

# 遂昌县杉木人工林生长模型的研究

罗福裕 方延福 励龙昌

(浙江省遂昌县林业局, 遂昌 323300) (浙江林学院)

**摘要** 本文在分析生长方程的性质和种类的基础上, 用遂昌县 227 块标准地上测得的资料进行拟合。结果选择 Richards 方程, 建立了杉木人工林平均胸径、林分平均高、林分断面积和林分蓄积量生长模型, 并分析了遂昌县杉木人工林的生长特点、生长量和生长率。

**关键词** 杉木; 人工林; 生长曲线; 建立模型

**中图分类号** S791.270.6

杉木是遂昌县最重要的用材树种, 从 70 年代初大规模人工造林以来, 已有杉木人工林 56 278 hm<sup>2</sup>, 蓄积量 10 29 876 m<sup>3</sup>, 分别占全县杉木林面积的 63% 和蓄积量的 44%。同时, 该县又以每年 1 334~2 001 hm<sup>2</sup> 的速度营造杉木人工林。杉木人工林资源已成为该县最重要的后备森林资源。如何经营杉木人工林, 提高林地利用率是森林经营亟需解决的问题。为此本文试图通过对现有杉木人工林的调查, 研究其生长规律, 为森林经营、森林调查提供理论依据。

## 1 生长模型研究概述<sup>[1,2]</sup>

生长模型是一组反映林分生长的数学表达式。对生长模型的研究可追溯到 19 世纪的德国, 最早的生长模型是标准收获表。随着计算数学和计算工具的发展, 生长模型的研究也有了逐步进展, 有现实收获表、可变密度收获表、单木模型和过程模型等。到目前为止, 生长模型可分为过程模型和经验模型。过程模型就是人工模拟生态系统, 研究生态因子对林木或林分生长的影响, 进而总结其规律性。由于研究过程模型的复杂性和长期性, 在生产上应用较少。

经验模型则以回归估计为基础, 结合一定的理论方程, 用以研究不同年龄的树木或林分调查因子的数量。经验模型有两类, 一是全林分模型, 如回归模型、直径分布模型、随机过程模型、差分模型等。二是单木模型, 如单木与距离无关模型、单木与距离有关模型。这两类模型各有所长, 全林分模型建模简单、容易, 计算时间较短, 能反映林分调查因子的生长情况, 但对于单木的信息极少。而单木模型则以单株林木生长为主, 累加也能反映林分生长, 但其建模复杂, 计算时间较长。

收稿日期: 1992-04-19

## 2 标准地调查和设置

1991年7~8月在遂昌县境内采用典型选样法设置标准地。标准地要求尽可能包括各种立地条件信息和多年龄阶段林分生长信息；标准地必须是实生同龄杉木纯林，林内萌生株数不得超过10%，若有其他树种混生，杉木蓄积量不得少于90%；标准地应设置在不同海拔、不同母岩和不同土壤种类的林分中。在调查范围内应在最高海拔、生长最好和最差的林分（不是由于病虫害和人为影响造成）中设置标准地，使生长好、中、差的林分各占调查总数的1/3；标准地不允许设置在上层间伐过的林分，若该林分已进行过间伐，必须是间伐后5 a或间伐后重新郁闭的林分；标准地内不允许有林窗。

标准地按常规方法测量和调查。本次共调查227块标准地，标准地林分调查因子概况见表1。

**表1 标准地林分调查因子特征值**

Table 1 Attributes of stand inventory factors at plots

| 林分调查因子                                | 平均值   | 最小值   | 最大值   | 标准差   | 变动系数 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 年龄(a)                                 | 13.17 | 4.00  | 26.00 | 4.94  | 0.38 |
| 平均胸径(cm)                              | 8.26  | 1.60  | 18.10 | 3.21  | 0.39 |
| 平均树高(m)                               | 5.56  | 1.80  | 11.00 | 1.88  | 0.34 |
| 优势木平均高(m)                             | 7.36  | 2.30  | 12.90 | 2.26  | 0.31 |
| 地位指数(m)                               | 9.60  | 6.00  | 14.00 | 1.80  | 0.19 |
| 株数(株/hm <sup>2</sup> )                | 3 091 | 1 133 | 6 900 | 1 095 | 0.35 |
| 断面积(m <sup>2</sup> /hm <sup>2</sup> ) | 16.78 | 0.30  | 46.59 | 9.20  | 0.55 |
| 蓄积量(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) | 67.73 | 0.50  | 48.90 | 46.44 | 0.69 |

## 3 林分平均生长模型

生长模型一般按树种研究。常将林分调查因子表示为立地、密度和林龄的函数：

$$Y = f(SI, DS, t) \quad (1)$$

式中：Y为林分调查因子；SI为立地指标，地位级或地位指数；t为林龄(a)；DS为林分密度指标。

林分平均生长模型研究调查地区所有林分在平均地位指数、平均林分密度下的生长过程。在(1)式中，SI和DS为常数，可将其改为：

$$Y = f(t) \quad (2)$$

即为林分平均生长模型。

### 3.1 生长方程的性质

生长方程必须能反映林木的生长特点。林木的生长一般随年龄的增加呈“S”形曲线。假设林木生长方程为 $y = f(t)$ ，在数学上必须符合下述特点：

3.1.1 当 $t = 0$ 时， $f(t) = 0$ 是生物生长方程应满足的初始条件。

3.1.2 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\lim_{t \rightarrow \infty} [f(t)] = K$ , 生物生长有一极限。由于树木的生物学特性, 到一定阶段后不再继续生长。

3.1.3 当  $t_2 \geq t_1$  时,  $f(t_2) \geq f(t_1)$ , 树木的总生长量随着时间的增加而增加。

3.1.4 根据上述 3 个要求, 一般将树木生长量  $dy/dt$  表示为现有总量  $y$  和时间  $t$  的函数, 即

$$dy/dt = f(y, t)$$

### 3.2 生长方程的种类

常用的生长方程以回归估计为理论基础, 按方程中各参数的生物学意义, 有理论方程和经验方程之分。在理论方程中对各参数能作出生物学解释, 如 Richards 方程中 3 个参数都具有生物学意义, 而经验方程则不然。目前常用的生长方程有:

$$Y = a_1(1 - e^{-a_2 t})^{a_3} \quad (3)$$

$$Y = a_1 / (1 + a_2 e^{-a_3 t}) \quad (4)$$

$$Y = a_1 \cdot e^{a_2 e^{-a_3 t}} \quad (5)$$

$$Y = a_1 \cdot e^{a_2 t^{-a_3}} \quad (6)$$

$$Y = a_1(1 - a_2 e^{-a_3 t}) \quad (7)$$

$$Y = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \quad (8)$$

$$Y = a_1 + a_2 \ln t \quad (9)$$

式中:  $Y$  为林分或林木生长因子;  $t$  为林分发育时间( $a$ );  $a_1, a_2, a_3$  为待定参数。

### 3.3 生长方程的拟合和选择

对上述 7 个方程分别用线性回归和非线性回归(Marquardt 法)拟合。

相关系数能反映样本实测值和预估值的紧密程度, 相关系数越大, 剩余离差平方和越小, 则回归方程的估计精度越高。反之亦然。相关系数和剩余离差平方和关系如下:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中:  $R$  为相关系数,  $N$  为样本数,  $y_i$  为第  $i$  个样本的实测值,  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个样本的回归估计

值,  $\bar{y}$  为样本观察值平均数 ( $\bar{y} = \sum_{i=1}^N y_i / N$ )。从上式看, 用剩余离差平方和与相关系数选择回

归方程实质上是一回事。本次以相关系数作为回归方程的选择指标。相关系数最大的方程即为某一调查因子的生长方程, 当理论方程和经验方程的相关系数一致时, 选用理论方程。

### 3.4 生长方程的筛选

用本次调查的 198 个胸径样本数据拟合上述 7 个生长方程, 结果见表 2。从拟合结果看, 不论理论方程, 还是经验方程, 拟合效果均较理想, 相关系数都在 0.800 以上, 其中以方程 (1), 即 Richards 方程最佳, 这一点与其他研究结果相一致<sup>[3]</sup>。故在以后生长模型的研究中均选用该方程。

### 3.5 林分平均生长模型

杉木人工林平均生长模型包括林分平均胸径生长方程、平均树高生长方程、林分断面积

表2 林分平均胸径生长方程拟合结果

Table 2 Fitted parameters of average DBH growth equation

| 序号 | $a_1$     | $a_2$     | $a_3$     | R     |
|----|-----------|-----------|-----------|-------|
| 1  | 18.754 20 | 0.055 95  | 1.248 44  | 0.860 |
| 2  | 9.827 80  | 13.271 90 | 0.343 74  | 0.857 |
| 3  | 14.207 10 | -2.776 14 | 0.126 21  | 0.848 |
| 4  | 52.322 68 | -5.666 62 | 0.437 13  | 0.854 |
| 5  | 45.867 50 | 0.989 97  | 0.014 48  | 0.825 |
| 6  | 0.529 20  | 0.641 60  | -0.003 70 | 0.825 |
| 7  | -7.339 17 | 6.238 62  |           | 0.810 |

生长方程和林分蓄积量生长方程。将本次调查的标准地资料,随机选择80%的数据作为拟合样本,用于估计生长方程的参数,剩下的20%作为检验样本,检验生长方程的预估精度。各调查因子生长方程的参数见表3,各生长方程检验精度见表4。

表3 各林分调查因子生长方程拟合结果

Table 3 Parameters of growth equations for each stand inventory factors

| 林分调查因子 | 样本数 | $a_1$      | $a_2$       | $a_3$     | 相关系数  |
|--------|-----|------------|-------------|-----------|-------|
| 平均胸径   | 166 | 18.910 59  | 0.054 994 2 | 1.250 567 | 0.858 |
| 平均树高   | 191 | 9.244 57   | 0.085 728 3 | 1.283 698 | 0.948 |
| 林分断面积  | 167 | 23.899 98  | 0.217 171 2 | 5.580 546 | 0.836 |
| 林分蓄积量  | 167 | 102.341 30 | 0.228 619 2 | 8.444 529 | 0.863 |

表4 各林分调查因子生长方程检验结果

Table 4 Examinatorial prncision of growth equation estimation for each inventory factors

| 林分调查因子 | 样本数 | 平均误差(%) | 估计精度(%) |
|--------|-----|---------|---------|
| 平均胸径   | 32  | 0.58    | 99.42   |
| 平均树高   | 36  | 10.09   | 89.91   |
| 林分断面积  | 32  | 13.01   | 86.99   |
| 林分蓄积量  | 32  | 20.05   | 79.95   |

从上述拟合结果看(表3和表4),有两个明显不足,一是在拟合平均树高生长模型时,虽然相关系数为0.948,但根据该生长方程的特性,其极限生长仅9.24m,即林分最大平均高为9.24m,不符合杉木生长的特性。故对于林分平均高,用胸径-树高方程导算:

$$H = 28.3314(1 - 0.968062 \times e^{-0.02232D}) \quad (11)$$

$$R = 0.999$$

用32个检验标准地资料检验,平均误差为5.20%,估计精度94.08%。二是在表4中,检验林分蓄积量生长方程的估计精度,发现精度较低,仅79.95%。林分蓄积量除受林分发育时间的影响外,还与林分密度密切相关,现用下述方程拟合林分蓄积量的生长过程。

$$\ln(M) = a_0 + a_1/t + a_2 \ln G \quad (12)$$

式中： $M$ 为林分蓄积量， $G$ 为林分断面积。拟合得 $a_0=1.0203$ ， $a_1=-2.1191$ ， $a_2=1.1688$ ，用检验样本资料检验，其平均误差为4.10%，估计精度95.9%。

### 3.6 杉木人工林年蓄积生长量估测

综上所述，遂昌县杉木人工林平均生长过程见表5。发现遂昌县杉木人工林在第10年时连年生长量达到最大值，为 $8.5268\text{ m}^3$ ；在第15年时总平均生长量达最大值，为 $5.0766\text{ m}^3$ ；各龄级的平均年生长量见表6。遂昌县现有杉木人工林 $56278.2\text{ hm}^2$ ，理论年蓄积生长量为 $206555\text{ m}^3$ ，按面积加权蓄积生长率为75.54%，其中I龄级的生长率为40.00%，明显偏大。扣除这部分的影响，遂昌县杉木人工林的平均生长率为16.16%，而该县杉木人工林的实际生长率仅8.20%。

表5 遂昌县杉木人工林平均生长过程

Table 5 Average growth procedure of man-made forest of Chinese fir in Suichang

| 年 龄<br>(a) | 平均胸径<br>(cm) | 平均树高<br>(m) | 断 面 积<br>( $\text{m}^2/\text{hm}^2$ ) | 蓄 积 量<br>( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) | 平均生长量<br>( $\text{m}^3$ ) | 连年生长量<br>( $\text{m}^3$ ) |
|------------|--------------|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 4          | 2.49         | 2.39        | 1.15                                  | 1.92                                  | 0.4802                    | 1.4628                    |
| 5          | 3.18         | 2.78        | 2.40                                  | 5.05                                  | 1.0101                    | 3.1295                    |
| 6          | 3.87         | 3.17        | 4.07                                  | 10.06                                 | 1.6770                    | 5.0116                    |
| 7          | 4.54         | 3.55        | 6.03                                  | 16.74                                 | 2.3912                    | 6.6769                    |
| 8          | 5.20         | 3.91        | 8.11                                  | 24.59                                 | 3.0743                    | 7.8555                    |
| 9          | 5.83         | 4.25        | 10.19                                 | 33.06                                 | 3.6734                    | 8.4667                    |
| 10         | 6.45         | 4.58        | 12.16                                 | 41.62                                 | 4.1624                    | 8.5628                    |
| 11         | 7.04         | 4.89        | 13.97                                 | 49.88                                 | 4.5350                    | 8.2608                    |
| 12         | 7.61         | 5.19        | 15.58                                 | 57.58                                 | 4.7980                    | 7.6916                    |
| 13         | 8.16         | 5.47        | 16.98                                 | 64.55                                 | 4.9652                    | 6.9713                    |
| 14         | 8.69         | 5.74        | 18.18                                 | 70.74                                 | 5.0527                    | 6.1903                    |
| 15         | 9.19         | 5.99        | 19.20                                 | 76.15                                 | 5.0766                    | 5.4117                    |
| 16         | 9.68         | 6.23        | 20.05                                 | 80.83                                 | 5.0516                    | 4.6756                    |
| 17         | 10.14        | 6.46        | 20.76                                 | 84.83                                 | 4.9900                    | 4.0045                    |
| 18         | 10.58        | 6.67        | 21.34                                 | 88.24                                 | 4.9021                    | 3.4081                    |
| 19         | 11.00        | 6.87        | 21.82                                 | 91.13                                 | 4.7961                    | 2.8882                    |
| 20         | 11.40        | 7.07        | 22.22                                 | 93.57                                 | 4.6783                    | 2.4410                    |
| 21         | 11.78        | 7.25        | 22.54                                 | 95.63                                 | 4.5537                    | 2.0606                    |
| 22         | 12.14        | 7.42        | 22.80                                 | 97.37                                 | 4.4258                    | 1.7395                    |
| 23         | 12.49        | 7.58        | 23.01                                 | 98.84                                 | 4.2973                    | 1.4699                    |
| 24         | 12.82        | 7.73        | 23.18                                 | 100.08                                | 4.1701                    | 1.2447                    |
| 25         | 13.13        | 7.87        | 23.32                                 | 101.14                                | 4.0455                    | 1.0569                    |
| 26         | 13.43        | 8.01        | 23.43                                 | 102.04                                | 3.9246                    | 0.9008                    |
| 27         | 13.71        | 8.14        | 23.52                                 | 102.81                                | 3.8078                    | 0.7710                    |
| 28         | 13.98        | 8.26        | 23.60                                 | 103.47                                | 3.6955                    | 0.6632                    |
| 29         | 14.24        | 8.37        | 23.66                                 | 104.05                                | 3.5878                    | 0.5735                    |
| 30         | 14.48        | 8.48        | 23.70                                 | 104.55                                | 3.4849                    | 0.4987                    |

表6 遂昌县杉木人工林生长量预估表

Table 6 Increment estimation of man-made forest of Chinese fir in Suichang County

| 龄 级                                     | I        | II       | III     | IV      | I       | VI      | 合 计       |
|---|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 面 积(hm <sup>2</sup> )                   | 22 265.7 | 13 224.6 | 9 316.7 | 4 453.9 | 3 307.2 | 3 710.1 | 56 278.2  |
| 蓄 积(m <sup>3</sup> )                    | 136 316  |          | 433 126 |         | 205 288 | 255 146 | 1 029 876 |
| 平均蓄积(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )  |          | 3.84     |         | 31.45   | 62.07   | 68.77   | 18.30     |
| 连年生长量(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) | 1.01     | 7.31     | 6.91    | 3.48    | 1.51    | 0.68    |           |
| 年生长量(m <sup>3</sup> )                   | 22 488   | 966 72   | 64 378  | 15 500  | 4 994   | 2 523   | 206 555   |
| 生 长 率(%)                                | 40.00    | 31.34    | 11.73   | 4.11    | 1.56    | 0.66    |           |

## 4 结 论

4.1 本次探讨用一组生长方程来反映杉木人工林的平均生长过程,经用样本资料拟合发现在众多的生长方程中以 Richards 方程最佳。

4.2 在研究遂昌县杉木人工林平均生长模型时,建立了各林分调查因子生长模型。其中林分平均高生长模型,由于生长方程特性的限制,改用林分平均胸径来预估林分平均高;林分蓄积量生长方程的估计精度较低。经分析,林分蓄积量和林分断面积关系密切。

4.3 经对遂昌县杉木人工林生长模型发现在16 a时达到数量成熟,用生长模型计算其生长量和生长率,发现明显高于实际生长率。普遍来说,杉木人工林经营水平偏低,实际生长率仅为理论生长率的50.7%,未能发挥林地的生产力。如加强杉木人工林的经营,提高其生长量,可使该县杉木人工林的年生长量提高到206 555m<sup>3</sup>,比实际生长量增加132 279m<sup>3</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 励龙昌. 东北林业大学学报, 1990, 18(4), 22~28
- 2 白云庆, 郝文康. 测树学. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1987, 258~287
- 3 Pinneer L V, Turnbill K J. *For. Sci.* 1973, 19(1), 2~22

Luo Fuyu (Forest Enterprise of Suichang, Suichang 323300, PRC), Fang Yanfu, Li Longchang. Study on Growth Model of Man-made Forest of Chinese Fir in Suichang County. *J. Zhejiang For. Coll.*, 1993, 10(1): 49~54

**Abstract:** Growth equations are fitted with the data measured at 227 plots in Suichang County based on discussing the natures and types of these equations. This paper selects Richards equation as the growth equation of stand inventory factors, establishes the growth model of stand average DBH, stand average height, stand basal area and stand volume of man-made forest of Chinese fir and analyses characteristics, increment and growth rate of the forest in Suichang.

**Key words:** Chinese fir; man-made forest; growth curve; modelling