

丹清河林场天然次生林林分蓄积量生长模型

戎建涛¹, 何友均², 应苗苗¹, 梁文杰¹, 权 伟¹

(1. 温州科技职业学院, 浙江 温州 325006; 2. 中国林业科学研究院 林业科技信息研究所, 北京 100091)

摘 要:以黑龙江省哈尔滨市丹清河林场的主要次生森林类型为对象, 基于小班调查数据, 利用 Richards、Mistcherlich、Logistic、Gompertz 和 Schumacher 5 种理论生长方程, 建立了林分蓄积量生长模型, 采用模型拟合统计量、误差及残差分布对模型进行评价和检验。结果表明: 白桦林、柞木林 Richards 模拟结果最好; 人工落叶松林、天然阔叶林、天然针叶混交林 Logistic 模拟最好, 天然针叶林 Schumacher 模拟最好。为该地区森林生长预测和经营优化提供了参考和依据。

关键词:小班调查数据; 理论生长模型; 蓄积生长模型

中图分类号: S758.51

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2014)03-0155-06

Volume Growth Models of Natural Secondary Forests in Danqinghe Forest Farm, Northeast China

RONG Jian-tao¹, HE You-jun², YING Miao-miao¹, LIANG Wen-jie¹, QUAN Wei¹

(1. Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou, Zhejiang 325006, China;

2. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Sub-compartment inventory data were used for model calibration of volume growth of main forest types in Danqinghe Forest Farm. Richards, Mistcherlich, Logistic, Gompertz, and Schumacher growth equations were tested and fitting statistics, errors and residual distribution were reported. The results showed that Richards model was the best volume growth model for birch forest, *Quercus mongolica* forest, *Larix* plantation. Logistic model was the best volume growth model for *Larch* plantation, natural broad-leaved forest, nature conifer-broad-leaved mixed forest. Schumacher was the best volume growth model for nature coniferous forest. These models provided the reference and basis for predicting forest growth in the region and forest planning.

Key words: sub-compartment inventory datum; theoretical growth model; volume growth model

森林生长模型是生长收获预估和经营决策的重要工具。在较大区域调查中, 利用具有一定精度保证的林分生长模型能够极大提高调查效率^[1]。唐守正^[2]对林分生长模型分类及其发展过程进行了系统描述。葛宏立^[3]建立了基于现代回归统计方法估计参数的单木生长模型、采伐枯损模型、以样地平均年龄和样地数量为自变量的进界模型。Adame^[4]建立了包括林木大小、林木竞争、立地条件和生物地理等因子的截距效应混合模型。姜立春^[5]利用 S-PLUS 软件中的 NLME 过程, 拟合了兴安落叶松的直径和蓄积生长模型, 结果表明混合模型通过校正

随机参数值能提高模型的预测精度。李春明^[6]基于两层线性混合效应模型建立江西省人工杉木林胸径生长模型, 结果表明与林业常用的传统最小二乘法相比, 混合效应模型方法获得更高模拟精度和验证精度。雷相东^[7]等基于 20 个长期固定观测样地数据, 建立东北近天然落叶松云冷杉林中落叶松、红松、云杉、冷杉、慢阔和中阔 6 个树种组的单木 5 年断面积生长模型。但对于局部地区来说, 常常由于固定样地数量少、积累时间较短、调查费用高等, 从而限制了生长模型的建立和应用。二类调查是森林经营单位定期开展的一项重要工作, 其中小班调

收稿日期: 2013-09-23 修回日期: 2014-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(31170593)。

作者简介: 戎建涛, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 森林可持续经营, 森林碳汇。E-mail: jiantaorong@163.com

查数据是其中的主要成果,林分年龄和蓄积等都包括在小班调查因子中。因此可以利用小班调查数据建立生长模型。但利用小班调查数据建立生长模型的研究并不多见^[8-10]。本研究利用黑龙江哈尔滨丹清河林场的二类调查数据,以主要的森林类型为对象,选择了5种理论生长方程进行拟合和检验,在对拟合统计量进行综合评判的基础上,确定了蓄积量生长的最优方程,以期对丹清河林场主要森林类型生长动态预测和制定森林经营规划依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于小兴安岭南坡的黑龙江省哈尔滨市林业局丹清河林场(129°11′—129°25′E,46°31′—46°39′N)内。该地区属于中温带大陆性季风气候,夏季气候湿润,降雨量集中在7、8月,年降雨量600 mm左右,年蒸发量1 250 mm。年日照时数为2 200 h,年平均气温2℃,最高气温31℃,最低气温-35℃。初霜在9月末,终霜在5月中旬,无霜期120 d左右,始冻期为10月初,解冻期为5月初。地貌类

型属于低山丘陵,海拔190~1 028 m,平均海拔500 m左右。土壤类型以暗棕壤为主,分布于不同的坡向和坡位,占该场土壤面积的94.9%。主要树种有红松(*Pinus koraiensis*),臭冷杉(*Abies nephrolepis*),鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*),元宝槭(*Acer truncatum*),紫椴(*Tilia amurensis*),枫桦(*Betula costata*),蒙古栎(*Quercus mongolica*),糠椴(*Tilia mandshurica*),春榆(*Ulmus davidiana* var. *Japonica*),山杨(*Populus davidiana*),白桦(*Betula platyphylla*),水曲柳(*Fraxinus mandshurica*),黑桦(*Betula dahurica*),胡桃楸(*Juglans mandshurica*),黄檗(*Phellodendron amurense*)等。

1.2 数据与方法

1.2.1 数据资料 研究数据选用丹清河林场2007年二类调查1 961个小班数据。选取样本数量>30的森林类型进行建模。根据树种组成将其划分为以下几种森林类型:白桦林、人工落叶松林、柞木林、天然阔叶林、天然针叶林、天然针阔混交林。每种森林类型随机选取80%数据建模,剩余20%数据用于模型检验(表1)。

表1 6种森林类型建模数据的统计量

Table 1 Stand statistics of six kinds of forest types for model calibration

森林类型	统计量	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差
白桦林	林龄/a	103	61	13	37.82	18.93
	$v/(m^3 \cdot hm^{-2})$		140	18	62.54	34.28
人工落叶松林	林龄/a	377	87	11	43.33	15.98
	$v/(m^3 \cdot hm^{-2})$		175	8	70.36	45.50
柞木林	林龄/a	273	62	18	30.55	12.01
	$v/(m^3 \cdot hm^{-2})$		134	13	65.62	55.78
天然阔叶林	林龄/a	402	128	32	68.25	13.45
	$v/(m^3 \cdot hm^{-2})$		185	20	118.15	80.33
天然针叶林	林龄/a	355	108	17	80.58	22.65
	$v/(m^3 \cdot hm^{-2})$		254	47	128.94	29.38
天然针阔混交林	林龄/a	377	112	34	71.50	37.22
	$v/(m^3 \cdot hm^{-2})$		196	84	92.58	39.46

注: v 代表每 hm^{-2} 蓄积量。

1.2.2 模型的选择 据研究区数据散点图变化趋势已有研究成果,选取5种树木生长理论方程作为备选模型^[11-13]

$$\text{Richards 模型: } y = A(1 - e^{-Br})C \quad (1)$$

$$\text{Mistcherlich 模型: } y = A(1 - e^{-Br}) \quad (2)$$

$$\text{Logistic 模型: } y = \frac{A}{1 + Be^{-Cr}} \quad (3)$$

$$\text{Gompertz 模型: } y = Ae^{-Be^{-Cr}} \quad (4)$$

$$\text{Schumacher 模型: } y = Ae^{\frac{B}{x}} \quad (5)$$

式中, y 为林分每 hm^{-2} 蓄积量, x 为林分年龄, A 为树木生长的最大值参数; C 为生长速率参数; B 为与初始值有关的参数。

1.2.3 模型的评价与检验 选择以下最常用的6

种统计量^[14-17](表2)对拟合的模型进行检验,并观测选择模型的残差分布是否具有异质性。

2 结果与分析

主要森林类型建模数据的模型拟合统计量及各参数标准差(基于每个小班拟合参数所获得的标准差)(表3)和各种模型的检验统计量(表4)分析表明,白桦林中,5种模型调整决定系数均在80%以上,其中模型(1)调整决定系数值最大,且各个参数标准差较小,说明参数值比较稳定,模拟结果较好。人工落叶松林中,模型(1)和模型(5)调整决定系数达到90%以上,且参数标准差变动较小。柞木林中,模型(1)、模型(2)、模型(3)调整决定系数值均在

表 2 用于检验模型的几种统计量

Table 2 Statistics on prediction errors and precisions			
统计指标	符号	表达式	理想值
调整决定系数	R^2	$1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1}$	1
总相对误差	E_1	$\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - est_i)}{\sum_{i=1}^n est_i}$	0
平均相对误差	E_2	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{obs_i - est_i}{est_i} \times 100\%$	0
平均相对误差绝对值	E_3	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ obs_i - est_i }{est_i} \times 100\%$	0
均方根误差	E_4	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - est_i)^2}{n-k}}$	0
预估精度	P	$1 - \frac{t\alpha \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - est_i)^2}{n-k}}}{est \cdot \sqrt{n(n-k)}} \times 100\%$	1

注: obs_i , est_i , n , k 分别表示第 i 个观测值、第 i 个估计值、观测值个数和回归模型参数个数。

80%以上,模型(1)、模型(3)参数标准差值变动较小。天然阔叶林中,5种模型调整决定系数均在80%以上,每种模型之间调整决定系数相差不大。天然针叶林中,模型(1)和模型(5)调整决定系数达到90%以上,且参数标准差变动较小。天然针阔混交林中,除模型(4)外,其余模型调整系数均相差不大。

为了选取拟合精度最高的模型,将建模数据各模型按评价指标(调整 R^2 , E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , P)进行排序,模型效果越优,越接近理想值的评价指标越多。表5列出了排在前3位的模型。由综合排名选出适宜的模型。因此,白桦林选择模型(1),人工落叶松林选择模型(3),柞木林选择模型(1),天然阔叶林选择模型(1),天然针叶林选择模型(5),天然针阔混交林选模型(3)。

表 3 各森林类型蓄积生长模型的拟合统计量和误差

Table 3 Fitting statistics and errors of volume growth models for six forest types				
森林类型	模型	参数值		
		A(标准差)	B(标准差)	C(标准差)
白桦林	(1)	179.236(4.462)	0.058(0.034)	6.126(5.467)
	(2)	117.594(8.430)	0.035(0.015)	
	(3)	182.661(11.364)	108.179(16.283)	0.250(0.0241)
	(4)	159.034(3.728)	0.082(0.005)	11.500(5.259)
	(5)	249.026(33.627)	-25.837(3.126)	
人工落叶松林	(1)	265.218(1.084)	0.0755(3.174)	10.621(0.088)
	(2)	125.357(9.960)	0.0467(0.086)	
	(3)	208.399(4.275)	275.851(0.065)	0.204(73.621)
	(4)	236.941(6.849)	0.137(0.005)	12.082(2.062)
	(5)	279.35(2.382)	-34.270(4.687)	
柞木林	(1)	127.176(5.293)	0.094(0.005)	20.073(5.681)
	(2)	133.480(16.238)	0.107(0.083)	
	(3)	143.525(3.149)	105.326(6.559)	0.576(0.0614)
	(4)	146.502(8.758)	0.117(0.290)	14.550(8.623)
	(5)	233.944(12.725)	-38.591(4.158)	
天然阔叶林	(1)	212.783(11.573)	0.043(0.005)	3.792(0.570)
	(2)	108.200(6.248)	0.012(0.001)	
	(3)	183.249(4.411)	377.852(6.435)	0.094(0.005)
	(4)	202.461(6.734)	6.112(0.566)	0.054(0.003)
	(5)	372.007(13.467)	-52.096(1.831)	
天然针叶林	(1)	185.439(1.682)	0.049(0.003)	2.242(0.222)
	(2)	203.945(3.040)	0.024(0.001)	
	(3)	179.946(1.330)	11.393(1.682)	0.089(0.005)
	(4)	181.494(1.387)	3.937(0.338)	0.065(0.003)
	(5)	233.784(2.559)	-23.564(0.744)	
天然针阔混交林	(1)	210.877(4.591)	0.022(0.002)	1.255(0.131)
	(2)	221.649(3.030)	0.017(0.001)	
	(3)	197.894(2.200)	204.054(0.363)	0.039(0.002)
	(4)	203.053(2.737)	2.116(0.143)	0.030(0.002)
	(5)	257.023(2.816)	-34.906(0.826)	

注:A、B、C 分别代表模型各个参数。

表 4 各森林类型蓄积生长模拟检验统计量

Table 4 Test statistics of volume growth model for six forest types

森林类型	模型	调整 R_2	E_1	E_2	E_3	E_4	P
白桦林	(1)	0.887	3.259	4.455	6.387	7.685	88.327
	(2)	0.803	5.033	5.568	8.159	10.920	80.715
	(3)	0.858	3.664	4.711	7.422	10.028	85.523
	(4)	0.819	-4.207	4.978	6.956	8.637	83.922
	(5)	0.895	3.348	4.088	6.653	8.576	84.314
人工落叶松林	(1)	0.915	-1.271	-2.567	5.044	7.057	90.770
	(2)	0.880	2.822	3.645	9.690	8.248	85.541
	(3)	0.933	0.957	1.935	6.572	7.394	91.246
	(4)	0.851	-3.148	-4.127	8.918	11.965	79.590
	(5)	0.910	1.663	2.780	7.635	6.866	86.503
柞木林	(1)	0.899	5.443	7.542	15.445	8.866	85.420
	(2)	0.853	8.038	9.759	15.739	10.897	88.284
	(3)	0.877	8.863	8.451	12.339	8.873	90.576
	(4)	0.790	-9.068	-10.128	6.169	8.870	83.221
	(5)	0.755	6.915	7.641	10.936	12.020	80.739
天然阔叶林	(1)	0.887	0.0719	1.395	10.577	20.767	91.725
	(2)	0.801	2.0891	3.203	12.601	27.041	82.229
	(3)	0.875	-0.147	-2.556	11.045	21.003	90.701
	(4)	0.874	-3.155	-5.256	19.256	24.019	85.380
	(5)	0.851	-4.925	-5.763	20.922	27.272	84.236
天然针叶林	(1)	0.904	-1.037	-2.466	11.213	14.805	90.883
	(2)	0.882	-2.821	-3.860	11.927	16.377	90.775
	(3)	0.850	-1.441	-2.913	12.179	16.526	92.760
	(4)	0.897	-1.014	-2.403	11.501	15.391	89.835
	(5)	0.916	-1.291	-3.003	10.564	13.849	90.959
天然针阔混交林	(1)	0.901	-1.566	-2.528	5.524	10.740	87.280
	(2)	0.889	2.436	2.352	4.967	9.343	80.367
	(3)	0.899	-2.167	-1.232	4.901	9.309	85.574
	(4)	0.808	-3.343	-3.397	4.941	9.272	87.377
	(5)	0.875	1.033	1.230	5.119	9.411	87.366

表 5 评价指标排在前三位的模型

Table 5 The top three models according the evaluation index

森林类型	检验指标前三位模型						选择模型
	调整 R^2	E_1	E_2	E_3	E_4	P	
白桦林	(5)	(1)	(5)	(1)	(1)	(1)	(1)
	(1)	(5)	(1)	(5)	(5)	(3)	
	(3)	(3)	(3)	(4)	(4)	(5)	
人工落叶松林	(3)	(3)	(3)	(1)	(5)	(3)	(3)
	(1)	(1)	(1)	(3)	(1)	(1)	
	(5)	(5)	(5)	(5)	(3)	(5)	
柞木林	(3)	(1)	(1)	(4)	(1)	(3)	(1)
	(1)	(5)	(5)	(5)	(4)	(1)	
	(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(2)	
天然阔叶林	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(3)
	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	
	(4)	(2)	(2)	(2)	(4)	(4)	
天然针叶林	(5)	(4)	(4)	(5)	(5)	(3)	(5)
	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(5)	
	(4)	(5)	(3)	(4)	(4)	(1)	
天然针阔混交林	(1)	(5)	(5)	(3)	(4)	(3)	(3)
	(3)	(1)	(3)	(4)	(3)	(4)	
	(2)	(3)	(2)	(2)	(2)	(5)	

2.2 选定模型检验

利用剩余的 20%数据对所选模型进行检验(表 6)可以看出 6 种森林类型预估精度均在 87%以上,白桦林、人工落叶林、柞木林、天然针叶林预估精度都达到了 90%以上,符合精度要求,可见模型选择较好。同时做出所有数据的残差分布图(图 1)可以看出,残差分布比较均匀,未发现明显的异质性。

表 6 各个森林类型选定模型的检验统计量

Table 6 The test statistic of selected models for six forest types

森林类型	调整 R^2	E_1	E_2	E_3	E_4	P
白桦林	0.861	3.540	4.573	10.524	12.264	93.385
人工落叶松林	0.887	-2.822	-3.671	9.266	10.139	91.950
柞木林	0.835	4.986	6.281	15.303	17.637	92.880
天然阔叶林	0.828	-2.018	-3.583	9.154	19.784	89.595
天然针叶林	0.904	-1.517	-3.110	15.208	16.372	91.200
天然针阔混交林	0.874	-1.529	-0.546	4.787	8.836	87.136

最后,各森林类型最优生长模型见表 7。

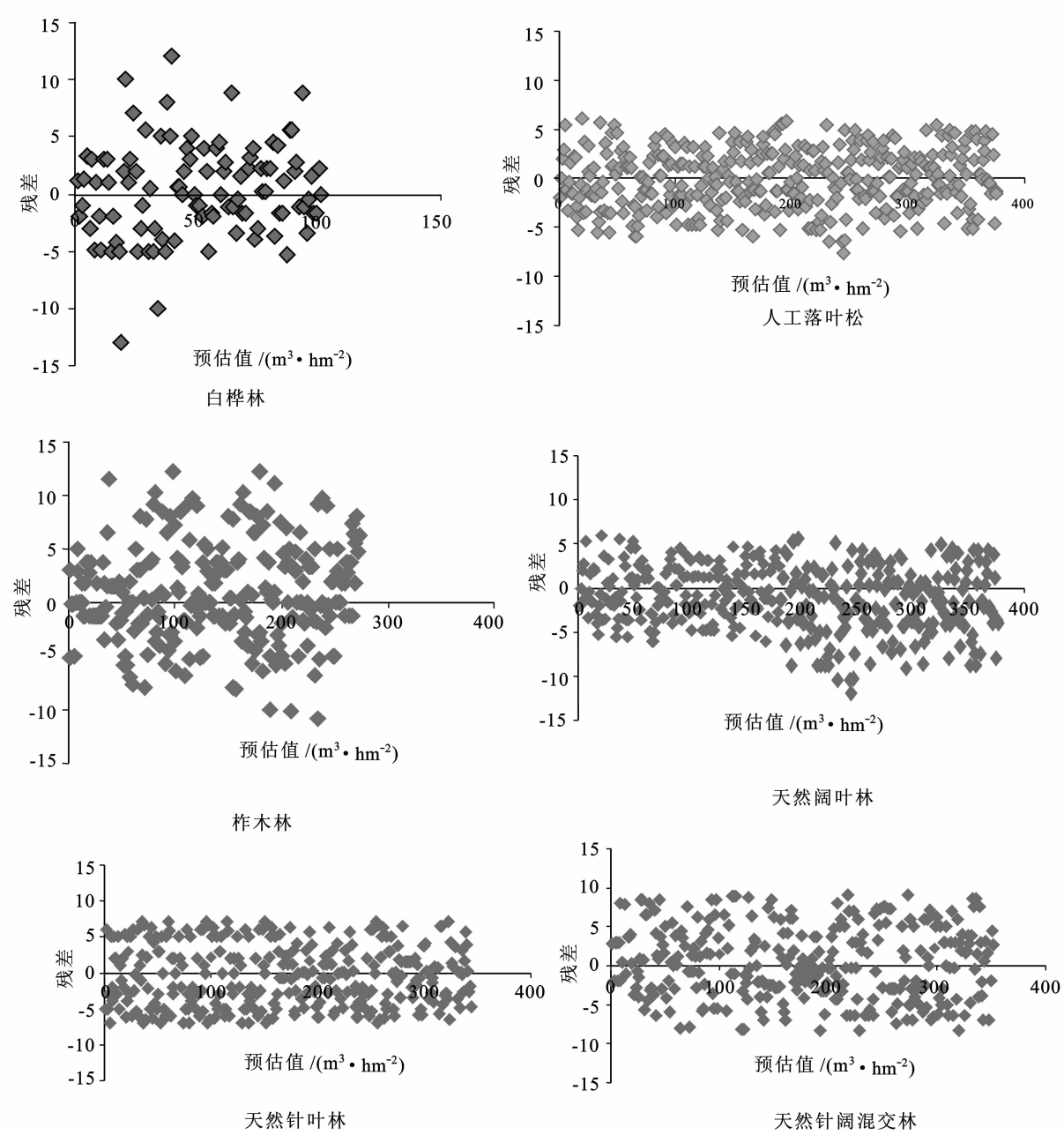


图 1 各种森林类型选定模型的建模数据残差分布

Fig. 1 Residuals distribution of selected models for forest types

表 7 各森林类型的蓄积量生长模型

Table 7 Volume growth models for six forest types

森林类型	最优模型	表达式
白桦林	(1)	$y=179.236(1-e^{(-0.058x)})6.126$
人工落叶松林	(3)	$y=\frac{208.399}{1+275.851e^{-0.024x}}$
柞木林	(1)	$y=127.176(1-e^{(-0.094x)})20.073$
天然阔叶林	(3)	$y=\frac{183.249}{1+377.852e^{-0.094x}}$
天然针叶林	(5)	$y=233.784e^{\frac{-23.564}{x}}$
天然针阔混交林	(3)	$y=\frac{197.894}{1+204.054e^{-0.039x}}$

注: x 为林分年龄(a), y 为蓄积量($m^3 \cdot hm^{-2}$)。

3 结论与讨论

利用二类森林资源清查数据构建不同森林类型的蓄积量生长模型是可行的,与固定样地数据相比,小班调查数据容易获得^[3]。建立的蓄积量生长模型具有合理的统计可靠性,预估精度除天然阔叶林和天然针阔混交林低于 90% 以外,而其它森林类型的预估精度都达到了 90% 以上。

使用 5 种理论生长方程拟合金沟岭林场主要森林类型年龄与平均蓄积的结果发现,模型(1)、模型(3)、模型(5)拟合精度明显高于模型(2)、模型(4)。

建立的生长模型,可为丹清河林场各主要森林类型生长提供理论依据,也为今后制定合理的规划

经营措施提供参考。本研究中仅将林分年龄做为自变量纳入模型,以后可考虑更多的林分因子如林分密度、断面积、立地等,从而更准确地反映生长状况^[16-18]。

参考文献:

- [1] 潘建勇,邹奕巧,葛宏立,等.用林分生长模型更新小班主要调查因子的方法研究[J].西南林业大学学报,2012,32(3):56-59.
PAN J Y, ZOU Y Q, GE H L, *et al.* Updating the main sub-compartment variables based on stand growth model[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2012, 32(3): 56-59. (in Chinese)
- [2] 唐守正,李希菲,孟昭和.林分生长模型研究的进展[J].林业科学研究,1993,6(6):672-679.
TANG S Z, LI X F, MENG Z H. The development of studies on stand growth models[J]. Forest Research, 1993, 6(6): 672-679. (in Chinese)
- [3] 葛宏立,孟宪宇,唐小明.应用于森林资源连续清查的生长模型系统[J].林业科学研究,2004,17(4):413-419.
GE H L, MENG X Y, TANG X M. Growth model system for continuous forest inventory[J]. Forest Research, 2004, 17(4): 413-419. (in Chinese)
- [4] ADAME. New Zealand forestry[EB/OL]. [2009-06-02]. <http://www.fao.org/forestry/index.jsp>
- [5] 姜立春,杜书立.基于非线性混合模型的东北兴安落叶松树高和直径生长模拟[J].林业科学研究,2012,25(1):11-16.
JIANG L C, DU S L. Height and diameter growth modeling of Dahurian larch based on nonlinear mixed model in northeastern China[J]. Forest Research, 2012, 25(1): 11-16. (in Chinese)
- [6] 李春明.基于两层次线性混合效应模型的杉木单木胸径生长量模型[J].林业科学,2012,48(3):66-73.
LI C M. Individual tree diameter increment model for Chinese fir plantation based on two-level linear mixed effects models[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(3): 66-73. (in Chinese)
- [7] 雷相东,李永慈,向玮.基于混合模型的单木断面积生长模型[J].林业科学,2009,45(1):74-79.
LEI X D, LI Y C, XIANG W. Individual basal area growth model using multi-level linear mixed model with repeated measures[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(1): 74-79. (in Chinese)
- [8] PAYANDEH B. Formulated site index curves for major timber species in Ontario[J]. Forest Science, 1974, 20(2): 143-144.
- [9] PAYANDEH B, WANG Y H. Relative accuracy of a new base-age invariant site index model[J]. Forest Science, 1994, 40(2): 341-384.
- [10] 杜纪山,唐守正,王洪良.天然林分生长模型在小班数据更新中的应用[J].林业科学,2000,36(3):52-57.
DU J S, TANG S Z, WANG H L. Application of natural stand growth models in subcompartment data update[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(3): 52-57. (in Chinese)
- [11] ZHAO D H, WILSON M, BORDERS B E. Modeling response curves and testing treatment effects in repeated measures experiments: a multilevel nonlinear mixed-effects model approach[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(1): 122-132.
- [12] CARMEAN W H, LENTHALL D J. Height-growth and site-index curves for jack pine in north central Ontario[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1989, 19(2): 215-224.
- [13] NEWTON P F, AMPONSAH I G. Comparative evaluation of five height-diameter models developed for black spruce and jack pine stand-types in terms of goodness-of-fit, lack-of-fit and predictive ability[J]. For. Ecol. and Management, 2007, 247(1/3): 149-166.
- [14] FANG Z X, BAILEY R L. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 110(1/3): 315-327.
- [15] REYNOLDS M R. Estimating the error in model predictions[J]. Forest Science, 1984, 30(2): 454-469.
- [16] 曾翀,雷相东,刘宪钊,等.落叶松云冷杉林单木树高曲线的研究[J].林业科学研究,2009,22(2):182-189.
ZENG C, LEI X D, LIU X Z, *et al.* Individual tree height-diameter curves of Larch-spruce-fir forests[J]. Forest Research, 2009, 22(2): 182-189. (in Chinese)
- [17] 吕家云.闽北杉木人工林动态生长模型及应用研究[J].华东森林经理,2003,17(3):6-10.
- [18] 戎建涛,雷相东,张会儒,等.兼顾碳贮量和木材生产目标的森林经营规划研究[J].西北林学院学报,2012,27(2):155-162.
RONG J T, LEI X D, ZHANG H R, *et al.* Forest management planning incorporating values of timber and carbon[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 155-162. (in Chinese)