206
50	766	460	230	173

这 3 条平行线如下:

$$\ln(N) = 12.628 - 1.661 \ln(QMD) \quad (3)$$

$$\ln(N) = 11.935 - 1.661 \ln(QMD) \quad (4)$$

$$\ln(N) = 11.530 - 1.661 \ln(QMD) \quad (5)$$

方程 3 为最优密度的上限, 超过该线自然稀疏现象将会发生; 方程 4 为最优密度的下限, 低于该线表明没有完全利用林地资源; 方程 5 为林分刚刚郁闭时的密度, 低于该密度线说明当前林分没有郁闭。

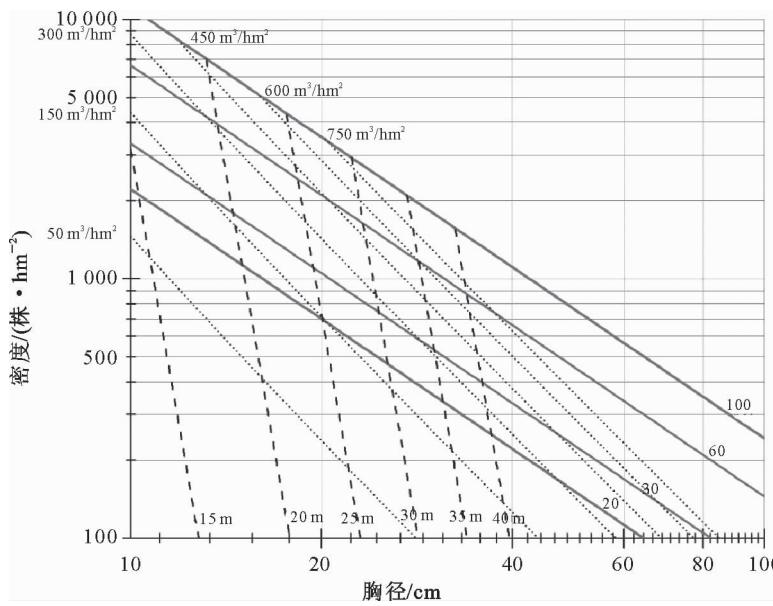


图 1 林分密度控制图

Fig. 1 Stand density control chart

此外, 除了上述 4 个模型(方程(2)~方程(5)), 林分密度控制图中还需要包括优势高模型、材积模型。此外, 同样拟合了立地指数曲线, 进而对某一经营状态下森林的年龄进行预估。其相应模型如下:

优势高模型:

$$H_d = 1.229 QMD^{0.869} N^{0.062} \quad (6)$$

材积模型:

$$V = 0.000 183 N(QMD - 1.136 9)^{2.399} \quad (7)$$

立地指数模型:

$$t = \frac{12.505}{0.457 + \ln\left(\frac{SI+3}{Hd}\right)} \quad (8)$$

综合上述林分郁闭密度线、林分最优密度上下限、林分自然稀疏线、优势高模型、材积模型, 构建福

建省将乐县林分密度控制图(图 1),并通过立地指  
数模型,实现不同状态下林分年龄的估测。

## 2.2 密度控制图应用

从三方面讨论密度控制图的应用:1)不进行任  
何经营措施,2)进行合理的抚育间伐,3)对照性抚育  
间伐(图 2)。第 1 种方案指在林分生长过程中,不  
采取任何的经营措施(对照);第 2 种方案主要目标  
是实现林分蓄积或者单木材积的最大化,避免自然  
稀疏现象的发生。第 3 种方案是一个极端的经营方  
式,并不考虑林分材积的最终收获量,主要目的是和  
前两者经营方案的对比。

首先假设初始杉木林分位于立地指数为 30 m,  
基准年龄为 20 a 的立地上。选取初始平方平均直  
径为 10 cm,株数为 5 000 株·hm<sup>-2</sup> 的杉木林分。  
对于该密度采用上述 3 种经营方式进行经营,当林  
木平方平均直径为 40 cm 时进行主伐收获。

### 2.2.1 自然稀疏枯损量计算及自然稀疏过程

2.2.1.1 自然稀疏枯损量计算 假设自然稀疏大  
约开始 55% 密度线,逐步到达 60% 密度线,之后沿  
着 60% 密度线向下,林分蓄积量逐步开始枯损(图  
2)。因此,以到达 55% 密度时的平方平均直径、林  
分密度及林分蓄积量为起点计算林分枯损量,随着  
平方平均直径的增大密度相对降低,林分总枯损量  
逐渐增大。

林分总枯损量计算方法:

1)计算自然稀疏起始平方平均直径(QMD),为  
计算方便选取 QMD+1 取整数部分为下一径阶值,  
依次类推,至目标胸径,例子见公式部分。

2)根据 1 中平方平均直径(QMD)计算相对应  
密度,并计算连续两年之间密度差值,即理论死亡株  
数( $N_n - N_{n+1}$ )。

3)根据 1)、2)中的平方平均直径(QMD)和所  
对应的密度,求出其对应的为第  $n$  径阶林分枯损量  
( $V_n$ ),并除以所对应的密度( $N_n$ )求单株立木材积  
( $T_n$ )。

4)取单株立木材积( $T_n$ )和下一径阶单株立木  
材积( $T_{n+1}$ )的均值作为第  $n$  径阶至第  $n+1$  径阶的  
林分径阶枯损量。

5)计算的各径阶枯损量之和,即林分总枯损量  
( $V_m$ )。

林分总枯损量公式如下:

$$V_m = \sum_{i=n}^{\infty} V_n = \sum_{i=n}^{\infty} \frac{T_n + T_{n+1}}{2} \times (N_n - N_{n+1}) = \sum_{i=n}^{\infty}$$

$$\frac{V_n / N_n + V_{n+1} / N_{n+1}}{2} \times (N_n - N_{n+1})$$

式中: $V_m$  为林分总枯损量, $V_n$  为第  $n$  径阶林分枯损

量, $T_n$  为单株立木材积, $N_n$  为当前林分密度, $V_n$  为  
林分蓄积量, $n$  为自然稀疏起始平方平均胸径  
(QMD)。

$$V = 0.000\ 183N(QMD - 1.136\ 9)^{2.399};$$

$$N = (0.55 \sim 0.6) \times \exp[13.139 - 1.661\ln(QMD)].$$

除自然稀疏起始点外,其他平方平均胸径  
(QMD)取整化径阶,例如低密度林分计算林分枯损  
量时,起始 QMD18.38 cm(55%),依次径阶为 19  
cm(56%)、20 cm(57%)、21 cm(58%)、22 cm  
(59%)、23 cm(60%)、24 cm(60%)……30 cm  
(60%)。

2.2.1.2 自然稀疏过程 在不进行任何经营措施  
方案 1 中,平方平均直径保持持续增长,而并未出现  
林木株数的减少,直到林分接近自然稀疏区域(60%  
密度线)。之后,林木的平方平均直径的增长则伴随着  
林木株数的减少,其林分发展趋势沿着 60% 密度  
线进行(图 2 a)。

自然稀疏大约在 11 a 开始(55%),此时林分平  
方平均直径为 11.26 cm,林分优势高为 17.1 m,其  
林分密度为 5 000 株·hm<sup>-2</sup>,其林分材积为 236.07  
m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

当林分平均直径达到目标直径 40 cm 进行皆伐  
作业时,林分总枯损量为 963.92 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,林分总  
收获量为 789.66 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,林分年平均收获量为  
8.70 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>(表 3)

2.2.2 合理的抚育间伐过程 在进行合理的抚育  
间伐方案 2 中(图 2 b,表 3),林分疏伐前后的发展  
路径应当在 55% 和 30% 的林分密度线之间。

第 1 次疏伐(CT1)在 11 a 开始,此时林分平  
方平均直径为 11.26 cm,伐后林分平方平均直径为  
11.83 cm,林分优势高为 17.1 m,伐前林分密度为  
5 000 株·hm<sup>-2</sup>,采伐 2 487 株·hm<sup>-2</sup>,伐后林分密  
度为 2 513 株·hm<sup>-2</sup>,伐前林分材积为 236.07 m<sup>3</sup>  
·hm<sup>-2</sup>,疏伐后蓄积为 135.26 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,收获材  
积为 100.80 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>(表 3)。

第 2 次疏伐(CT2)在 16 a 开始,此时林分平  
方平均直径为 17.03 cm,伐后林分平方平均直径为  
17.89 cm,林分优势高为 23.5 m,伐前林分密度  
2 513 株·hm<sup>-2</sup>,采伐 1 250 株·hm<sup>-2</sup>,伐后林分密  
度为 1 263 株·hm<sup>-2</sup>,伐前林分材积为 350.32 m<sup>3</sup>  
·hm<sup>-2</sup>,疏伐后蓄积为 199.79 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,收获材  
积为 150.53 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

当林分平均直径达到目标直径 20 cm 时,主伐  
林龄为 18 a,林分优势高为 25.9 m,采伐株数为  
1 263 株·hm<sup>-2</sup>,收获材积为 265.44 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,材

积总收获量为  $366.24 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 无损失蓄积, 平均生长量为  $20.50 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

第3次疏伐(CT2)在26 a开始, 此时林分平方平均直径为25.77 cm, 伐后林分平方平均直径为27.07 cm, 林分优势高为32.3 m, 伐前林分密度1263株·hm<sup>-2</sup>, 采伐628株·hm<sup>-2</sup>, 伐后林分密度为635株·hm<sup>-2</sup>, 伐前林分材积为503.42 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 疏伐后蓄积为286.27 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为217.15 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

当林分平均直径达到目标直径30 cm时, 主伐林龄为32 a, 林分优势高为35.3 m, 采伐株数为635株·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为370.10 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 总收获材积为838.59 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 无损失蓄积, 平均生长量为26.19 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

当林分平均直径达到目标直径35 cm时, 主伐林龄为49 a, 林分优势高为40.3 m, 采伐株数为635株·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为542.96 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 总收获材积为1 011.45 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 无损失蓄积, 平均生长量为20.75 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

当林分平均直径达到目标直径40 cm时, 主伐林龄为89 a, 林分优势高为45.3 m, 采伐株数为635株·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为755.53 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 总收获材积为1 224.02 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 无损失蓄积, 平均生长量为13.76 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

### 2.2.3 对照性抚育间伐过程

在对照性抚育间伐经营方案3中(图2c, 表3), 采取了90%的重度疏伐, 达到不同目标直径时均未发生自然稀疏现象。

90%的疏伐(CT)在10 a开始, 此时林分平方平均直径为10 cm, 伐后林分平方平均直径为11.79

cm, 林分优势高为15.4 m, 伐前林分密度5 000株·hm<sup>-2</sup>, 采伐株数为4 500株·hm<sup>-2</sup>, 伐后林分密度为500株·hm<sup>-2</sup>, 伐前林分材积为171.65 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 疏伐后蓄积为26.71 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为144.95 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

当林分平均直径达到目标直径20 cm时, 主伐林龄为17 a, 林分优势高为24.4 m, 采伐株数为498株·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为104.72 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 总收获材积为194.11 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 平均生长量为11.76 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

当林分平均直径达到目标直径30 cm时, 主伐林龄为31 a, 林分优势高为34.7 m, 采伐株数为498株·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为291.58 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 总收获材积为436.53 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 平均生长量为14.15 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

当林分平均直径达到目标直径35 cm时, 主伐林龄为46 a, 林分优势高为39.7 m, 采伐株数为498株·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为427.76 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 总收获材积为572.71 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 平均生长量为12.43 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

当林分平均直径达到目标直径40 cm时, 主伐林龄为80 a, 林分优势高为44.6 m, 采伐株数为498株·hm<sup>-2</sup>, 收获材积为595.24 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 总收获材积为740.18 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 平均生长量为9.20 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

方案2通过及时疏伐把林分密度控制在最优密度范围内, 其年平均收获量较其他两方案表现出较高的趋势。同时, 当目标直径设为30 cm时, 年平均收获量最大, 为最优经营模式(表3)。

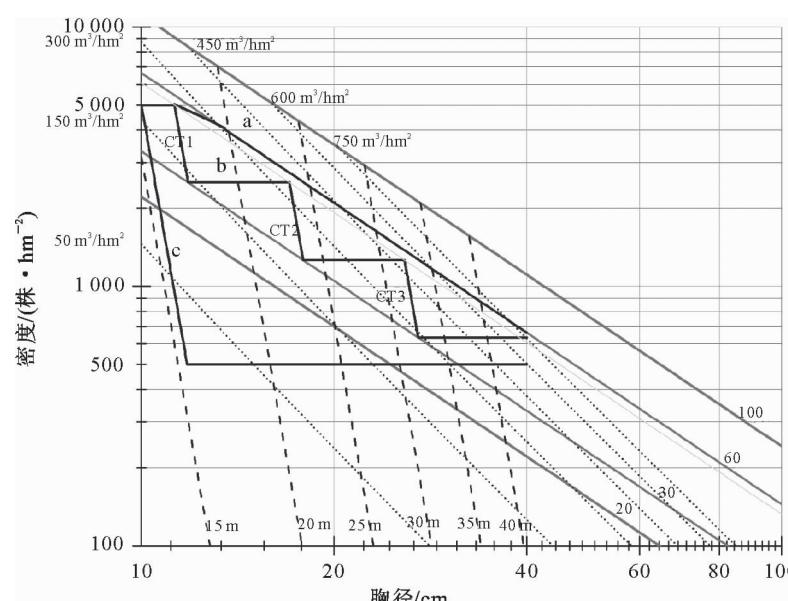


图2 不同经营模式模拟林分密度控制图

Fig. 2 Simulations of different management models for stand density control chart

表 3 基于密度控制图的不同经营模式模拟结果

Table 3 The simulation results based on different management models for density control

方式	林龄/a		$H_d/m$		密度/(株·hm <sup>-2</sup> )		$D_g/cm$		$V/(m^3 \cdot hm^{-2})$		林分的 总收获量 /(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	林分年平 均收获量 /(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	林分总 枯损量 /(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )
	之前	之后	之前	之后	之前	之后	之前	之后	之前	之后			
起点到自然稀疏点	10	11	15.4	17.1	5 000	5 000	10.00	11.26	171.65	236.07			
自然稀疏开始点	11		17.1		5 000		11.26		236.07				
皆伐(20 cm)		19		26.7		2 099		20.00		441.22	441.22	23.58	415.81
皆伐(30 cm)		35		36.4		1 070		30.00		623.96	623.96	17.86	627.10
皆伐(35 cm)		52		41.0		828		35.00		708.50	708.50	13.60	797.72
皆伐(40 cm)		91		45.4		663		40.00		789.66	789.66	8.70	963.92
起点到自然稀疏点	10	11	15.4	17.1	5 000	5 000	10.00	11.26	171.65	236.07			
第1次疏伐(CT1)		11		17.1		2 513		11.83	236.07	135.26	100.80		
第2次疏伐(CT2)	16	16	23.5	23.5	2 513	1 263	17.03	17.89	350.32	199.79	150.53		
皆伐(20 cm)		18		25.9		1 263		20.00		265.44	516.78	20.50	
第3次疏伐(CT3)	26	26	32.3	32.3	1 263	635	25.77	27.07	503.42	286.27	217.15		
皆伐(30 cm)		32		35.3		635		30.00		370.10	838.59	26.19	
皆伐(35 cm)		49		40.3		635		35.00		542.96	1011.45	20.75	
皆伐(40 cm)		89		45.3		635		40.00		755.53	1224.02	13.76	
起点	10		15		5 000		10		171.65				
疏伐(CT)		10		15.4		500		11.79		26.71	144.95		
皆伐(20 cm)		17		24.4		500		20.00		105.10	250.05	15.15	
皆伐(30 cm)		31		34.7		500		30.00		291.58	436.53	14.15	
皆伐(35 cm)		46		39.7		500		35.00		427.76	572.71	12.43	
皆伐(40 cm)		80		44.6		500		40.00		595.24	740.18	9.20	

### 3 结论与讨论

构建了福建省杉木人工林密度控制图,并对3种不同经营方案下不同目标直径进行了模拟。结果表明,通过及时疏伐把林分密度控制在最优密度范围内,其年平均收获量较其他2个试验方案表现出较高的趋势;同时,当目标直径设为30 cm时,年平均收获量最大。因此,可将目标直径为30 cm的经营模式作为最优经营模式。

林分密度控制图可以为经营决策者展示了不同经营措施下,杉木人工林发展的趋势以及最终经营的效果,是森林经营决策者制定杉木人工林密度调控的有利工具。本研究的密度控制图仅局限于以林木收获为目的的密度调控,随着林业的主要任务由木材生产向着森林多功能的发挥的转变,林业科技工作者逐步关注如何通过密度调控,来最大程度发挥森林的生态功能。未来林分密度控制图的发展方向应以发挥森林某一生态效能为出发点,进行相应的密度控制图构造机理与应用的研究。如构造最大防虫害密度控制图,通过密度的科学调控,使病虫害发生与传播的几率最低,或为沿海防护林构造最大防风效应密度控制图,通过密度调控使得林分具有最大程度的防风效能。

随着森林经营思想的转变,特别是近自然森林经营在我国的推广与普及,营造多树种混交的近自然森林成为我国当前各森林经营单位的主要发展趋

势<sup>[18]</sup>。以往的密度控制图主要是为人工纯林而构建的,因此,需研究构建多树种混交林的密度控制图。

林分密度控制图作为一个平均林分的模拟模型,能够从林分层面上为森林经营者提供森林经营的决策信息,但是,当前随着森林经营的集约化,特别是近自然森林经营中的立木作业体系,这些林分层面的决策参数可能并不能完全满足经营决策者的需求,因此,开展单木层面经营参数的研究,将是未来森林经营层面中迫切需要解决的问题。

### 参考文献:

- NEWTON P F. Stand density management diagrams: review of their development and utility in stand-level management planning [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 98 (11):251-265.
- NEWTON P F, LEI Y, ZHANG S Y. Stand-level diameter distribution yield model for black spruce plantations [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 209(3):181-192.
- ANTA M B, GONZÁLEZ A Á. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules [J]. Forestry, 2005, 78(3), 209-216.
- CASTEDO-DORADO F, CRECENTE-CAMPO F, ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P, et al. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability [J]. Forestry, 2009, 82(1):1-16.
- DEAN T J, BALDWIN V C. Crown management and stand

- density[C]// CARTER M C, ed. Growing trees in a greener world; industrial forestry in the 21<sup>st</sup> century; 35<sup>th</sup> LSU forestry symposium. Louisiana State University Agricultural Center. Baton Rouge, LA: Louisiana Agricultural Experiment Station, 1996:148-159.
- [6] DEAN T J, BALDWIN V C. Using a density management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations[R]. USDA Forest Service. Southern Forest Experimental Station, 1993.
- [7] 靳爱仙, 周国英, 史大林, 等. 马尾松人工林碳储量密度控制图的编制[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3):54-57.
- JIN A X, ZHOU G Y, SHI D L, et al. Establishment of the *Pinus massoniana* carbon storage density control graph [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3):54-57. (in Chinese)
- [8] 张惠光. 福建柏分密度控制图的研究[J]. 福建林业科技, 2006, 33(4):41-44.
- [9] NEWTON P F, WEETMAN G F. Stand density management diagram for managed black spruce stands [J]. Forestry Chronicle, 1994, 70(1):65-74.
- [10] LONG J, SHAW J. A density management diagram for even-aged ponderosa pine stands [J]. Western Journal of Applied Forestry, 2005, 20(4):205-215.
- [11] PENNER M, SWIFT D, GAGNON R A. Stand density management diagram for balsam fir in New Brunswick [J]. Forestry Chronicle, 2006, 82(5):700.
- [12] INOUE A, MIYAKE M, TOMOHIRO N. Allometric model of the Reineke equation for Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) and red pine (*Pinus densiflora*) stands [J]. Journal of Forest Research, 2004, 9(4):319-324.
- [13] DREW JT, FLEWELLING JW. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations [J]. Forest Science, 1979, 25(3):518-532.
- [14] SOLOMON D S, ZHANG L J. Maximum size-density relationships for mixed softwoods in the northeastern USA original[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 155(1/3):163-170.
- [15] REINEKE L H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests [J]. Journal of Agriculture Research, 1933, 46(7):627-638.
- [16] KMENTA J. Elements of Econometrics[M]. 2nd. MI: The University of Michigan Press, 1987.
- [17] LEDUC D J. A comparative analysis of the reduced major axis technique of fitting lines to bivariate data [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17(7):654-659.
- [18] 王青天. 杉木混交林近自然经营效果研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1):95-99.
- WANG Q T. Effectiveness study on the close-to-nature management for mixed forest of Chinese fir [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1):95-99. (in Chinese)

(上接第 148 页)

- [5] 马磊, 吴小芹. 九种外生菌根菌与杨树苗木的菌根化研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2007, 31(5):29-33.
- MA L, WU X Q. A study on scenario planning of scenic forest in Zijinshan Mountain of Nanjing [J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition, 2007, 31(5):29-33. (in Chinese)
- [6] HRYNKIEWICZ K, CIESIELSKA A, HAUG I, et al. Ectomycorrhiza formation and willow growth promotion as affected by associated bacteria; role of microbial metabolites and use of C sources [J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(2):139-150.
- [7] LUO Z, LI K, GAI Y, et al. The ectomycorrhizal fungus (*Paxillus involutus*) modulates leaf physiology of poplar towards improved salt tolerance [J]. Environ. Exp. Bot., 2011, 72(2):304-311.
- [8] DANIELSON L, POLLE A. Poplar nutrition under drought as affected by ectomycorrhizal colonization [J]. Environ. Exp. Bot., 2014, 108:89-98.
- [9] MA Y, HE J, MA C, et al. Ectomycorrhizas with *Paxillus involutus* enhance cadmium uptake and tolerance in *Populus × canescens* [J]. Plant Cell Environ., 2014, 37(3):627-642.
- [10] LANGENFELD-HEYSER R, GAO J, DUCIC T, et al. *Paxillus involutus* mycorrhiza attenuate NaCl-stress responses in the salt-sensitive hybrid poplar *Populus × canescens* [J]. Mycorrhiza, 2007, 17(2):121-131.
- [11] HARTLEY S E, GANGE A C. Impacts of plant symbiotic fungi on insect herbivores: mutualism in a multitrophic context [J]. Annu. Rev. Entomol., 2009, 54:323-342.
- [12] NERG A M, KASURINEN A, HOLOPAINEN T, et al. The significance of ectomycorrhizas in chemical quality of silver birch foliage and above-ground insect herbivore performance [J]. J. Chem. Ecol., 2008, 34(10):1322-1330.
- [13] BENREY B, DENNO R F. The slow-growth-high-mortality hypothesis: a test using the cabbage butterfly [J]. Ecology, 1997, 78:987-999.
- [14] DEMATHEIS F, KURTZ B, VIDAL S, et al. Multitrophic interactions among western corn rootworm *Glomus intraradices* and microbial communities in the rhizosphere and endorhiza of maize [J]. Frontiers in Microbiology, 2013(4):357.
- [15] 赵玲, 胡增辉, 赵风君, 等. 水杨酸甲酯诱抗黑杨对杨扇舟蛾生长发育的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1):75-78.
- ZHAO L, HU Z H, ZHAO F J, et al. Influences of induced resistance in *Populus deltoides*, treated with methyl salicylic acid, on the growth and development of *Clostera anachoreta* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(1):75-78. (in Chinese)