2022, 35(1): 158-165
http://www.lykxyj.com

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.01.018

3-PG 模型在天然兴安落叶松林生长因子预测中的应用

曲凌昊，赵秀海*，张春雨

(北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点实验室 北京 100083)

摘要:［**目的**］运用过程模型模拟天然林的生物量及蓄积生长。［**方法**］以大兴安岭落叶松天然林为研究对象，探索研究基于生理过程的动态模型 3-PG 模型在天然林中的应用情况，通过调整模型内置模块方程的参数，优化实测值与模拟值的拟合结果，最终得出适用于该地区落叶林天然林的模型参数组，并对不同林龄的林分预测效果进行了对比。［**结果**］模型在胸径、枝干生物量、根生物量、地上生物量、整株生物量的模拟取得了很好的效果，其中枝干生物量与整株生物量的模拟值与实测值的相关系数 R^2 达到了 0.98，且平均相对误差均控制在 8% 以内。对不同林龄林分的整株生物量与胸径预测结果表明，模型对 3 个龄组都有很好的拟合效果。［**结论**］在进行参数本地化调整后，3-PG 模型可以运用在落叶松天然林的生长预测中，在生物量预测与胸径预测上可以取得较好的效果。

关键词: 天然林；兴安落叶松；3-PG 模型；生物量

中图分类号: S758.5　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1001-1498(2022)01-0158-08

兴安落叶松（*Larix gmelinii*（Rupr.）Kuzen）是松科落叶松属的落叶乔木树种，具有耐寒耐湿的特点。兴安落叶松林可促进改善东北地区生态环境，对我国东北地区森林可持续发展有着不可替代的作用[1]，且对全球碳平衡有重要影响[2]。针对大兴安岭地区的天然落叶松林，多位专家学者已有一定程度的研究积累，主要有：单木层次上，有单木的生长规律研究[3]，单木直径生长模型构建[4]，地上生物量模型构建[5]等；林分层次上，直径与树高分布研究[6]、结构特征研究[7]、材积源生物量模型研究[8]等。上述经验模型是森林生长和收获的主要模拟手段，然而其对环境变化、人为干扰下天然落叶松林生长和产量预测具有局限性[9]。与经验模型相比，过程模型可以充分考虑林木生长生理过程的相互作用与反馈机制，考虑不同气温、养分、降水对林木生长的影响。然而，到目前为止，在东北地区应用过程模型模拟天然林林分生长的研究仍十分有限。3-PG 模型（Physiological Processes Predicting Growth）是由 Landsberg 和 Waring[10] 创建的一种基于过程的生长预测模型，通过碳吸收与固定、生物量分配与损耗以及土壤水分动态平衡 3 个模块，构建方程来实现动态模拟，可以充分发挥过程作为过程模型的优势。目前该模型已被多个国家和地区广泛用于人工林经营管理研究[11]，国内也有学者在桉树（*Eucalyptus robusta* Smith）[12] 人工林、马尾松（*Pinus massoniana* Lamb.）人工林[13] 进行了参数化与生长预测，结果较为可靠，但尚未见运用于天然林的报道。本研究以天然兴安落叶松林为研究对象，运用 3-PG 模型对胸径、树高、整株与各组分生物量进行了拟合，探索该模型在天然林中应用的可行性，为制定相关森林经营计划提供参考。

收稿日期：2021-08-30　　修回日期：2021-10-29
基金项目：国家重点研发计划重点专项项目（2017YFC0504005）；国家自然科学基金项目（31971650）
* 通讯作者: 赵秀海，博士，教授。主要研究方向：森林经营学、森林生态学。Email: zhaoxh@bjfu.edu.cn

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

本研究在我国东北地区的大兴安岭山脉开展。大兴安岭是中国唯一的寒温带明亮针叶林区和仅有的寒温带生物基因库，其森林覆盖率高达 79.83%[14]，属寒温带大陆性季风气候，冬长夏短，全年霜冻期长达 180 d，土壤类型主要为棕色针叶林土与暗棕壤，树种主要以兴安落叶松为主，其次为白桦（*Betula platyphylla* Suk.）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.）、蒙古栎（*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.）、红皮云杉（*Picea koraiensis* Nakai.）等，生态系统结构丰富[15]。

1.2　野外调查与数据获取

2017 年夏季，在大兴安岭山脉构建面积为 1 000 m^2、半径为 17.85 m 的样地，确保样地内胸径大于 5 cm 的兴安落叶松的株数占比大于 80%，以此为基础构建的样地认定为纯林样地。利用罗盘仪与手持 GPS 获取经纬度、海拔数据，样地的经度范围为 120.44°～124.51° E，纬度范围为 47.53°～53.32° N；海拔范围为 283.3～1 087.7 m，坐标分布见图 1。对样地内所有胸径≥5 cm 的兴安落叶松进行每木检尺，并记录其胸径、树高。然后使用内径为 5.15 mm 的生长锥对目标树进行年轮条采样，由北向南在高度 1.3 m 处垂直树干钻入，且钻取的深度超过髓心 2～3 mm。将取出的年轮条进行编号、干燥、打磨，使用游标卡尺测量最近 5 年的胸径生长量，结合每木检尺的胸径数据计算 2012 年样地内单株木的胸径。根据样地实测数据，选取各样地树高前 10% 的个体作为该样地的优势木；对该部分林木的年轮条进行测算，提取树龄信息，取平均值作为林分年龄，划分林分发育阶段[16]，同时满足模型对林分模拟阶段初始年龄的输入要求。

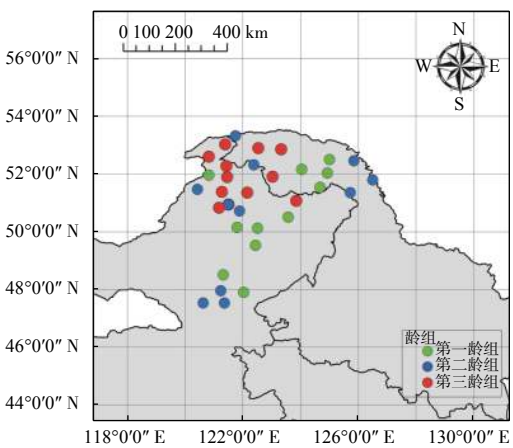

图 1　研究区样地坐标分布

Fig. 1　Coordinates of sample plots in research area

以 2016 年最新发布的《中华人民共和国林业行业标准中》的“立木生物量模型及碳计量参数——落叶松”为参考[17]，选择适用于大兴安岭的模型，获取落叶松单株的地上、地下及分项生物量数据，以样地为单位，分别累加得到该样地各组分及总生物量。结合样地实测的胸径与树高数据，选用二元模型进行相应指标的计算。计算公式如下：

$$M_A = 0.068\,48 D^{2.015\,49} H^{0.591\,46} \tag{1}$$

$$M_1 = \frac{1}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A \tag{2}$$

$$M_2 = \frac{g_1}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A \tag{3}$$

$$M_3 = \frac{g_2}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A \tag{4}$$

$$M_4 = \frac{g_3}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A \tag{5}$$

$$g_i = b_{i0} D^{b_{i1}} H^{b_{i2}} \tag{6}$$

$$M_B = 0.044\,407 D^{2.402\,55} H^{-0.049\,798} \tag{7}$$

式中：

M_A——地上生物量（kg）。

D——林木胸径（cm）。

H——林木树高（m）。

M_1、M_2、M_3、M_4——分别为树干、树皮、树枝、树叶的生物量估计值（kg）。

g_1、g_2、g_3——分别为树皮、树枝、树叶生物量与树干生物量的比例。

b_{i0}, b_{i1}, b_{i2}——分别为二元模型的参数，其中 $i = 1$，2，3，分别代表树皮、树枝、树叶。

M_B——地下生物量估计值（kg）。

参考该区域落叶松的生物量转换因子函数对应的二元立木材积模型，得到样地内全部单木蓄积，进而累加得到各样地 2012 年、2017 年两期的林分蓄积。

$$V = 0.076\,69 D^{1.800\,35} H^{0.992\,46} \tag{8}$$

V——林木蓄积，单位为 10^{-3}m³。

本研究所需的气象数据来源于 ClimateAP 软件（2.20 版本）[18]，从 PRISM[19] 和 WorldClim[20] 中提取月度气候为参考的栅格化数据，并将其匹配至

经纬度点位置。通过软件获取本研究所需的各项气象数据，包括月平均最高气温、月平均最低气温、月平均降水量、月平均无霜天数等。通过单位转换与计算，获得用于 3-PG 模型运行的以下标准指标的气象格式数据。月平均气温范围为−37.8℃～26.3℃，降水主要集中在 7—8 月，约为 111～155 mm。按照林龄将所有样地划分为 3 个组（见表 1）。

表 1 林型划分基础数据

Table 1 Forest type division and basic data

林龄分组 Age group	林龄范围 Age range/a	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/m	林分密度 Density/(trees·hm^{-2})	总生物量 Total mass/(t·hm^{-2})	林分蓄积 Volume/(m^3·hm^{-2})	样地个数 Plot number
第一龄组 Group 1	29～46	8.87～31.18	10.18～33.90	200～670	12.93～196.95	13.69～314.56	11
第二龄组 Group 2	47～64	14.48～28.67	15.79～27.24	290～740	37.92～185.30	49.66～267.20	11
第三龄组 Group 3	67～91	12.78～29.25	16.07～28.30	120～770	27.38～159.69	36.08～215.08	12

1.3 3-PG 模型介绍与参数标定

1.3.1 3-PG 模型简介 3-PG 模型的工作原理可以简单概括为：基于林木生理参数构建一系列方程，模拟林分在环境或人为因素的影响下的动态生长过程。模型从结构上可划分为 3 个模块：碳吸收与固定、生物量分配与损耗以及土壤水分动态平衡。碳吸收与固定模块模拟太阳光辐射的逐级递减，被冠层吸收从而进一步转化为总初级生产力与净初级生产力，模拟碳固定的动态过程[21]。生物量分配与损耗模块基于树种的生理特性和林分密度，计算净初级生产力在林木各部分的分配，并考虑林分自疏现象。土壤水分动态平衡模块模拟降水、冠层截流、地表蒸散以及灌溉措施对土壤水分含量的动态影响。3-PG 模型保留了传统经验模型与过程模型的优点，通过输入气象数据与简单的立地初始数据，即可输出模拟结果，在经过本地化的参数调整后，即可预测林分的胸径、树高、蓄积、各组分生物量等，且精度较为可靠。

1.3.2 模型参数标定 3-PG 模型运行需要的参数主要分为以下两部分：样地初始信息数据，包括林分纬度、样地调查初期的叶生物量、枝干生物量与根生物量等；模型方程组参数，包含模型的核心子模块：生物量异速生长方程、冠层吸收效率、水分利用效率、自疏与死亡相关参数等。具体参数的详细介绍可见文献 [22]。所有参数的获取方式包括实测数据直接计算，方程拟合获取、查阅文献获得、类似树种参数推导以及采用模型默认的初始值。表 2 列出了模型运行所需的关键参数。

表中涉及的主要公式有：

$$P_{FS} = a_p B^{n_p} \tag{9}$$

$$n_p = \frac{\ln\left(\frac{p_{20}}{p_2}\right)}{\ln 10} \tag{10}$$

$$a_p = \frac{p_2}{2^{n_p}} \tag{11}$$

$$W_S = a_s B^{n_s} \tag{12}$$

$$V = a_V B^{N_{VB}} H^{N_{VH}} \tag{13}$$

式中：

P_{FS}, p_2, p_{20}为生物量分配到叶与枝干的比值，p_2, p_{20}分别代表胸径 2 cm 与 20 cm 时的取值；

W_S为枝干生物量，a_s, n_s分别为枝干生物量与胸径关系的常数值与幂值；

V为林分蓄积，a_V为树干材积关系常数值，N_{VB}为胸径幂值，H为树高，N_{VH}为树高幂值。

模型基于参数集与样地初始信息数据运行，可生成样地各指标的模拟数据（$\hat{y}$），将其与样地实测调查的真实数据（y）分别进行简单线性回归，分析模拟值与实测值的匹配程度，使用软件为 R（版本 4.04）。计算指标为斜率（slope）、相关性系数（R^2）、平均误差（ME）、平均绝对误差（MAE）、均方误差（$RMSE$）、平均相对误差（MRE）。其中相关性系数和斜率用于衡量模拟值与实测值的趋势，其余 4 个指标用于衡量模拟值与实测值的偏差程度。

2 结果与分析

2.1 模型校正结果

将 34 个样地按照“五折法”分为 5 份，抽取 80% 的数据（27 个样地）作为校正样本，将模型输出值与实测值做线性回归，并按照 1.3.3 计算各统计指标，结果如表 3。

表 2　3-PG 模型参数调整值

Table 2　Modification of 3-PG model parameters

参数 Parameter	值 Value	来源 Source
胸径2 cm时树叶与树干分配比 Foliage-stem partitioning ratio with DBH = 2 cm	0.8	[23]
胸径20 cm时树叶与树干分配比 Foliage-stem partitioning ratio with DBH = 20 cm	0.051 3	*F*
枝干生物量与胸径关系的常数值 Constant in the relation of stem mass and DBH	0.083	*F*
枝干生物量与胸径关系的幂值 Power in the relation of stem mass and DBH	2.448	*F*
生长最低生长气温 Minimum temperature for growth/℃	−5	[23]
生长最适气温 Optimum temperature for growth/℃	16	[23]
生长最高气温 Maximum temperature for growth/℃	35	[23]
fq = 0.5时水分亏缺比 Moisture ratio deficit for fq = 0.5	0.5	*F*
水分亏缺比的幂值 Power of moisture ratio deficit	5	*F*
林龄为0时的比叶面积 Specific leaf area at stand age was 0	12.93	[24]
成熟叶的比叶面积 Specific leaf area for mature leaves/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	5	[24]
比叶面积为（SLA0 + SLA1）/2时的林龄 Stand age at which specific leaf area was (SLA0 + SLA1)/2/a	8	[24]
冠层量子效率 Canopy quantum efficiency/($mol \cdot mol^{-1}$)	0.035	[5]
定义气孔对饱和水汽压差的响应 Defines stomatal response to VPD/($1 \cdot mBar^{-1}$)	0.05	[24]
树干材积关系中常数值 Constant in the stem volume relationship	0.001 125 056	*F*
树干材积关系中胸径的幂值 Power of DBH in the stem volume relationship	1.967 5	*F*
树干材积关系中树高的幂值 Power of height in the stem volume relationship	1.160 6	*F*

注：*F*为拟合及样地实测参数。
Notes: *F* means fitting and observed parameters.

表 3　模型校正结果

Table 3　Results of model calibration

指标 Indicators	胸径 DBH	树高 HHeight	枝干生物量 Stem mass	叶生物量 Foliage mass	根生物量 Root mass	地上生物量 Above ground mass	整株生物量 Total mass	林分蓄积 Volume
斜率 Slope	0.94	1.14	0.95	0.69	1.15	1.03	1.07	0.85
决定系数 R^2	0.98	0.81	0.98	0.68	0.96	0.98	0.98	0.91
平均误差 *ME*	−0.67	−2.23	−1.26	−0.07	3.29	4.96	8.27	−25.59
平均绝对误差 *MAE*	0.74	3.93	4.22	0.66	3.88	5.36	9.10	27.56
均方误差 *RMSE*	1.08	5.02	4.48	0.76	4.38	6.84	10.76	33.77
平均相对误差 *MRE*/%	−3.33	−8.87	−2.02	−2.35	13.19	6.92	8.54	−19.77

通过观察结果可以得知，模型各变量的决定系数范围为 0.68～0.98，其中胸径、枝干生物量、地上生物量、整株生物量的相关性系数 R^2 均为 0.98；误差指标中，胸径的平均误差为−0.67 cm，平均绝对误差为 0.74 cm，均方误差 1.08 cm；胸径、枝干生物量、叶生物量的平均相对误差较低，控制在−3.33%～−2.02%，树高、地上生物量、总生物量的平均相对误差也控制在 10% 以内。综上所述，模型的校正结果较为理想。

2.2　模型验证结果

按照“五折法”将建模校正样本外不重叠的 20% 剩余样本作为验证数据，带入建模校正后的模型获得输出结果，将模型输出值与实测值做线性回归与统计检验，结果见表 4。

通过验证结果可以得知，枝干生物量与总生物的拟合效果依然保持在最佳状态，R^2 达到 0.98，而枝干生物量的平均相对误差为−3.08%，是所有变量中的最小值，胸径、树高、地上生物量与总生物量的平均相对误差也控制在±10% 以内。叶生物量在验证结果中表现有所提升，相关性系数 R^2 由校正结果中的 0.68 上升到 0.80，同时叶生物量的平均误差、平均绝对误差和均方误差均为最低值。

表 4 模型验证结果

Table 4 Results of model validation

指标 Indicators	胸径 DBH	树高 Height	枝干生物量 Stem mass	叶生物量 Foliage mass	根生物量 Root mass	地上生物量 Above ground mass	整株生物量 Total mass	林分蓄积 Volume
斜率 Slope	0.81	1.53	0.87	0.60	1.03	0.78	0.88	0.75
决定系数 R^2	0.97	0.77	0.98	0.80	0.93	0.97	0.98	0.73
平均误差 *ME*	−1.57	2.76	−2.29	−0.49	4.37	3.05	7.42	−36.48
平均绝对误差 *MAE*	2.20	4.68	5.78	0.88	5.21	7.28	9.52	57.39
均方误差 *RMSE*	2.45	5.01	6.94	1.09	6.52	9.98	11.12	67.47
平均相对误差 *MRE*/%	−7.54	−8.80	−3.08	−15.49	11.84	3.69	6.21	−19.80

因此可以认为模型的验证效果较为良好。

2.3 模型整体拟合效果

将所有 34 块样地的林木数据、气象数据与样地初始数据输入到模型中，得到输出结果并进行分析。结果表明，3-PG 模型可以较好地估算林分的胸径、树高、生物量与蓄积生长情况（表 5）。

表 5 3-PG 模型拟合结果与实测值比较

Table 5 Comparison of fitting results of 3-PG model with measured values

指标 Indicators	胸径 DBH	树高 Height	枝干生物量 Stem mass	叶生物量 Foliage mass	根生物量 Root mass	地上生物量 Above ground mass	整株生物量 Total mass	林分蓄积 Volume
斜率 Slope	0.95	1.28	0.93	0.72	1.21	0.98	1.04	1.05
决定系数 R^2	0.92	0.83	0.98	0.78	0.96	0.97	0.98	0.77
平均误差 *ME*	−1.94	0.35	−1.47	−0.21	4.73	3.33	8.06	−14.25
平均绝对误差 *MAE*	1.99	2.08	3.46	0.59	5.43	5.22	8.89	33.31
均方误差 *RMSE*	2.58	2.55	4.35	0.71	6.12	6.53	10.65	39.09
平均相对误差 *MRE*%	−9.57	−1.63	−2.22	−7.25	7.24	4.50	7.95	−10.13

从表 5 中可以看出，将全部样地数据应用于模型中之后，枝干生物量与整株生物量的模拟值与实测值相关性系数依然保持所有变量的最高值，为 0.98；树高、根生物量与蓄积的相关性系数较验证数据有所提升，其中树高相关性系数增长幅度最大，由 0.77 上升到 0.83，同时平均相对误差减少的最大幅度也出现在树高部分，由-8.8% 缩小为-1.63%。除蓄积外，所有指标的平均相对误差都控制在±10% 以内，可以认为模型模拟效果良好。

2.4 不同林龄样地整株生物量拟合精度

林龄对生物量分配有显著影响。模型对不同林龄样地整株生物量的拟合结果见表 6。

表 6 不同年龄样地整株生物量模拟

Table 6 Simulation of total biomass in different age sample plots

林龄 Forest age	截距 Intercept	斜率 Slope	平均误差 *ME*	平均绝对误差 *MAE*	均方误差 *RMSE*	平均相对误差 *MRE*/%	样地个数 Plot number
第一龄组 Group 1	2.16	0.94	4.58	6.91	8.31	4.42	11
第二龄组 Group 2	−1.43	0.95	7.53	7.76	9.44	6.56	11
第三龄组 Group 3	−2.28	0.90	11.75	11.75	13.28	13.43	12

对不同林龄样地进行的整株生物量拟合效果检验表明，模型对 3 个龄组林分的拟合效果都取得了较为理想的效果，*p* 值均为极显著。第一龄组与第二龄组的平均相对误差控制在了 6.56% 以内，其中第一龄组的拟合效果最为理想，平均误差为 4.58 $t\cdot hm^{-2}$，平均绝对误差为 6.91 $t\cdot hm^{-2}$，均方误差为 8.31 $t\cdot hm^{-2}$，平均相对误差更是控制在 4.42%。随着年龄的增长，4 个评价指标都出现小幅增长的

趋势，其中第三龄组的平均误差为 11.75 t·hm^{-2}，平均绝对误差为 11.75 t·hm^{-2}，均方误差为 13.28 t·hm^{-2}，平均相对误差为 13.43%。前两个龄组的平均相对误差控制在 4.42%～6.56% 之间，效果良好。模拟值与实测值的线性回归结果见图 2。

2.5　不同林龄样地胸径拟合精度

在天然林中，由于受到环境复杂性、物种多样性、个体生长阶段差异性的影响，林分胸径在不同林龄时变化也有较大差别。因此本研究也针对模型在不同林龄的样地中胸径拟合的表现进行了分析验证。模型对不同林龄样地胸径的拟合结果如表 7。

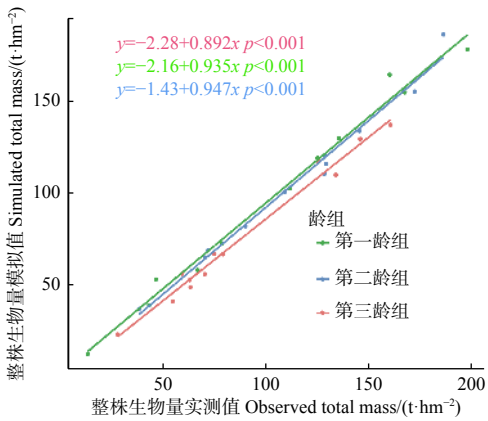

图 2　不同林龄样地整株生物量拟合

Fig. 2　Fitting of total mass in different age

表 7　不同年龄样地胸径模拟

Table 7　Simulation of DBH in different age sample plots

林龄 Forest age	截距 Intercept	斜率 Slope	平均误差 *ME*	平均绝对误差 *MAE*	均方误差 *RMSE*	平均相对误差 *MRE*/%	样地个数 Plot number
第一龄组 Group 1	1.20	1.04	−2.05	2.05	2.29	−9.82	11
第二龄组 Group 2	2.31	0.97	−1.75	1.75	1.96	−8.08	11
第三龄组 Group 3	0.73	1.04	−1.51	1.65	1.98	−7.02	12

对不同林龄的样地进行的胸径拟合效果检验表明，模型对 3 个龄组林分的拟合效果都较为理想，*p* 值均为极显著，且平均相对误差控制在±10% 以内，模型拟合效果良好。与整株生物量拟合的结果不同，胸径的拟合效果随林龄的增长没有下降，反而有极小幅度的提升，平均误差由第一龄组的−2.05 cm 下降到第三龄组的−1.51 cm，平均绝对误差由第一龄组的 2.05 cm 下降到第三龄组的 1.65 cm。模拟值与实测值的线性回归结果见图 3。

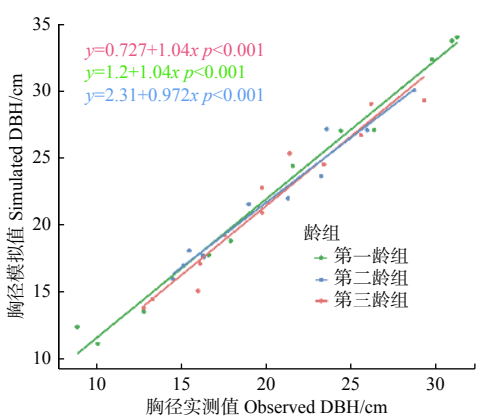

图 3　不同林龄样地胸径拟合

Fig. 3　Fitting of DBH in different age

3　讨论

天然林对生态系统结构功能的作用至关重要，研究天然林蓄积及生物量生长具有重要的意义[25]。本研究以大兴安岭的天然兴安落叶松林为研究对象，运用基于过程的 3-PG 模型对林分尺度上的胸径、树高、各组分生物量及蓄积进行了模拟。在研究方法上，本研究采用了钻取树木年轮条的方式，在获取当前胸径信息的基础上还原历史的胸径信息及一段时间之内的胸径生长情况，在 3-PG 模型的应用中为首次。在获取胸径信息的基础上，通过本地化的生物量及蓄积方程，合理推算获得各器官的生物量和蓄积信息，大大节省了时间成本，避免了破坏性采样的繁琐性，以及运输与保存过程中可能出现的磨损导致的误差，为后人研究提供了参考的方法。通过模型结果可以看出，实测值与预测值高度一致，且平均相对误差控制在±20% 以内，结果与在类似地理区域中同属树种的人工林研究结果相比，精度较为接近，且相关性系数有所提升[26]。胸径的模型拟合的相关性系数优于前人的结果[27]。通过对模型结构的分析可以得知，模型模拟林分蓄积的模块考虑了胸径、树高以及林分密度 3 个变量的影响，同时通过计算每株死亡的树损失的生物量，

进而衡量自疏死亡对林分蓄积的影响[28]，蓄积在使用全部数据的情况下，平均相对误差大幅减小，由−19.80% 降低至−10.13%。由于本研究采用取树芯测量年轮条宽度的方法对胸径进行计算，在保证测量精度的同时，不考虑由于自疏和竞争导致的林分株数的减少，相应的也对模型相关参数进行了调整，弥补了无法在林分生长预测中模拟林木的枯死情况的缺点。

无论是人工林还是天然林，随着林龄的增加，森林的生长速度会逐渐变缓，模型的适用效果也会出现不稳定的情况，因此本研究将数据按林龄从小到大进行了划分，3 个龄组分别占 1/3，避免了因样本量分配不均匀导致模型代表性下降的问题。分析表 6 结果可知，模型对落叶松 3 个龄组整株生物量模拟都取得了较好的效果，其中第一龄组样地拟合效果最佳，分析原因在于模型最开始用于人工林从种植时间开始的生长预测，且轮伐周期较短，与本研究的第一龄组年龄更为接近，模型实用性得到过多方的认可。

关于生物量方程的选取，前人多采用《东北主要林木生物量手册》的一元方程，获取落叶松各组分生物量，并进行累加获得地上生物量与整株生物量[29]。但考虑到该方法时间较为久远，且可加性未知的前提下，笔者选择了采用最新的林业行业标准文件进行生物量与蓄积的计算，并选择精度最高的二元方程，虽加大了拟合的难度，但是结果更为理想。

本研究需要改进的部分有以下几点：天然林环境较为复杂，测量树高时存在严重的遮挡，测量方式影响导致树高测量精度偏低，应探求更为准确的测量方式。叶生物量模拟部分的拟合结果不够理想，原因是受测量条件限制，实测数据不包含冠层导度、冠层量子效率等数据，在参数调整过程中采用了查阅文献所得的相似树种的值或采用模型默认值。到目前为止，3-PG 模型的研究日渐完善，有基于单木过程模型的林分生长模拟[30]，及混合多个模型以取得更佳的拟合效果[31]，在探讨混交林的生长预测上也有新的突破[32]。在后续的研究中将着力于探讨更好的模型模拟效果，弥补空缺的本地化参数值，优化已有的参数值，力求在天然林模型模拟中取得更满意的结果。

4 结论

本研究运用 3-PG 模型，开创性地使用年轮条数据，对大兴安岭地区的兴安落叶松天然林进行了林分生长的预测，通过对模型参数的调整，在胸径、枝干生物量、总生物量等组分的预测取得了较好的效果，证明了模型在兴安落叶松天然林中预测能力的可靠性；在叶生物量、蓄积模拟方面，需结合其他模型或方法对预测精度进行进一步优化。通过对不同林龄的样地中总生物量与胸径的模拟效果进行了对比，分析了模型在不同林龄林分中的拟合精度，对该地区未来天然林的经营管理提供了一定的参考。

参考文献：

[1] 刘 浩, 张秋良. 兴安落叶松林生长季蒸散量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 141-156.

[2] 魏亚伟, 周旺明, 周 莉, 等. 兴安落叶松天然林碳储量及其碳库分配特征[J]. 生态学报, 2015, 35（1）：189-195.

[3] 萨如拉, 王雪鑫, 徐家睿, 等. 大兴安岭兴安落叶松天然林单木生长规律与模型研究[J]. 西南林业大学学报:自然科学版, 2020, 40（2）：111-116.

[4] 吕沅杭, 伊利启, 王儒林, 等. 基于空间结构参数的大兴安岭天然落叶松单木直径生长模型[J]. 林业科学研究, 2021, 34（2）：81-91.

[5] 王秋燕. 气候敏感的落叶松单木地上生物量模型及其应用[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.

[6] 王千雪, 万 盼, 刘 灵, 等. 兴安落叶松天然林林木直径与树高分布的分层特征[J]. 林业科学研究, 2018, 31（5）：82-90.

[7] 王千雪, 韩大校, 申方圆, 等. 大兴安岭兴安落叶松天然林结构特征[J]. 温带林业研究, 2019, 2（1）：47-53.

[8] 曾伟生. 我国3种针叶林的材积源生物量模型研建[J]. 林业科学研究, 2021, 34（4）：49-57.

[9] 雷相东, 李希菲. 混交林生长模型研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25（3）：105-110.

[10] 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(3): 209-228.

[11] 吴 荣, 施凯泽, 杨启运. 基于林木生理过程的3-PG模型在林业中的相关研究进展[J]. 林业调查规划, 2019, 44（2）：30-35.

[12] 花利忠, 徐大平, 江希钿, 等. 桉树人工林3PG模型[J]. 福建林学院学报, 2004（2）：140-143.

[13] 冯 源, 肖文发, 朱建华, 等. 林龄和气候变化对三峡库区马尾松林蓄积量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41（11）：11-21.

[14] 刘镜婷. 大兴安岭落叶松立木材积联立方程组模型[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.

[15] 管惠文, 董希斌, 张 甜, 等. 抚育间伐后落叶松天然次生林生境恢复效果的评价[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47（7）：8-15 + 26.

[16] 吴兆飞, 张雨秋, 张忠辉, 等. 东北温带森林林分结构与生产力关系研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41（5）：48-55.

[17] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数——落叶松(LY/T 2654—2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[18] Wang T, Wang G, Innes J L, *et al*. Climate AP: an application for dy-

namic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2017, 4(4): 448-458.

[19] Christopher D, Michael H, Joseph I, *et al*. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States[J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(15): 2031-2064.

[20] Hijmans R J, Cameron S E, Juan L, *et al*. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(15): 1965-1978.

[21] SANDS P J, LANDSBERG J J, Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 163(1/2/3): 273-292.

[22] Feikema P M, Morris J D, Beverly C R, *et al*. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG + forest growth model[J]. Forest Ecology & Management, 2010, 260(5): 663-678.

[23] 解雅麟. 基于3-PG_(mix)模型的气候变化和间伐对落叶松林生长收获的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

[24] 宋　林, 孙志虎. 长白落叶松人工林叶面积指数测定[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40（9）：6-9.

[25] Zang H , Liu H S, Huang J C, *et al*. A Study of Stand Volume Estimation of Natural Broadleaved Forest: Taking Castanopsis Stand in South Jiangxi as an example[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2019.

[26] 解雅麟, 王海燕, 雷相东. 基于3-PG模型的长白落叶松人工林生长和生物量模拟[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2018, 42（1）：141-148.

[27] 李　巍. 兴安落叶松生物量分配格局和异速生长模型[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.

[28] 陈　耿. 基于林分动态模型3-PG的集成决策系统IFDSS的设计与实现[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.

[29] 陈传国, 朱俊凤. 东北主要林木生物量手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989: 1-528.

[30] 马莉燕, 张怀清, 李永亮, 等. 基于单木过程模型的杉木林分生长模拟研究[J]. 林业科学研究, 2015, 28（4）：551-556.

[31] 刘　坤. 银杏人工林结构参数估测及生长过程模拟[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.

[32] Bouwman M, Forrester D I, Ouden J D, *et al*. Species interactions under climate change in mixed stands of Scots pine and pedunculate oak[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 481: 118615.

Application of 3-PG Model in the Prediction of Growth Factors in Natural *Larix gmelinii* Forest

QU Ling-hao, ZHAO Xiu-hai, ZHANG Chun-yu

(Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] To simulate and predict the biomass and volume growth of natural forest using process-based model. [**Method**] Taking *Larix gmelinii* natural forest in Daxing'anling mountains as the research object, the application of 3-PG model was studied based on physiological process in natural forest. By adjusting the parameters of built-in module equation of the model and optimizing the fitting results of measured value and simulated value, the model parameter group suitable for deciduous forest in Northeast China was finally obtained, and the test results of different forest ages were compared. [**Result**] The model achieved good results in the simulation of DBH, stem biomass, root biomass, above ground biomass and total biomass. The coefficient of determination R^2 of stem biomass and total biomass equation reached 0.98, and the relative mean error was controlled within 8%. The results of total biomass prediction and DBH prediction for different aged forest showed that the model had a good fitting effect on young, half-mature and near-mature forests. [**Conclusion**] After adjustment of the local parameters, 3-PG model can be applied to the growth prediction of natural *L. gmelinii* forest, and it can achieve good results in biomass prediction and DBH prediction.

Keywords: natural forest; *Larix gmelinii*; 3-PG model; biomass

（责任编辑：彭南轩）