

# 基于单木过程模型的杉木林分生长模拟研究

马莉燕<sup>1</sup>, 张怀清<sup>1\*</sup>, 李永亮<sup>1</sup>, 郭明春<sup>2</sup>, 张晔瑾<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 河北科技师范学院园艺科技学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**基于林分尺度的3-PG模型原理,在考虑单木林分生理生态过程的基础上,改进了生物量积累和分配子模型,建立适应于单木生长的生理生态过程模型,实现基于单木过程模型的林分生长预测。选择胸径和树高生长量2个指标与实测值对比分析,结果表明:改进模型对胸径和树高生长量的模拟平均精度分别为95.57%和91.16%,均明显高于3-PG模型对应的89.4%和85.18%的平均模拟精度,改进模型的模拟精度显著提高,模拟效果更好。

**关键词:**3-PG模型;单木生长模拟;杉木林分生长

中图分类号:S791.27

文献标识码:A

## Growth Simulation of Chinese Fir Based on Individual-Tree Process Model

MA Li-yan<sup>1</sup>, ZHANG Huai-qing<sup>1</sup>, LI Yong-liang<sup>1</sup>, GUO Ming-chun<sup>2</sup>, ZHANG Ye-cheng<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. College of Horticulture Science and Technology, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

**Abstract:** The biomass production model and distribution model were improved based on 3-PG model theory, so as the individual tree growth model could be established to achieve the growth forecast of the Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) stand. In this study, the diameter at breast height (DBH) and height (H) were used to evaluate and compare the results of the model simulation and field data. It showed that the average analog precisions of DBH and H of the improved model were respectively 95.57% and 91.16%, significantly higher than that of the 3-PG model, whose precisions were 89.4% and 85.18%. The simulation accuracy of the improved simulation model was significantly higher and the simulation results were better.

**Key words:** 3-PG model; individual tree growth model; Chinese fir; stand growth

林分动态的三维图形模拟可将林分调查所得的数据以立体图像的形式反映出来,既能真实的反映实际林分的生长状况,又能满足人们的视觉要求<sup>[1]</sup>。完善的模型能为合理地经营森林提供理论基础、操作依据和量化信息,并对林分结构与生长的可视化表达具有重要意义。3-PG模型是由Landsberg和Waring在1997年开发的一个简单的林分水平上的过程模型,充分考虑了气候、立地条件、肥力和林龄等多种因素对生理过程的影响,以此来模拟林分的动态生长过程<sup>[2]</sup>。该模型因参数录入量小且易于获

取,现已应用于多个国家和地区不同树种的研究中<sup>[3]</sup>。Almeida等运用3-PG模型作为管理位于巴西的大面积速生桉树(*Eucalyptus* spp.)人工林的决策支持工具<sup>[4]</sup>。Coops等开发了支持遥感数据的模拟软件3-PGS,利用遥感卫星图像作为输入信息来预测位于澳大利亚及新西兰的样地特征,预测精度较高<sup>[5]</sup>。Olga利用3-PG模型结合GIS来预测美国太平洋西北地区杨树(*Populus* spp.)在不同管理和气候条件下的生物质产量<sup>[6]</sup>。以上应用充分体现了3-PG模型预测大面积林分动态的能力。最早的3-PG

收稿日期:2014-11-26

项目基金:“十二五”国家863计划课题(2012AA102002);国家自然科学基金(31170590)。

作者简介:马莉燕(1989—),女,在读硕士,主要研究方向:林分结构与生长可视化模拟。

\* 通讯作者:研究员,硕士生导师,主要从事林业可视化模拟技术研究。

模型主要用于蓝桉 (*Eucalyptus globules* Labill.) 和巨桉 (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden) 的生产力预测<sup>[7]</sup>, 现在可以针对特定树种将模型参数化, 使其应用越来越广泛。但是, 3-PG 模型在一些应用中仍存在局限性; 3-PG 模型作为一个林分尺度的生长预测模型, 并不能很好地反映每株林木的实际生长; 该模型一般在预测内部结构无明显差异的纯人工林生长上表现突出, 但针对比较复杂的原生态林分模拟效果不佳。本研究采用 3-PG 建模原理, 建立一套充分考虑林木生理和生态环境的过程模型, 对林分单木与环境交互作用下的生理生长过程进行分析, 实现林分单木的形态与生长过程模拟, 通过统计林分单木模拟结果就可推出整体林分的结构与生长过程模拟。

## 1 试验材料

研究区位于湖南省株洲市攸县黄丰桥国有林场, 130°04'~113°43' E, 27.04'~27.06' N, 地貌以中低山为主, 海拔在 115~1 270 m 之间。该区属中亚热带季风湿润气候, 光热水资源丰富, 年平均气温 17.8℃, 1 月平均气温 4.2℃, 7 月平均气温 26.5℃, 年平均日照时数 1 612 h, 年平均降水量 1 410.8 mm, 降水主要集中在春季, 占全年降水量的 40%, 年

平均无霜期 265 d, 土壤主要为低山丘陵红壤、黄壤, 坡度一般在 20°~25°之间<sup>[8]</sup>。林场的森林覆盖率为 86.24%, 树种主要以杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、松类 (*Pinus* spp.) 为主, 其中杉木面积 3 197.6 hm<sup>2</sup>, 蓄积 593 738 m<sup>3</sup>, 全部为人工造林。本文选用位于黄丰桥林场柏市分场的 1999 年杉木人工林 (30 m × 30 m) 固定样地, 样地林木株数为 120 株, 以 2008 年林木调查数据作为数据源, 林分环境因子采集湖南攸县气象站 2008 年气象数据, 其中包括月平均温度、月平均最高温度、月平均最低温度、太阳总辐射和月平均降水量等, 模型验证数据取自 2013 年该样地的单木实测数据。

## 2 研究方法——模型改进

3-PG 模型包括 4 个子模型: 生物量积累子模型、生物量分配子模型、林木凋亡子模型和土壤水分平衡子模型, 本研究在考虑单木林分的生理生态过程的基础上, 充分考虑单木生理特征以及林分内部结构对单木生长的综合影响, 改进其中的生物量积累子模型和生物量分配子模型, 并通过数据反复模拟效果进行模型优化, 最终建立单木生理生态生长模型。具体改进过程如下, 改进模型与 3-PG 模型对比情况如表 1 所示。

表 1 改进模型与 3-PG 模型对比

子模型	3-PG 模型	改进模型	改进依据
光合有效辐射 APAR:	$APAR = RAD * (1 - e^{-k * Li/\delta}) * \delta$	$APAR = RAD * (1 - e^{-k * Li}) * \frac{\overline{cw}}{cw_i} * (f(o) - 1)$	考虑了空间结构对单木林分获取光照养分的强度影响
冠层量子效益 $a_c$ :	$a_c = a_{cx} * f(P) * f(T) * f(F) * f(N)$	$a_c = a_{cx} * f(P) * f(T) * f(F) * f(N) * f(C)$	考虑了林木的竞争因子
根生物量分配比例 $\eta_R$ :	$\eta_R = \frac{\eta_{Rx} \eta_{Rn}}{\eta_{Rn} + (\eta_{Rx} - \eta_{Rn}) m\varphi}$	$\eta_R = \frac{\eta_{Rx} \eta_{Rn}}{\eta_{Rn} + (\eta_{Rx} - \eta_{Rn}) m\varphi (1 - n)}$	考虑了光照对根生物量分配的影响

### 2.1 生物量积累子模型改进

生物量的积累利用林木生态机理模型, 同时考虑温度、降水、光照、土壤等多个环境因子来建立生物量生产过程, 允许不同时期有不同的模型限制因子, 对讨论林木自身和环境因素对林木生长的生理生态过程影响进行定量研究。本研究在 3-PG 模型<sup>[9]</sup>中经验生产子模型的基础上, 充分考虑单木的冠幅、开阔比数及林木竞争等具体影响因素, 对光合有效辐射模型和冠层量子效益模型进行了改进。

(1) 光合有效辐射 APAR:

$$APAR = RAD * (1 - e^{-k * Li}) * \frac{\overline{cw}}{cw_i} * (f(o) - 1) \quad (1)$$

式中:  $RAD$  是太阳总辐射,  $Li$  是单木叶面积指

数,  $k$  是消光系数,  $f(o)$  是单木的开阔比数,  $cw_i$  是第  $i$  株单木的冠幅,  $\overline{cw}$  是结构单元中的平均冠幅。

该子模型中底数方程  $\frac{\overline{cw}}{cw_i} * (f(o) - 1)$  是单株木获取光照养分的强度分析, 使得光合有效辐射计算更加合理。单木的有效冠幅越大, 获取有效光照就越充分。

(2) 冠层量子效益  $a_c$ :

$$a_c = a_{cx} * f(P) * f(T) * f(F) * f(N) * f(C) \quad (2)$$

式中:  $a_{cx}$  是光能利用率的取值上限,  $f(P)$  是生理修正因子,  $f(T)$  是温度修正因子,  $f(F)$  是冰冻修正因子,  $f(N)$  是养分修正因子,  $f(C)$  是林木竞争强

度修正因子。

该子模型在原有基础上增加林木竞争强度修正因子,  $f(C)$  为单木竞争能力与邻体结构单元(包括对象单木)中最大竞争能力的比值。实际林地中单木的竞争能力有差异,竞争能力越大,获取土壤养分就多,光合生产能力就大,这种差异在土壤贫瘠的林分中表现更为明显<sup>[10]</sup>。

(3) 净初级生产量  $NPP$ :

$$NPP = 0.552 * a_c * APAR * C_{pp} \quad (3)$$

式中:  $C_{pp}$  是净、总生产量之比。

## 2.2 生物量分配子模型改进

生物量分配主要指光合作用同化的碳,以碳水化合物形式在林木不同器官组织间分配,从而调控林木的生长。3-PG 模型中碳量按一定比例分配给树叶、树干和树根<sup>[11]</sup>,高光照水平下,林木将加大对根的生物量分配,低光照水平下增加对叶的生物量分配<sup>[12]</sup>。因此,本研究具体考虑光照、土壤以及林木竞争对生物量分配的影响,各器官生物量分配模型公式如下:

(1) 根生物量分配比例  $\eta_R$ :

$$\eta_R = \frac{\eta_{Rv} \eta_{Rn}}{\eta_{Rn} + (\eta_{Rv} - \eta_{Rn}) m \varphi (1 - n)} \quad (4)$$

其中,  $m = [m_0 + (1 - m_0) FR] * q$ ;  $n = n_0 * [1 - e^{-k} + e^{-k} * f(o)]$

式中,  $\eta_R$  为根生物量分配比例,  $\eta_{Rv}$  为根系生物量分配比例取值上限,  $\eta_{Rn}$  为根系生物量分配比例取值下限,  $m$ 、 $n$  分别为土壤肥力、光照对分配比例的影响系数,  $\varphi$  为生理影响综合因子;  $FR$  为林分土壤肥力等级,  $q$  为林分平均竞争与林木竞争之比,  $m_0$  为  $FR$  取零时  $m$  的取值,  $n_0$  为每月实际  $PAR$  与年平均  $PAR$  的比值,  $f(o)$  为单木的开阔比数。

(2) 叶生物量分配比例  $\eta_S$ :

$$\eta_S = \frac{1 - \eta_R}{1 + P_{FS}} \quad (5)$$

(3) 干生物量分配比例  $\eta_F$ :

$$\eta_F = P_{FS} \eta_S \quad (6)$$

式中,  $P_{FS}$  为干、叶间生物量的比例。

## 3 模拟结果与分析

将 2008 年样地林木相关数据参数,应用改进模型,得到 2008—2013 年单木生长量以及分配到各器官的量,2008 年样地每月林分各器官的增长生物量如表 2 所示。由于实际测量中,单木各器官的生物

量无法直接测得,而胸径和树高是表征单木生长的直接指标,可以反映出单木各器官的生物量分配与增长的情况,并且容易实际测量,因此选择胸径和树高两个指标进行分析。林木各组织所分配的生物量进行形态结构生长的可视化过程通常采用生物量与胸径、树高等形态参数之间的异速生长方程,本研究中主要借鉴其他研究者得出的杉木异速生长方程,如干生物量回归方程、叶生物量回归方程等<sup>[9,13]</sup>。最后对比分析单木预测生长量与实际生长量的吻合程度,评价预测模拟效果,2008—2013 年样地单木胸径及树高生长量模拟情况如表 3 和表 4 所示。

表 2 2008 年每月林分各器官的增长生物量

月份	干生物量/kg	叶生物量/kg	根生物量/kg
1	0.198 7	0.023 4	0.041 8
2	0.170 1	0.018 3	0.035 5
3	0.418 9	0.049 4	0.088 6
4	0.518 6	0.056 0	0.109 0
5	0.652 3	0.078 2	0.138 8
6	0.759 2	0.098 6	0.163 1
7	1.129 6	0.169 4	0.247 4
8	0.749 2	0.104 8	0.162 3
9	0.581 3	0.075 5	0.124 6
10	0.271 8	0.032 6	0.057 5
11	0.203 9	0.022 0	0.039 5
12	0.228 1	0.024 6	0.044 1
年总计量	5.882 1	1.252 7	0.753 4

由表 2 可知,林分生长过程中生物量的增长在单木各器官的分配比例不同,干 > 根 > 叶。各器官的生物量增长量先逐月增加后逐月减少,最大相差约 7 倍,7 月份各器官的生物量增长最快。说明气候条件对林分生物量增长影响显著,充足的光照和降水以及较高的气温条件有利于林分快速生长。

由表 3 可知,改进模型的模拟平均精度达到 95.57%,3-PG 模型的模拟平均精度为 89.4%。因此,改进模型的模拟精度明显高于 3-PG 模型,模拟效果更好。

由表 4 可知,改进模型的模拟平均精度达到 91.16%,3-PG 模型的模拟平均精度为 85.18%。因此,改进模型的模拟精度明显高于 3-PG 模型,模拟效果更好。

将改进模型与 3-PG 模型得出的单木胸径和树高的生长量模拟值分别与对应的实测值进行回归分析,结果如图 1 和图 2 所示。改进模型对单木胸径生长量的模拟能够满足 93.81% 的相应实际生长量

表3 2008—2013年单木胸径生长量模拟

实测值		改进模型		3-PG 模型	
2008 年/cm	2013 年/cm	2013 年模拟/cm	精度	2013 年模拟/cm	精度
18.9	21.2	21.8	0.971 7	22.3	0.948 1
12.4	18.2	17.1	0.939 6	15.8	0.868 1
9.3	11.0	10.9	0.990 9	12.7	0.845 5
14.8	17.4	18.7	0.925 3	18.2	0.954 0
11.8	13.4	13.8	0.970 1	15.2	0.865 7
14.3	18.9	18.1	0.957 7	17.7	0.936 5
15.9	20.4	19.5	0.955 9	19.3	0.946 1
15.2	22.5	21.2	0.942 2	18.6	0.826 7
15.0	17.8	18.9	0.938 2	18.4	0.966 3
11.9	13.5	13.8	0.977 8	15.3	0.866 7
18.6	20.3	20.1	0.990 1	22.0	0.916 3
10.1	12.3	13.1	0.935 0	13.5	0.902 4
14.1	20.8	19.3	0.927 9	17.5	0.841 3
15.5	21.1	21.5	0.981 0	18.9	0.895 7
13.6	19.1	18.1	0.947 6	17.0	0.890 1
15.7	21.2	20.3	0.957 5	19.1	0.900 9
12.0	17.7	16.9	0.954 8	15.4	0.870 1
11.9	14.2	14.7	0.964 8	15.3	0.922 5
12.3	18.8	17.2	0.914 9	15.7	0.835 1
14.6	20.4	19.8	0.970 6	18.0	0.882 4
...					
平均			0.955 7		0.894 0

表4 2008—2013年单木树高生长量模拟

实测值		改进模型		3-PG 模型	
2008 年/m	2013 年/m	2013 年模拟/m	精度	2013 年模拟/m	精度
8.3	14.0	12.7	0.907 1	12.6	0.900 0
5.2	15.7	13.7	0.872 6	11.5	0.732 5
7.1	14.5	13.6	0.937 9	11.4	0.786 2
8.1	14.4	12.5	0.868 1	12.4	0.861 1
8.7	15.2	13.2	0.868 4	13.0	0.855 3
7.2	13.4	12.4	0.925 4	11.5	0.858 2
8.1	12.9	12.5	0.969 0	11.4	0.883 7
7.7	13.2	13.7	0.962 1	12.0	0.909 1
7.3	15.0	12.6	0.840 0	11.6	0.773 3
7.1	14.1	12.7	0.900 7	11.4	0.808 5
8.4	14.2	12.7	0.894 4	12.7	0.894 4
6.7	14.7	12.6	0.857 1	11.0	0.748 3
7.4	14.9	12.9	0.865 8	11.7	0.785 2
8.4	14.7	13.4	0.911 6	12.7	0.863 9
7.8	14.8	13.2	0.891 9	12.6	0.851 4
8.8	12.0	12.1	0.991 7	13.1	0.908 3
...					
平均			0.911 6		0.851 8

变化,较之 3-PG 模型对应的 90.85% 有显著提高;改进模型对单木树高生长量的模拟能够满足 84.47% 的相应实际生长量变化,较之 3-PG 模型对应的 81.34% 也有显著提高。因此,基于单木生长过程的改进模型基本能够适用于杉木林分的生长

模拟。

改进的生理生态模型对杉木林分生长的预测效果可通过二维和三维可视化图像展示出来,生长后的林分模拟图像如图 3 所示。二维图反映了林分单木的胸径生长量及其在林地的分布情况,可以看出,

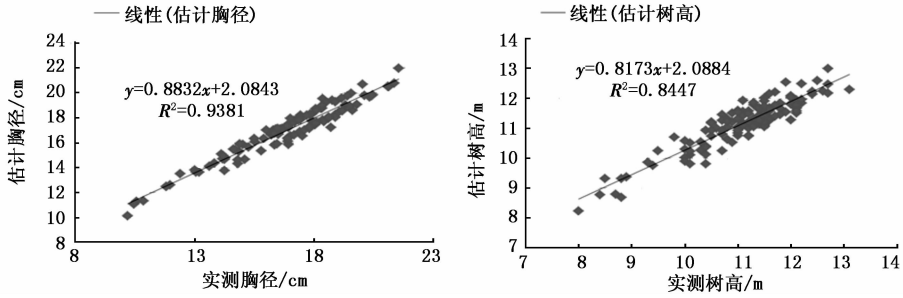


图1 改进模型的模拟值与实测值回归分析

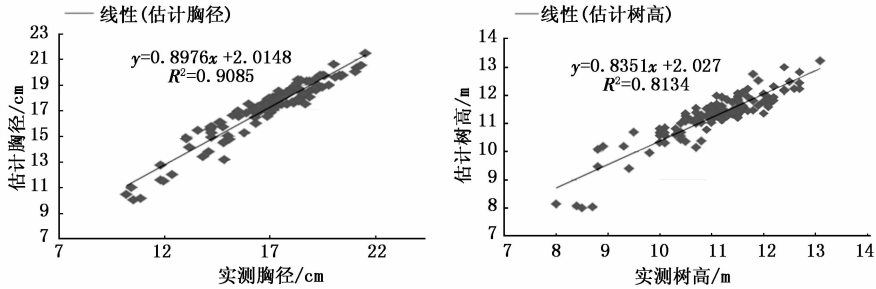


图2 3-PG模型的模拟值与实测值回归分析

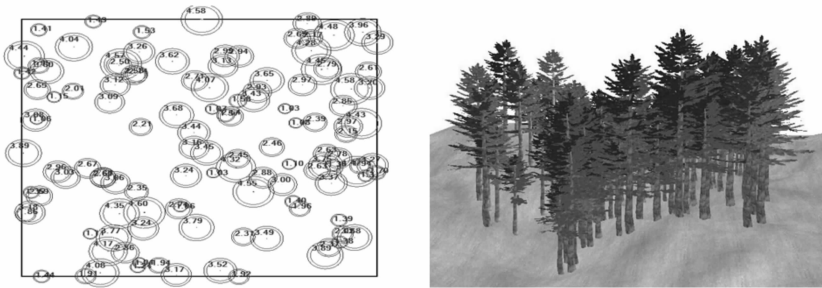


图3 生长后的林分模拟图

由于单木在林地的分布疏密不同,造成光照、水分、土壤肥力等分配不均,单木胸径生长量也不同,相对密集处的林分单木冠幅差异更大。三维图可以清楚直观地反映林分的空间结构及其生长状况,说明改进模型对杉木林分的生长模拟具有参考意义。

## 4 结论

运用改进模型对杉木生长过程进行模拟,选择胸径和树高生长量2个指标与实测值对比分析,结果表明:模型模拟值与观测值呈显著相关关系( $P < 0.001$ ),对应的模拟值能有效地解释胸径90%以上的变化,对树高也能达到85%以上,说明基于单木生长过程的改进模型适用于杉木林分生长预测。改进模型对胸径、树高的平均模拟精度均明显高于3-PG模型,说明改进模型的模拟精度显著提高,模拟效果更好。

模拟二维图反映了林分单木的胸径生长量及其在林地的分布情况,三维图清楚直观地反映出林分的空间结构及其生长状况,进一步验证了改进模型,说明基于单木过程模型的杉木林分生长模拟对林分生长预测以及可视化具有参考作用。

本研究中的改进模型,综合考虑了林木自身以及空间结构带来的生长影响,对杉木林分中单木的生长预测具有较高的精度,并对天然混交林中林木的生长预测同样适用。但是,模型中参数仍然较多,获取较复杂,常常参考其它研究中的参数,因此该模型在林分生长模拟中的应用还有一定限制,进一步优化模型具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 刘彦君,游先祥,叶影. 三维可视化技术在林业中的应用研究进展[J]. 林业调查规划,2010,35(6):9-13.

- [2] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95:209–228.
- [3] 郭明春, 刘建峰. 杉木人工林林分生长模拟[J]. *福建林学院学报*, 2011, 31(1): 65–68.
- [4] Almeida A C, Landsberg J J, Sands P J. Parameterisation of 3-PG for Fast Growing *Eucalyptus grandis* Plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 193(1–2):179–195.
- [5] Coops N C, Waring R H, Landsberg J J. Estimation of potential forest productivity across the Oregon transect using satellite data and monthly weather records[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22, 3797–3812.
- [6] Olga P, Quinn H, Justin M. Design of a GIS-Based Web Application for Simulating Biofuel Feedstock Yields[J]. *ISPRS Int J Geo-Inf*, 2014, 3(3), 929–941.
- [7] 花利忠, 江希钿. 3-PG 模型在华南尾叶桉人工林的应用研究[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2):100–104.
- [8] 梁诗博. 杉木林分生长与环境交互过程可视化模拟研究[D]. 中国林业科学研究院, 2012.
- [9] 赵梅芳. 基于 3-PG 机理模型的杉木林碳固定及蒸散量模拟研究[D]. 中南林业科技大学, 2008.
- [10] 方宗辉. 福建省杉木人工林生物量及其分配研究[J]. *福建林业科技*, 2005, 32(3):82–85.
- [11] 朱智强, 蒋菊生. 3-PG 生长模型及其在橡胶树栽培领域的应用[J]. *热带农业科学*, 2010, 30(7):4–7.
- [12] 侯振宏, 张小全, 徐德应. 杉木人工林生物量和生产力研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(5):97–103.
- [13] 张 林, 黄 永, 罗天祥, 等. 林分各器官生物量随林龄的变化规律——以杉木、马尾松人工林为例[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2005, 22(2):171–178.