

塞罕坝华北落叶松—白桦针阔混交林胸径年生长量预测

王冬至^{1,2}, 弥宏卓³, 张冬燕¹, 张志东^{1,2}, 黄选瑞^{1,2*}

(1. 河北农业大学, 河北 保定 071000; 2. 河北省林木种植资源创新与保护实验室, 河北 保定 071000;
3. 内蒙古自治区林业监测规划院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要:以河北省塞罕坝国家森林公园华北落叶松—白桦针阔混交林为研究对象,基于 87 块标准地(20 m×30 m)的 348 株解析木数据,建立包含样地间及样地内随机效应的胸径—年龄非线性混合效应模型,并在混合效应模型中加入哑变量来解决样地内不同树种带来的差异。结果表明,华北落叶松单木胸径非线性混合效应模型确定系数(R^2)、 $-2 \log$ Likelihood 值、信息准则(Alcaike's information criterion, AIC)值、贝叶斯信息(Bayesian information criterion, BIC)值分别为 0.85、898.1、880.2、855.4;白桦单木胸径非线性混合效应模型确定系数(R^2)、 $-2 \log$ Likelihood 值、AIC 值、BIC 值分别为:0.81、500.9、482.6、465.7。白桦和华北落叶松最大年生长量分别为 0.44 cm 和 0.41 cm,年龄和竞争指数与胸径生长量呈负相关关系,胸径和林分优势高与胸径生长量呈正相关关系,其中林分优势高与华北落叶松—白桦混交林径向生长量相关性较低。包含哑变量的混合效应生长模型解决了混交林中样地间及样地内树种对胸径生长的影响,提高了模型精度及适用性,为该地区针阔混交林经营水平及经营效果的提高提供依据。

关键词:非线性混合模型;哑变量;胸径;华北落叶松;白桦;混交林

中图分类号:S758.55 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)03-0001-06

Prediction of the Diameter Annual Radial Growth of *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* Mixed Forest in Saihanba

WANG Dong-zhi^{1,2}, MI Hong-zhuo³, ZHANG Dong-yan¹, ZHANG Zhi-dong^{1,2}, HUANG Xuan-rui^{1,2*}

(1. Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China; 2. Forest Resources Innovation and Protection Laboratory of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China; 3. Inner Mongolia Forestry Monitoring of Sarft, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: A total of 87 temporary plots (20 m×30 m) were established in *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* mixed forest of Saihanba National Forest Park, Hebei Province, China. We investigated a total of 348 analytic trees. Nonlinear mixed-effects model of diameter was established including random-effects of plots. We also added dummy variables to the mixed-effects models in order to solve intra-plot variability resulting from species difference. The results indicated that for *L. principis-rupprechtii* and *B. platyphylla*, nonlinear mixed-effect models were established respectively. Both models had the best fits with the fit statistics values ($R^2=0.85$; $-2 \log$ Likelihood=898.1; AIC=880.2; BIC=855.4) for *L. principis-rupprechtii* and values ($R^2=0.81$; $-2 \log$ Likelihood=500.9; AIC=482.6; BIC=465.7) for *B. platyphylla*. The maximum annual growth of *B. platyphylla* and *L. principis-rupprechtii* were 0.44 cm and 0.41 cm, respectively. The age and competition index had a negative correlation with diameter annual radial growth. The DBH and dominant height of stand had a positive correlation with diameter annual radial growth. Dominant height of stand had a lower correlation with annual radial growth in *L. principis-rup-*

收稿日期:2016-09-20 修回日期:2016-11-29

基金项目:国家科技支撑计划课题(2015BAD09B01);林业公益性行业科研专项(20150430304);国家自然科学基金(31370636)。

作者简介:王冬至,男,博士,讲师,研究方向:森林可持续经营与管理。E-mail:wangdz@126.com

* 通信作者:黄选瑞,男,博士,教授,研究方向:森林可持续经营与管理。E-mail:hxr1962@163.com

prechtii and *B. platyphylla* mixed forest. The mixed-effect models with dummy variables solved the negative effects of species differences between plots and within plot on diameter relationships in mixed forests. The results would provide better model fitting, more applicability and more precise estimations than the basic generalized model.

Key words: nonlinear mixed-effect model; dummy variable; diameter; *Larix principis-rupprechtii*; *Betula platyphylla*; mixed forest

为了满足社会对木材及森林可持续经营管理工作的需求,传统经营模式已经被有计划的森林经营管理模式所取代^[1],然而这些经营活动并未考虑不同森林类型之间的差异。混交林林分结构比人工林更接近自然状态^[2],除了提供木材之外,还为更多野生动物提供栖息地及满足人类景观要求,并具有较强的抗病虫害和抗火灾的能力^[3]。为了使这些半自然的森林类型满足经营对树种组成、林分结构、生物多样性及生产力^[4-5]的需求,运用模型来预测林分生长过程中的变化被认为是一种有效工具^[6-7],经营单位一旦确定立木年龄、生长周期及最大胸径就可以有效指导森林可持续经营方案制定^[6-8]。

在森林经营管理与规划中,森林生长和产量模型经常被用来模拟和预测林分生产力及空间结构的变化^[9],其中,单木胸径生长模型是森林生长和产量模型中的一个重要组成部分^[10-11],通常被用来描述立木大小、竞争效应、林分结构及立地生产力^[6,12],并被认为是具有统计学和生物学意义且比较灵活的预测模型^[13]。在混交林中竞争是影响立木胸径生长的重要因素之一,确定混交林每个树种竞争指数对研究混交林树种对生长的影响具有重要意义^[14]。经 Q. V. Cao^[15]研究发现在同一混交林分类型中,试验与对照样地树种间竞争能力基本相同,与距离无关的单木生长模型在预测混交林及异龄林单木胸径生长时具有较高的灵活性^[16-17]。在混交林中,首先由于物种组成、竞争、年龄及个体大小的差异使林分在水平结构和垂直结构上具有复杂性和异质性^[18],其次,年龄与立木胸径生长密切相关,在混交林中确定不同立木年龄非常困难,许多学者^[10-11,17]在建立混交林胸径生长预测模型的过程中并未将年龄作为模型参数,然而 W. K. Lee^[19]等研究表明,年龄是构建混交林胸径生长预测模型中的一个重要变量。在混交林中选择适合不同树种的胸径生长预测模型比较困难^[20],因此,在混交林中如何解决多层次多树种、年龄、竞争及立木大小等因素对立木胸径生长产生的影响是一个亟待解决的科学问题。

华北落叶松—白桦针阔混交林是塞罕坝机械林场主要的混交类型,其中华北落叶松为人工林,白桦为天然次生林,在华北落叶松—白桦针阔混交林中,

华北落叶松为上层木且为优势树种。本研究以华北落叶松—白桦针阔混交林为研究对象,构建一个多树种、多层次与距离无关的非线性单木胸径生长预测混合效应模型,并采用样地内立木相对大小来计算混交林不同立木间竞争指数,量化竞争与立木间的相互关系,为预测混交林不同树种胸径生长量及经营效果评价提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省塞罕坝机械林场(116°41'13"—118°31'43"E,41°16'24"—42°52'18"N),为典型的山地地形,属华北暖温性大陆季风气候,海拔 1 010~1 940 m,平均坡度 20°,年均气温为 -1.2℃,极端最高气温为 33.4℃,极端最低气温 -43.3℃,年均降水量 452 mm,主要集中于 7—8 月,占年降水量的 67.6%;土壤类型主要有灰色森林土、棕壤土、风沙土、沼泽土、砾石土、草甸土等。研究区主要乔木种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、云杉(*Picea asperata*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等;主要灌木树种有绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、细叶小檗(*Berberis poiretii*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、库页悬钩子(*Rubus sachalinensis*)、红瑞木(*Cornus alba*)等,主要草本植物有蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、并头黄芩(*Scutellaria scordifolia*)、苔草(*Carex tristachya*)、桔梗(*Platycodon grandiflorus*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、照山白(*Rhododendron micranthum*)等。

2 材料与方法

2.1 数据来源

基础数据来源于 2014 年 7—8 月在塞罕坝机械总场下属的北曼甸、大唤起、阴河、千层板、第三乡 5 个林场,共设置 20 m×30 m 华北落叶松—白桦混交林临时样地 87 块,对样地内胸径≥5 cm 的立木进行每木检尺,共调查立木 8 561 株(华北落叶松 4 953 株,包含 3 608 株)。调查中在每块样地内以

表 1 建模数据和检验数据统计

Table 1 Summary statistics for modeling and validation data sets

数据	统计量	华北落叶松(<i>L. principis-rupprechtii</i>)			白桦(<i>B. platyphylla</i>)		
		年龄/a	胸径/cm	树高/m	年龄/a	胸径/cm	树高/m
建模数据	最小值	14	7.32	5.42	12	6.98	6.18
	最大值	45	34.07	17.65	57	33.12	16.22
	平均值	29	19.04	11.71	30	16.84	10.61
	标准误	0.28	0.23	0.11	0.32	0.19	0.08
	标准差	5.69	4.76	2.07	6.47	3.97	1.72
检验数据	最小值	16	6.69	6.17	15	6.55	5.93
	最大值	42	32.29	18.24	52	34.26	15.89
	平均值	30	20.12	12.07	32	15.97	11.26
	标准误	0.31	0.25	0.14	0.43	0.22	0.14
	标准差	4.98	4.84	2.11	6.04	6.38	1.75

每 0.01 hm²^[12] 分别选取不同树种(华北落叶松、白桦)优势木各 5 株,并选择不同树种平均优势木各 2 株进行树干解析,其中华北落叶松、白桦解析木各 174 株(表 1)。

2.2 胸径生长模型

预测混交林不同树种立木胸径生长是一个复杂的建模过程,在不同林分类型中很难确定哪个模型是最好的,哪些变量是最重要的^[13]。在立木生长过程中年龄是一个重要观测因子^[20],因此,将年龄作为一个独立变量加入到模型建立中。立木竞争采用一个与距离无关的竞争指数(CI)来计算,可描述为林木胸径(DBH)与混交林林分立木平均胸径(\overline{DBH})的比值^[21],并在预测混交林单木生长模型中得到了应用^[12,22],与距离无关的单木胸径生长模型在混交林中具有更好的预测性能^[23]。J. N. Fonweban^[24]等认为林分优势高在评价森林立地质量的过程中是最有效、最客观的一种方法,且不受林分密度的影响,因此,在混交林中采用优势种地位指数表示样地间的差异^[20],考虑到立地质量、竞争及年龄对立木胸径生长量的影响,与距离无关的单木胸径非线性生长模型可表示为:

$$\Delta r_{t,j} = a_0 A_{t,j}^{a_1} D_{t,j}^{a_2} e^{a_3 CI_{t,j}^{0.5}} H_0^{a_4} \tag{1}$$

$$CI_j = \frac{DBH_j}{\overline{DBH}} \tag{2}$$

式中: $\Delta r_{t,j}$ 为第 j 株第 t 年生长量(cm), a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为模型参数, A 为立木年龄(a), D 立木为胸径(cm), CI 为竞争指数, H_0 为林分优势种的优势高(m), CI_j 为第 j 株数竞争指数, DBH_j 为第 j 株树胸径, \overline{DBH} 为林分平均胸径。

第 n 年第 j 株树胸径($D_{t+n,j}$)可用包含当前观测胸径($D_{t,j}$)、年龄及竞争指数的函数进行计算:

$$D_{t+n,j} = D_{t,j} + \sum_{k=t}^{t+n-1} \Delta r_{k,j} \tag{3}$$

2.3 模型评价与检验

利用确定系数(R^2)、绝对误差($Bias$)及均方根误差($RMSE$)3 个模型精度评价指标对模型拟合效果进行效果评价, $Bias$ 和 $RMSE$ 值越大而 R^2 越大说明模型的拟合精度越高。

$$Bias = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (D_{ij} - \hat{D}_{ij}) / N \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \frac{D_{ij} - \hat{D}_{ij}}{n - p}} \tag{5}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (D_{ij} - \hat{D}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (D_{ij} - \overline{D})^2} \tag{6}$$

式中, D_{ij} 为第 i 个样地第 j 株树的胸径观测值(cm); \hat{D}_{ij} 为第 i 个样地第 j 株树的胸径预测值(cm); \overline{D} 为林分胸径(cm); n 为观测样木株数; m 为样地数; p 为模型参数个数。

2.4 统计处理

数据处理及模型建立采用 SPSS21.0 统计软件及 SAS9.2 软件中 PROC NL MIXED 完成。

3 结果与分析

3.1 胸径与年龄关系

在华北落叶松—白桦混交林中不同树种胸径与胸径处年龄相关关系(图 1),不同树种随着年龄的增加胸径具有一定的差异性,其中,华北落叶松胸径主要分布于 15~30 cm 范围内,白桦胸径主要分布于 10~25 cm 范围内,在华北落叶松—白桦混交林中华北落叶松胸径分布范围高于白桦。

3.2 非线性混合效应模型建立

采用哑变量来解决混交林中不同树种间胸径生长量的影响,并采用随机效应参数来解决样地间和样地内效应对胸径生长量产生的影响,其中,用林分优势种的优势高来反应不同样地生产潜力,立木间竞争采用与距离无关的竞争指数来解决密度对胸径

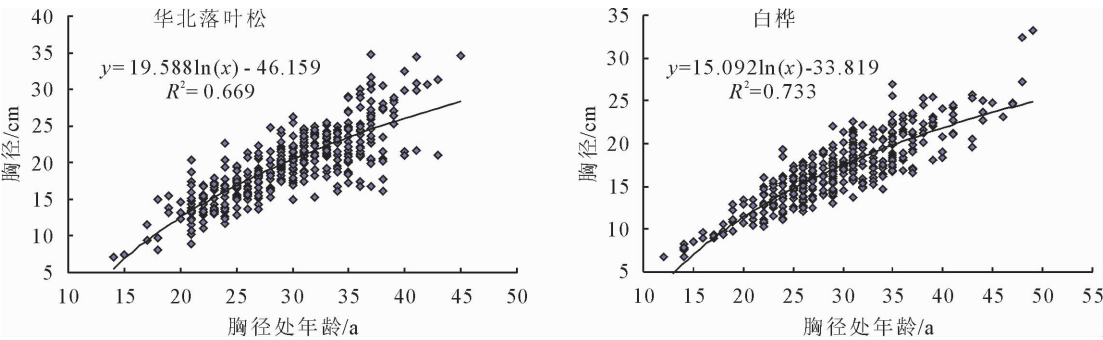


图 1 混交林不同树种胸径与年龄关系

Fig. 1 Relationship between DBH and age of species in mixed forest

生长量影响,那么混交林中不同树种胸径年生长量非线性混合效应生长模型可表示为:

$$\Delta r_{t,j} = (a_0 + \mu_2) A_{t,j}^{a_1} D_{t,j}^{\gamma_1 + \dots + \gamma_n} e^{a_3 CI_{t,j}^{0.5}} H_0^{(a_4 + \mu_1)} \quad (7)$$

$$CI_j = \frac{DBH_j}{\overline{DBH}} \quad (8)$$

式中: $\Delta r_{t,j}$ 为第j株树第t年生生长量(cm), a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为固定效应参数, $\gamma_1 \cdots \gamma_n$ 为混交林中不同树种的哑变量,不同树种哑变量参数估计值用 a_2 表示, μ_1 、 μ_2 分别为样地间和样地内随机效应参数, A 立木年龄, D 立木为胸径(cm), CI 为竞争指数, H_0 为林分优势种的优势高(m), CI_j 为第j株数竞争指数, DBH_j 为第j株树胸径, \overline{DBH} 为林分平均胸径。

3.3 参数估计与检验

在华北落叶松—白桦混交林中不同树种与距离无关的单木胸径生长非线性混合效应模型参数估计值、确定系数(R^2)、绝对误差($Bias$)及均方根误差($RMSE$)值(表2),其中,华北落叶松—2 log Likelihood值(−2倍对数似然函数值)、AIC值(赤池信息准则)、BIC(贝叶斯信息准则)值分别为:898.1、

表 2 非线性混合模型参数估计及统计检验

Table 2 Parameter estimations and goodness-of-fit statistics of mixed models

参数	华北落叶松 (<i>L. principis-rupprechtii</i>)			白桦 (<i>B. platyphylla</i>)		
	估计值	标准差	P	估计值	标准差	P
a_0	3.122 9	0.319 5	<0.000 1	1.418 3	1.185 1	0.042 7
a_1	−1.007 5	0.029 6	<0.000 1	−1.171 8	0.210 1	<0.000 1
a_2	0.738 6	0.045 1	0.044 2	3.521 3	0.742 4	<0.000 1
a_3	−1.132 1	0.104 4	0.042 6	−7.889 8	1.665 3	<0.000 1
a_4	0.386 5	0.023 4	<0.000 1	0.128 6	0.362 8	0.056 1
μ_1	0.104 2	0.074 1	0.046 1	0.009 4	0.944 6	0.042 1
μ_2	0.113 2	0.022 6	0.007 7	0.002 7	0.052 4	0.041 5
σ^2	0.001 5	0.000 1	<0.000 1	0.002 4	0.000 3	<0.000 1
R^2		0.85			0.81	
$Bias$		1.324			1.268	
$RMSE$		0.442			0.427	

880.2、855.4;白桦—2 log Likelihood值、AIC值、BIC值分别为:500.9、482.6、465.7。运用拟合模型对混交林不同树种胸径生长量进行预测,不同树种残差分布如图2。

4 结论与讨论

在混交林中由于物种、竞争及个体大小差异对立木生长的影响,对混交林单木胸径生长模型研究较少。本研究注重方法学,重点解决了在多层次多树种混交林中树种、竞争、立木大小及年龄对立木胸径生长量产生影响,建立了包含树种哑变量的混合效应模型来预测混交林中不同树种立木胸径生长量,为预测混交林径向生长及经营效果评价提供科学依据。

在华北落叶松—白桦混交林中年龄和竞争与立木胸径生长量均表现为负相关关系。立木年龄是影响胸径生长的重要因素,但是在一些模型建立中并未用到年龄变量^[25,11],研究初试图忽略年龄变量,但在统计分析过程中发现如不考虑年龄,统计效果较差,因此,将年龄作为一个独立变量加入到模型建立中,结果表明,若其他变量不变,立木径向生长量与年龄呈负相关关系,与W. K. Lee^[20]等研究赤松(*Pinus densiflora*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*)混交林立木径向生长量结果相一致。在混交林中除了年龄以外,竞争对立木径向生长量也有较大影响。竞争对华北落叶松—白桦混交林中不同树种胸径生长量均表现为负相关^[25-26]。混交林中,采用比目标树大的所有立木基面积与目标树胸径之比及Hegyí竞争指数来描述竞争对单木胸径生长的影响^[13,20],而本研究采用与距离无关的立木胸径与林分平均胸径之比来描述竞争对立木生长的影响,该法已在研究混交林立木生长预测模型中得到应用^[12,22],并表明与距离无关的单木径向生长模型在混交林中具有更好的预测性能^[27-28]。

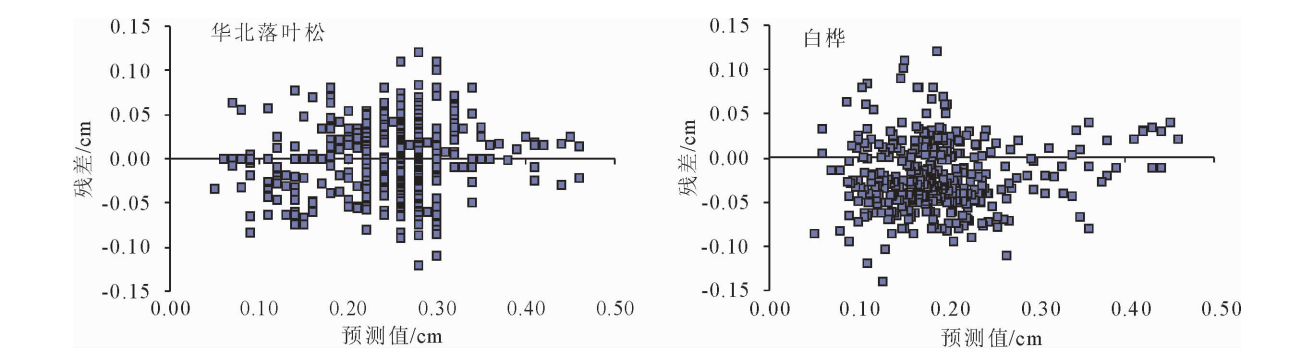


图 2 不同树种残差分布

Fig. 2 The residual distribution of different species

在华北落叶松—白桦混交林中胸径和林分优势高与立木胸径生长量均表现为正相关关系。胸径越大竞争力越强,对光照、水分及养分的吸收能力越高^[17],胸径生长量越大,反之生长量越小。除了年龄、竞争、立木大小对立木生长具有较大影响外,立地质量对立木胸径生长量也具有一定的影响,并与胸径生长量呈正相关关系。但研究发现,立地质量对华北落叶松—白桦混交林不同树种立木胸径生长量影响较小,而在以往的研究中^[20,27]过分的强调了立地质量与立木径向生长的关系,在 M. L. John^[29]等研究橡木—短叶松(*oak-shortleaf pine*)混交林研究获得了同样的结论,在混交林中年龄、竞争及立木大小对立木胸径生长量影响最大。

在建立模型过程中考虑样地间及样地内效应对立木径向生长量的影响,采用混合效应模型来预测混交林不同树种立木胸径生长量,随机效应参数提高了对不同树种径向生长量的预测精度^[30-31],包含样地间及样地内随机效应参数的径向生长混合效应模型可以有效提高模型精度^[28,32-33]。此外,在混交林中考虑树种效应,采用哑变量方法来解决树种对立木胸径生长产生的效应,包含哑变量的胸径生长混合效应模型提高模型适用范围及预测精度。

参考文献:

[1]

PUTZ F E, SIST P, FREDERICKSEN T, *et al.* Reduced-impact logging: challenges and opportunities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256: 1427-1433.

[2]

WEST G G. Douglas-fir, Japanese larch, and European larch in pure and mixed stands[J]. *New Zealand Journal of Forest Science*, 1991, 21(1): 3-9.

[3]

ROHNER B, BUGMANN H, BIGLER C. Towards non-destructive estimation of tree age[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 304: 286-295.

[4]

MACPHERSON D M, LIEFFERS V J, BLENIS P V. Productivity of aspen stands with and without a spruce understory in Alberta's boreal mixedwood forests[J]. *The Forestry Chronicle*, 2001, 77(2): 351-356.

[5]

LIEFFERS V J, BECK J A. A seminatural approach to mixed-wood management in the prairie provinces[J]. *The Forestry Chronicle*, 1994, 70(3): 260-264.

[6]

BRIENEN R J W, ZUIDEMA P A. The use of tree rings in tropical forest management: projecting timber yields of four Bolivian tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 226: 256-267.

[7]

LOPEZ L, VILLALBA R. Climate influences on the radial growth of *Centrolobium microchaete*, a valuable timber species from the tropical dry forests in Bolivia[J]. *Biotropica*, 2010, 43(1): 41-49.

[8]

SCHONGART J. Growth-oriented logging (GOL): a new concept towards sustainable forest management in central *Amazonian várzea* floodplains[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256: 46-58.

[9]

LEITES L P, ROBINSON A P, CROOKSTON N L. Accuracy and equivalence testing of crown ratio models and assessment of their impact on diameter growth and basal area increment predictions of two variants of the forest vegetation simulator[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39: 655-665.

[10]

LHOTKA J M, LOEWENSTEIN E F. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261: 770-778.

[11]

TIMILSINA N, STAUDHAMMER C L. Individual tree-based diameter growth model of Slash pine in Florida using nonlinear mixed modeling[J]. *Forest Science*, 2012, 9(2): 1-12.

[12]

ANDREASSEN K, TOMTER S M. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180: 11-24.

[13]

VANCLAY J K, SKOVSGAARD J P. Evaluating forest growth models[J]. *Ecology Modelling*, 1997, 98: 1-12.

[14]

CANHAM C D, COATES K D, BARTEMUCCI P, *et al.* Measurement and modeling of spatially explicit variation in light transmission through interior cedar-hemlock forests of British Columbia[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29: 1775-1783.

[15]

CAO Q V. Incorporating whole-stand and individual-tree models in a standtable projection system[J]. *Forest Science*, 2007, 53(1): 45-49.

[16]

MONSERUD R A, STERBA H. A basal area increment mod-

el for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria[J]. Forest Ecology and Management, 1996, 80: 57-80.

[17] CALAMA R, BARBEITO I, PARDOS M, *et al.* Adapting a model for even-aged *Pinus pinea* L. stands to complex multi-aged structures[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256: 1390-1399.

[18] SCHUTZ J P. Silvicultural tools to develop irregular and diverse forest structures [J]. Forestry (Oxford), 2002, 75(4): 329-337.

[19] LEE W K, GADOW K V, CHUNG D J. DBH growth model for *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* mixed forests in central Korea[J]. Ecology Modelling, 2004, 176: 187-200.

[20] CHOJNACKY D C. Modeling diameter growth for pinyon and juniper trees in dryland forests[J]. Forest Ecology and Management, 1997, 93: 21-31.

[21] NIRMAL S, MAHADEV S. Individual-tree diameter growth models for black spruce and jack pine plantations in northern Ontario [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261: 2140-2148.

[22] LACERTE V, LAROCQUE G R, WOODS M, *et al.* Calibration of the forest vegetation simulator (FVS) model for the main forest species of Ontario[J]. Ecology Modelling, 2006, 199(6): 336-349.

[23] PORTÉ A, BARTELINK H H. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management[J]. Ecology Modelling, 2002, 150: 141-188.

[24] FONWEBAN J N, TCHANOU Z, DEFO M. Site index equations for *Pinus kesiya* in Cameroon[J]. Journal of Tropical Forest Science, 1995, 8(1): 24-32.

[25] WYKOFF W R. A basal area increment model for individual conifers in the Northern Rocky Mountains[J]. Forest Science, 1990, 36(4): 1077-1104.

[26] WEISKITTEL A R, GARBER S M, JOHNSON G P, *et al.* Annualized diameter and height growth equations for Pacific northwest plantation-grown Douglas-fir, estern hemlock, and red alder[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 250: 266-278.

[27] ADAME P, CANELLAS I. A mixed nonlinear height diameter model for pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256: 88-98.

[28] PUKKALA T, LAHDE E, LAIHO O. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258: 207-216.

[29] JOHN M L, EDWORD F L. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261: 770-778.

[30] 李盈, 许昊. 基于非线性混合模型的油松天然林树高曲线研究 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 41-49.

LI Y, XU H. Height-diameter models of pinus *Pinus tabulaeformis* based on nolinear mixed model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 203-206. (in Chinese)

[31] 任瑞娟, 亢新刚, 杨华. 天然林单木生长模型研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 203-206.

REN R J , KANG X G, YANG H. Review on grow th model of individual-tree in nature forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 203-206. (in Chinese)

[32] BUDHATHOKI C B, LYNCH T B, GULDIN J M. Nonlinear mixed modeling of basal area growth for shortleaf pine[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255: 3440-3446.

[33] UZOHF C C, OLIVER W W. Individual tree diameter increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using a multilevel linear mixed effects model[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256: 438-445.