

文章编号: 1001-1498(2003)05-0581-07

# 马尾松人工林直径分布收获模型及其应用研究

杨锦昌<sup>1</sup>, 江希铤<sup>2</sup>, 许煌灿<sup>1</sup>, 王素萍<sup>2</sup>, 尹光天<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520;

2. 福建农林大学林学院, 福建 南平 353001)

**摘要:**马尾松人工林直径分布收获模型系统包括三大部分,即林分因子模型、Weibull 分布参数回收模型和林分收获模型。此模型系统保证了林分变量间的一致性,实现了林分结构和产量(蓄积量和出材量)的动态预测,为用材林林木资产评估、确定森林的经济成熟提供了必要的技术手段。

**关键词:**马尾松;直径分布模型;资产评估;经济成熟

中图分类号:S758 S711 文献标识码:A

直径分布收获模型是在直径分布规律研究的基础上,预测林分在不同年龄阶段各径阶林木株数,进而对林分各径阶及总体收获量(蓄积量、出材量)作出估计。与全林分模型相比,此类模型能够提供更为详尽的信息,因此受到国内外许多学者的重视<sup>[1~4]</sup>。本文以 Weibull 分布为基础,利用参数回收技术建立马尾松人工林直径分布收获模型系统,探讨了该模型系统在林木生长收获预测、资产评估以及确定经济成熟龄中的具体应用。

## 1 材料来源

供研究的 677 块固定和临时标准地来源于福建省马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 主要产区的三明和南平地区的各县市,分布于不同年龄、立地和密度的马尾松人工林中。标准地调查内容及测树因子均按常规方法测定和计算;此外,还收集了 1 170 株现场造材样木及 100 棵年龄均大于 20 a 的优势木树干解析材料,从而为直径分布收获模型系统的研究奠定了良好的基础。

## 2 研究方法和结果

马尾松人工林直径分布收获模型系统大致包括三大部分,即林分因子模型、直径分布模型和林分收获模型。

### 2.1 林分因子模型

2.1.1 地位指数曲线模型 根据标准地材料,采用比例法建立了地位指数曲线模型:

$$H_u = SI \times e^{-13.4390 \times (1/t - 1/20)} \quad (1)$$

收稿日期: 2002-05-10

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(B0010019)

作者简介: 杨锦昌(1976—),男,福建福安人,博士生。

其中:  $H_u$  为优势木平均高,  $SI$  为地位指数,  $t$  为林分年龄。

2.1.2 株数预估模型 单位面积株数直接影响到林分产量的高低,因此,林木株数的确定是研制直径分布收获模型的重要因素。经过多个方程的拟合对比,建立了能够在已知初始林分密度条件下预测未来林分密度的株数预估模型:

$$\ln N_2 = 8.67674 \left[ 1 - \frac{t_1}{t_2} \right] - 0.53926 \left[ 1 - \frac{t_1}{t_2} \right] \ln SI + \frac{t_1}{t_2} \ln N_1 \quad (2)$$

式中:  $t_1$ 、 $t_2$  分别代表初始和未来林分的年龄;  $N_1$ 、 $N_2$  分别代表  $t_1$ 、 $t_2$  年龄时的单位面积株数。

2.1.3 平均胸径预估模型 平均胸径是直径分布收获模型中最基础的因子,也是确定林分产量的重要依据。为此,经过对比分析后,建立了林分平均胸径预估模型:

$$\ln D_2 = b_1 \times \left[ 1 - \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^{b_2} \left( \frac{t_1}{t_2} \right) \right] + b_3 \left[ 1 - \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^{b_2} \left( \frac{t_1}{t_2} \right) \right] \ln SI + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^{b_2} \left( \frac{t_1}{t_2} \right) \ln D_1 \quad (3)$$

式中:  $b_1 = 3.0656$ 、 $b_2 = 0.96043$ 、 $b_3 = 0.80600$ ,  $D_1$ 、 $D_2$  代表  $t_1$ 、 $t_2$  年龄时的平均胸径。

2.1.4 优势高和平均高转化模型 采用对偶回归分析法建立了能够相互预报的优势高 ( $H_u$ ) 和平均高 ( $H_p$ ) 的数学模型:

$$H_u = 1.034857 + 1.03742 H_p \quad (4)$$

2.1.5 相对树高曲线模型 相对树高曲线是指林分中各径阶平均树高  $H_i$  与林分平均高  $\bar{H}$  的比值  $RH_i$  和各径阶中值与林分平均胸径  $D$  的比值  $RD_i$  之间的相关曲线。与一般树高曲线的区别在于:通过以  $D$  和  $H$  为基础的相对变换,将胸径和树高的具体数值变为无量纲的相对数,使得因林分平均胸径和平均高的显著差异导致离散程度大的各个不同林分的树高曲线,收敛成通过与平均胸径和平均高相对应的 1.0 这一点,其变动范围大为缩小<sup>[5]</sup>。

应用相对树高曲线模型,只要给定平均胸径和平均高,就可估计出各径阶平均高,据此,可用二元材积方程和二元材种出材率模型预估林分收获量(蓄积量、出材量)。基于此,建立了相对树高曲线模型:

$$RH_i = 0.99999 + 0.34427 \ln RD_i \quad R = 0.9999 \quad (5)$$

2.1.6 算术平均胸径与平方平均胸径转化模型 为了预估各径阶的株数概率分布,从而推算各径阶的株数,建立了算术平均胸径  $\bar{D}$  与平方平均胸径  $D_g$  转化模型:

$$\bar{D} = -0.37155 + 0.99058 D_g \quad (6)$$

## 2.2 直径分布模型

建立直径分布模型关键在于选择合适的描述林分直径分布的分布函数。自 Beiley 和 Dell 首次将 Weibull 分布用于拟合直径分布以来,许多学者对其进行研究,认为该分布是目前拟合同龄林直径分布较理想的一种分布<sup>[3,4,6,7]</sup>。因此,决定采用 Weibull 分布函数作为建立马尾松人工林直径分布收获预测模型的基础,并利用参数回收技术估计 Weibull 分布的参数。

$$\text{Weibull 分布的累积分布函数为: } F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x-a}{b} \right)^c \right] \quad (7)$$

式中,  $a$  为位置参数,  $b$  为尺度参数,  $c$  为形状参数。由于 Weibull 分布函数的一阶原点矩为林分算术平均胸径  $\bar{D}$ , 二阶原点矩为林分平方平均胸径  $D_g$  的平方,即

$$\bar{D} = a + b (1 + 1/c) \quad (8)$$

$$D_g^2 = b^2 \times (1 + 2/c) + 2ab (1 + 1/c) + a^2 \quad (9)$$

这样,给定平方平均胸径和算术平均胸径(由式 6 推算),通过以上两式经反复迭代求得尺度参数  $b$  和形状参数  $c$ ,而位置参数  $a$  为林分最小直径。

估计出 Weibull 分布函数的三个参数  $a, b, c$  后,各径阶的株数  $n_i$  可按下式求得:

$$n_i = N \times \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{L_i - a}{b} \right)^c \right] - \exp \left[ - \left( \frac{U_i - a}{b} \right)^c \right] \right\} \quad (10)$$

式中:  $U_i, L_i$  分别为第  $i$  径阶的上、下限。

### 2.3 林分收获模型

以直径分布为基础的林分收获量包括蓄积量和出材量,计算公式分别为:

$$M = \sum_{i=1}^k n_i \times V_i \quad (11)$$

$$M_{出} = \sum_{i=1}^k n_i \times V_i \times P_i \quad (12)$$

式中:  $M$  和  $M_{出}$  为林分蓄积量和林分某一材种的出材量,  $K$  为径阶个数,  $n_i$  第  $i$  径阶的林木株数,  $V_i$  为第  $i$  径阶单株材积,  $P_i$  为第  $i$  径阶某一材种的出材率。

#### 2.3.1 二元材积方程 采用福建省马尾松人工林二元材积方程

$$V = 0.000\ 094\ 29 D^{1.832\ 223\ 553} H^{0.819\ 725\ 549} \quad (13)$$

#### 2.3.2 二元材种出材率模型 利用马尾松人工林现场造材样木材料,建立经济材出材率模型:

$$Y_{经} = 1 - \exp \left[ - \frac{D^{0.272\ 7}}{12.664\ 66} \times \frac{H^{0.367\ 7}}{10.66} \right] \quad R = 0.976\ 3 \quad (14)$$

式中:  $Y_{经}$  代表经济材出材率,  $D$  为胸径,  $H$  为树高。

用 154 株未参加建模的实际造材样木,对经济材出材率模型进行理论值和实际值的差异显著性  $F$  检验,结果为:系统误差  $S = -0.184\%$ ,精度  $P = 99.39\%$ ,  $F$  值为  $F = 1.053$ ,这表明理论值与实测值差异不显著,单株出材率模型适用。

以经济材材积为 100%,建立大径材、中径材、小径材、非规格材四个材种的单株出材率模型。

$$Y_1 = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D - 29}{6.635\ 4} \right)^{1.156\ 9} \times \left( \frac{H}{43.098} \right)^{1.030} \right] \quad R = 0.981\ 8 \quad (15)$$

$$Y_2 = 0.006\ 388 (D - 21)^2 \times H^{0.685\ 6} \exp \left[ - 0.000\ 367\ 7 (D - 21)^2 \times H \right] \quad R = 0.974\ 3 \quad (16)$$

$$Y_3 = 0.891\ 85 \exp \left[ - 0.155\ 2 (D - 15) + 0.907 \ln (D - 15) + 0.096\ 65 H - 1.855\ 8 \ln H \right] \quad R = 0.871\ 4 \quad (17)$$

$$Y_4 = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D - 15}{7.679\ 9} \right)^{-0.818\ 5} \times \left( \frac{H}{4.804\ 7} \right)^{-0.833} \right] \quad R = 0.973\ 7 \quad (18)$$

以上各式中,  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  分别代表大径材、中径材、小径材、非规格材的材积占经济材材积的比值。为保证同一直径和树高中,四个材种出材率的理论值之和等于 100%,计算调整系数  $K: K = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4$ ,调整后的  $Y_i (i = 1, 2, 3, 4)$  值为:

$$Y_i = Y_i / K \quad (19)$$

最后,利用  $P_i = Y_{\text{经}} \times Y_i$  换算为相当于树干带皮材积的百分比,即出材率。

### 3 模型的应用

直径分布收获模型系统在森林经营管理中有着重要的作用,这里主要探讨该模型在生长预测和用材林林木资产评估及经济成熟龄确定中的应用。

#### 3.1 生长收获预测

应用该模型不仅可求出现实林分收获量,而且能预估未来若干年内林分的收获量。现举一实例说明直径分布收获模型在生长预测中的应用。

某块马尾松人工林经调查年龄为 18 a,优势高 14.8 m,平均高 13 m,平均胸径 14 cm,株数 1 850 株  $\text{hm}^{-2}$ ,蓄积量 181  $\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$ ,预测生长到 40 a 时各龄阶(2 a 为 1 个龄阶)的平均胸径、平均高、每公顷株数、蓄积量和各材种出材量。

3.1.1 现实收获量的预测 将优势高 14.8 m 代入(1)式,求得该林分地位指数为 16 m;由现实林分平均胸径 14 cm,按  $D_{\min} = 0.5 D_g$  估计出林分最小直径,作为 Weibull 分布的位置参数( $a = 7.0000$ ),再用(6)式求出林分的算术平均胸径  $D = 13.5 \text{ cm}$ ,按(8)、(9)两式迭代求得 Weibull 分布参数  $b = 7.8904$ ,  $c = 1.9147$ 。根据现实林分株数 1 850 株  $\text{hm}^{-2}$ ,用(10)式估计出各径阶的株数,结合相对树高曲线模型、二元材积方程和二元材种出材率模型,求得各径阶的材积及各材种出材量,具体求算结果见表 1。

表 1 现实林分收获预测表

径阶/ cm	树高/ m	株数/ (株 $\text{hm}^{-2}$ )	断面积/ ( $\text{m}^2 \text{hm}^{-2}$ )	蓄积量/ ( $\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$ )	经济材出材量/ $\text{m}^3$			
					大径材	中径材	小径材	非规格材
8	10.5	129	0.65	3.77				2.203
10	11.5	313	2.46	14.84				9.182
12	12.3	387	4.38	27.11				17.519
14	13.0	362	5.57	35.18				23.531
16	13.6	280	5.63	36.06			4.979	19.836
18	14.1	185	4.71	30.50			9.185	12.312
20	14.6	106	3.33	21.77			8.423	7.243
22	15.0	54	2.05	13.52		0.461	5.577	3.868
24	15.4	24	1.09	7.20		1.051	2.641	1.665
合计			29.87	189.95		1.512	30.805	97.359

3.1.2 未来林分收获量预测 未来林分收获量预测的原理和方法与现实林分收获量的预测基本相同,关键要掌握未来林分的林木株数和平均胸径。可用现实林分株数和平均胸径按(2)、(3)两式预测,但对于未来林分平均高和收获量(蓄积量及出材量)的预测值,则要进行修正。这是因为,现实林分平均高和收获量的预估值与实际值存在差异,这种差异若不修正势必影响到未来预估值的准确性,为此,计算林分平均高和收获量预估值的修正系数。

$$\text{平均高修正系数} = \frac{\text{现实林分平均高预估值}}{\text{现实林分平均高实际值}} = \frac{13.3158}{13} = 1.0243$$

$$\text{收获量修正系数} = \frac{\text{现实林分蓄积量预估值}}{\text{现实林分蓄积量实际值}} = \frac{189.95}{181} = 1.0495$$

将此修正系数乘以未来林分平均高和收获量(蓄积量和出材量)的预估值,即可求得从 18

a 起至 40 a 为止各龄阶的平均高和收获量。上述各林分因子未来预测值见表 2。

表 2 未来林分收获预测表

年龄/ a	平均胸径/ cm	平均高/ m	株数/ (株 hm <sup>-2</sup> )	断面积/ (m <sup>2</sup> hm <sup>-2</sup> )	蓄积量/ (m <sup>3</sup> hm <sup>-2</sup> )	经济材出材量/m <sup>3</sup>			
						大径材	中径材	小径材	非规格材
18	14.0	13.0	1 850	30.06	181.00		1.31	29.07	93.90
20	15.4	14.1	1 787	34.97	220.33		4.60	46.74	104.93
22	16.5	15.0	1 738	39.25	258.08		10.45	64.36	111.89
24	17.5	15.9	1 698	42.86	293.53	0.18	18.40	80.30	115.81
26	18.3	16.6	1 665	46.16	326.04	0.76	27.75	94.64	118.31
28	19.0	17.3	1 637	49.09	355.66	1.75	37.82	107.17	119.76
30	19.7	17.9	1 613	51.57	380.97	2.61	47.73	118.01	120.50
32	20.2	18.4	1 593	53.91	406.42	4.40	58.13	127.27	120.69
34	20.7	18.9	1 575	55.76	428.16	5.86	67.74	134.91	120.39
36	21.1	19.3	1 559	57.42	447.82	7.46	76.97	141.56	119.93
38	21.5	19.7	1 545	59.12	468.15	10.27	86.06	147.40	119.41
40	21.9	20.1	1 533	60.54	485.29	12.39	94.41	152.58	118.87

### 3.2 在用材林资产评估中的应用

在用材林的中龄林和近熟林林木资产评估中,通常采用收益现值法。该法是通过预测评估林木资产在主伐时纯收益的折现值,扣除评估日期到主伐期间所支出的营林生产成本折现值后的差额,作为林木资产评估值的方法<sup>[8,9]</sup>,其计算公式为:

$$E_n = \frac{A_U + D_a(1+p)^{U-a} + D_b(1+p)^{U-b} + \dots}{(1+p)^{U-n}} - \sum_{i=n}^U \frac{C_i}{(1+p)^{i-n+1}} \quad (20)$$

式中:  $E_n$  为林木资产评估值,  $A_U$  为林分  $U$  年主伐时的纯收入,  $D_a$ 、 $D_b$  为林分第  $a$ 、 $b$  年的间伐纯收入,  $C_i$  为第  $i$  年的营林生产成本,  $U$  为经营期,  $n$  为林分年龄,  $p$  为贴现率。

该法的关键是采用收获模型预估被评估林分在主伐时的木材产量,现仍用上述实例说明直径分布收获模型在用材林中、近熟林林木资产评估中的具体应用。

经过调查测算,得到有关马尾松人工林的技术经济指标见表 3。假定主伐年龄为 30 a,在此期间不进行间伐,林分属于自然生长。故利用直径分布收获模型评估该林分每公顷林木资产时,关键是确定主伐时的该林分纯收入  $A_U$ ,  $A_U$  为各材种纯收入之和。可按(21)式计算某一材种材积的纯收入  $A_{Ui}$ :

$$A_{Ui} = \text{该林分主伐时单位面积某个材种出材量} \times (\text{木材价格} - \text{成本和费用} - \text{税费} - \text{利润}) \quad (21)$$

根据上述技术经济指标,结合表 2 所预估主伐年龄为 30 a 时的各径阶材种出材量,测算出该林分单位面积的评估值  $E_n$  为 11 989.24 元。

表 3 马尾松人工林有关技术经济指标

利率/ %	管护费/ (元 hm <sup>-2</sup> )	税费/(元 m <sup>-3</sup> )		生产销售的 成本及费用/ (元 m <sup>-3</sup> )	利润/(元 m <sup>-3</sup> )		木材价格/(元 m <sup>-3</sup> )			
		规格材	非规格材		规格材	非规格材	规格材			非规格材
							大径材	中径材	小径材	
5	45	151.6	112.2	135.5	18	15	600	510	400	350

### 3.3 在确定经济成熟龄中的应用

森林经济成熟是指在森林生长发育过程中,货币收入达最多时的状态,此时的年龄称为经济成熟龄<sup>[10]</sup>。现仍用上述实例,分别不同的利率和主伐年龄按(20)式计算林木资产评估值,即经济收入(表4)。由此可知,利率相同时,单位面积的林木货币收入值随年龄增加而增加,至某一年龄时达到最大值,而后随年龄增加而下降。若给定主伐年龄,则单位面积林木的货币收入随利率的增加而减小。根据表4,可得到不同利率时所对应的货币收入达最大时的年龄,即经济成熟龄(表5)。

表4 不同主伐年龄和利率时单位面积的林木评估值

利率/ %	主伐年龄/a											
	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
3	12 576.63	15 367.07	17 663.71	19 560.17	21 027.89	22 007.12	22 750.17	23 054.25	23 130.33	23 144.86	22 913.71	
4	10 217.76	12 261.96	13 832.25	15 026.33	15 842.19	16 255.41	16 473.33	16 360.57	16 084.75	15 770.54	15 295.20	
5	8 292.34	9 775.25	10 821.96	11 531.80	11 921.22	11 989.24	11 906.29	11 583.02	11 151.87	10 705.89	10 162.63	
6	6 717.89	7 779.80	8 451.71	8 832.03	8 949.03	8 816.36	8 573.73	8 162.69	7 687.06	7 215.77	6 692.56	
7	5 428.20	6 175.51	6 581.50	6 741.51	6 690.54	6 450.45	6 135.25	5 706.86	5 245.92	4 802.88	4 338.57	
8	4 370.00	4 883.30	5 102.86	5 119.23	4 970.35	4 681.86	4 346.25	3 938.62	3 520.96	3 129.65	2 736.61	

表5 不同利率时的马尾松人工林经济成熟龄

利率/ %	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
经济成熟龄/ a	38	32	30	28	26	26

## 4 小结

采用参数回收技术建立直径分布收获模型,保证了林分变量间的一致性,实现了二类模型间的相互兼容。

直径分布收获模型和出材率模型的有机结合,实现了林分收获量(蓄积量和出材量)的动态预估,为森林资源资产评估及确定林分主伐年龄提供了客观依据。

在采用收益现值法时,利率的确定对林木的评估值有着重要的影响,进而影响到经济成熟龄的确定,因此对林木资产进行评估时,选择合适的利率至关重要。

不同的主伐年龄对于评估值也产生较大影响,主伐年龄过大或过小都不利于合理利用林木资源,只有确定合理的主伐年龄,才能使单位面积的林木评估值最大,单位面积的林地产生最多的货币收入。

直径分布收获模型系统的建立,为用材林林木资产评估和确定经济成熟提供了一条切实可行的途径。

本次直径分布收获模型是建立在林分自然生长的基础上,其株数预估模型仅反映林分在自然状态下株数的变化规律。在给定年龄时,通过株数预估模型所预测的株数会大于经间伐后人工林所保留的株数<sup>[11]</sup>,因为后者在主伐之前一般要经过2次间伐。这种差异表明:仅通过马尾松自稀而保留的株数并不能满足生产上的需要,在实际中应通过人为密度调控技术而获得最大的收益。另外,由于未涉及到人工间伐,因而不考虑间伐收入,对单位面积林木的评估值有一定影响。今后,应进一步研究间伐等措施对马尾松人工林的影响,建立更完善的直径分布收获模型,以提高它在实际中的应用价值。

**参考文献:**

- [1] 唐守正. 广西大青山马尾松全林整体生长模型及应用[J]. 林业科学研究, 1991, 4(增刊): 8~13
- [2] 孟宪宇, 邱水文. 长白山落叶松直径分布收获模型的研究[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(4): 9~15
- [3] Bailey R L, Dell T R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function[J]. For Sci, 1973, 19: 97~104
- [4] Little S N. Weibull diameter distributions for mixed stands of Western conifers[J]. Can For Res, 1983, 13: 85~88
- [5] 骆期邦, 吴志德. 相对树高曲线模型的研究和应用[J]. 中南林业调查规划, 1995, 14(2): 1~3
- [6] 孟宪宇. 使用 Weibull 函数对树高分布和直径分布的研究[J]. 北京林业大学学报, 1986(1): 40~48
- [7] 惠刚盈, 盛炜彤. 林分直径结构模型的研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(2): 127~131
- [8] 林业部财务司. 森林资源资产化管理有关规定选编[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997. 200~268
- [9] 陈平留. 森林资产评估[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996. 130~144
- [10] 于政中. 森林经理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991. 72~80
- [11] 唐守正. 同龄纯林自然稀疏规律的研究[J]. 林业科学, 1993, 29(3): 234~240

## Diameter Distribution Yield Model of *Pinus massoniana* Plantation and Its Application

YANG Jir-chang<sup>1</sup>, JIANG Xi-dian<sup>2</sup>, XU Huang-can<sup>1</sup>, WANG Su-ping<sup>2</sup>, YIN Guang-tian<sup>1</sup>

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

2. College of Forestry, Fujian University of Agriculture and Forestry, Nanping 353001, Fujian, China)

**Abstract:** The system of diameter distribution yield model of *Pinus massoniana* plantation contained three parts: the stand factor model, the parameter recover model of Weibull distribution and the stand yield model. This model system not only ensured the compatibility among stand variables, but also realized the dynamic prediction of stand structure and yield, which offered technological means to evaluate the forest property and to confirm the forest economic maturity.

**Key words:** *Pinus massoniana*; diameter distribution model; property evaluation; economic maturity