

杉木人工林单木断面积生长动态模拟

孙洪刚¹, 张建国^{2*}, 段爱国², 何彩云², 童书振²

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘要:应用面板数据固定效应模型对杉木人工林单木断面积生长规律进行模拟,在模拟过程中,将胸径(*DBH*)和活冠比例(*LCR*)作为自变量,又分别加入密度因子和不同类型的竞争指数,同时引入立地条件和林龄效应来解释单木断面积生长过程中的异质性。结果表明:虽然密度因子与竞争指数有较强的相关性,但是在单木断面积生长中都具有不可忽略的重要影响。立地条件与林龄对单木断面积的拟合偏差在不同的林分密度下略有不同,随立地指数或者林龄增加,其对平均单木断面积拟合偏差的影响也增大。

关键词:固定效应模型;单木断面积;杉木

中图分类号:S791.27

文献标识码:A

Individual Tree Basal Area Growth Dynamics of Chinese Fir Plantation

SUN Hong-gang¹, ZHANG Jian-guo², DUAN Ai-guo², HE Cai-yun², TONG Shu-zhen²

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

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

Abstract: The fixed-effect model for individual tree basal area growth modeling for Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in spacing plantations was developed using panel data. The heterogeneity of individual increment basal area among the different blocks was analyzed with independent variables (diameter of breast height (*DBH*) and live-crown ratio (*LCR*)), dummy variables with stand planting density, competition indices, and site and stand age effects. The result indicates that there is a strong relationship between stand planting density and competition indices, but both of them are important factors impacting individual increment tree basal area growth. The impact of site condition and stand age varies with different stand density. The fitting deviation of the average individual increment basal area increases along with site indices and stand ages.

Key word: fixed-effect regression model; individual tree basal area; Chinese fir

杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 作为我国亚热带温暖湿润地区特有的优良速生针叶树种,在速生丰产用材林中的比重极大^[1]。如何实现杉木人工林速生、丰产、优质及高效这一目标是解决木材供需矛盾的关键。而要实现这一目标,就必须清楚的了解人工林树种的生长特性及生长过程。

目前,对林木群体生长规律的研究主要利用单木生长模型,把胸高断面积或者直径作为单木生长的量化指标^[2-5]。其中,胸高断面积的动态变化能更好地反映单木生长变化规律^[6-7],因此,对单木断面积生长量的动态模拟已经得到林业科研人员的重视。以往对单木断面积生长进行模拟的模型主要分为两类:一类为理论生长方程,这类方程具有良好的生物学特性,但在确定林木生长上限值的标准上具

收稿日期:2009-06-08

基金项目:国家“十一五”科技支撑课题“杉木和马尾松大径材速生丰产林培育关键技术研究及示范”(2006BAD24B03)

作者简介:孙洪刚(1976—),男,吉林通化人,助理研究员,博士,主要从事森林培育和森林气象研究。

* 通讯作者

有相当的主观性^[8]。另一类为复合模型,这类模型一般以单木属性(如树木大小、活冠比例、单木之间的竞争等)和林分水平变量(如林龄、立地条件、林分密度等)为自变量对单木断面积生长进行模拟。由于这类模型能充分反映环境条件对单木断面积生长的影响及林木之间的相互作用,因而得到了广泛的应用^[2]。

本文以杉木密度试验林为对象,应用面板数据(截面数据与时间序列数据综合起来的一种数据类型)固定效应模型研究其单木断面积生长规律,不但可以避免遗漏解释变量对模型估计的影响,还考虑了每个截面单元之间的异质性。具体来说,本文探讨了单木断面积生长中的4个问题:(1)不同区组的单木断面积生长的异质性;(2)不同林分密度对单木断面积生长的影响;(3)林木之间的竞争对单木断面积的影响;(4)不同立地条件/林龄对单木断面积生长的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区设置在江西省分宜县大岗山年珠林场场部后山,地理坐标为27°34' N, 114°33' E,海拔250 m,气候温暖湿润,属亚热带季风气候区。年平均温度15.8~17.7℃;月平均(7月)最高温度28.8℃,日最高温度39.9℃;月平均(1月)最低温度-5.3℃,日最低温度-8.3℃。全年平均日照时数1 657 h,最高为2 047 h,最低为1 378 h,日照百分率约为37%。年平均太阳总辐射量486.6 kJ·cm⁻²。年平均蒸发量1 503.0 mm,最多为1 770.8 mm,最少为1 274.0 mm。年平均降水量1 591.0 mm,最多为2 227.6 mm,最少为1 069.8 mm。年平均无霜期为265天。本区属地带性低山丘陵红壤、黄壤类型及其亚类的分布区。

1.2 试验设计

1981年春天采用1年生杉木裸根苗营造试验林。造林后,通过成活率调查,对死亡的苗木,用同龄苗在当年冬或翌年春进行补植。试验采用随机区组设计,由2 m×3 m(A)、2 m×1.5 m(B)、2 m×1 m(C)、1 m×1.5 m(D)、1 m×1 m(E)5种密度组成一个区组,重复3次,共15个小区,分别记为(A1、A2、A3、B1、B2、B3、…、E1、E2、E3),每个小区面积均为600 m²。在每个小区周围各栽植2行同样密度的杉木作为保护带。对每株林木进行挂牌观

测。2~5年生时,每年停止生长后,测定树高、胸径。6年生开始,除每木检尺外,在每个小区内采用机械抽样法,测定100株树的树高、冠幅、枝下高和胸径;每个小区选6株优势木用来计算立地指数,在小区中央划定100 m²测定林分郁闭度。林分达10年生后,改为2年调查一次。截至2005年,已连续观测13次。本文基于这15个小区13年观测获得的面板数据进行分析。

1.3 模拟方法

如果对于不同的区组来说,模型的截距是不同的,则可以采用在模型中加虚拟变量的方法估计回归参数,称此种模型为固定效应模型(fixed effects regression model)。根据本文的研究目的,设定了3类固定效应模型:

第1类:如果对于不同的区组在整个观测期内有不同的截距,而对于同一观测时点的不同区组,模型的截距没有显著性变化,那么就建立带有立地效应的固定效应模型:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta X_{it} + \varepsilon_{it} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (1)$$

(1)式中, α_i 是随机变量,表示对于不同的区组在整个观测期内有不同的截距,即作为随机变量描述不同区组间的差异,又称立地条件的拟合偏差。 α_i 是不可观测的,且与可观测的解释变量 X_{it} 的变化相关; y_{it} 为被解释变量,即第*i*区组单木在*t*时的单木断面积; X_{it} 为*k*×1阶回归变量列向量, X_{it} 可以是包括胸径(DBH)和活冠比例(LCR)的双变量向量{DBH, LCR},也可以是在此基础上包括林木所在林分属性因子,如林分密度(SD)和立地指数(SI)的多变量向量{DBH, LCR, SD, SI}, β 为*k*×1阶回归系数列向量,对于不同个体回归系数相同, ε_{it} 为误差项。

第2类:如果对于不同的区组在整个观测期内截距是相同的,而对于同一观测时点的不同区组,模型的截距显著不同,那么应该建立带有林龄效应的固定效应模型:

$$y_{it} = \gamma_t + \beta X_{it} + \varepsilon_{it} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

(2)式中, γ_t 是模型截距项,表示对于13次观测有13个不同的截距项,且其变化 X_{it} 与有关系,即林龄效应的拟合偏差。其它变量解释同前所述。

第3类:如果确知对于不同的区组在整个观测期以及相同的观测时点上不同的区组,模型的截距均显著地不相同,那么应该建立带有立地和林龄双

效应的固定效应模型:

$$y_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta X_{it} + \varepsilon_{it} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (3)$$

(3)式中, ε_{it} 为误差项, 满足假定 $E(\varepsilon_{it} | X_{it}, \alpha_i, \gamma_t) = 0$ 。其它变量解释同前所述。

为了量化单木断面积生长与林分初植密度之间的关系, 本文采用4个密度虚拟变量 B 、 C 、 D 、 E 对不同的林分初始密度进行标记, 其中 $B=1$ 表示 i 区组属于密度为 $2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 否则为0; $C=1$ 表示 i 区组属于 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 否则为0; $D=1$ 表示 i 区组属于 $1 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 否则为0; $E=1$ 表示 i 区组属于 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,

否则为0; A组 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 为参照组。拟合得到的4个虚拟变量的系数即为不同的密度组与参照组(A)之间的差异。

为反映林木之间的竞争对单木断面积生长的影响, 本研究选取下列竞争指数并分别检验其与单木断面积生长之间的关系: (1) 与距离无关竞争指数: 竞争木数量 (N_n)、竞争木的累积胸高断面积 (SBA)^[9]、竞争木的胸径总和与对象木的胸径比值 ($C18$)^[10]; (2) 与距离有关竞争指数: 对象木与其竞争木之间距离的比率 ($C14$)^[10]、Hegyi 距离指数 (DCI)^[11] (表1)。

表1 单木竞争指数

类型	名称	定义
与距离无关竞争指数	N_n	以对象木为中心, 半径 2.0 m 范围内的单木数量
	SBA	对象木的竞争木胸高断面积总和: $SBA = \sum_{j=1}^n BA_j$
	$C18$	竞争木的胸径总和与对象木的胸径比值: $C18 = \frac{\sum_{j=1}^n D_j}{D_i}$
与距离有关竞争指数	$C14$	对象木与其竞争木之间距离的比率: $C14 = \sum_{j=1}^n \frac{D_j/D_i}{DIST_{ij}/R}$
	DCI	Hegyi 距离指数: $DCI = \sum_{j=1}^n \left(\frac{D_j}{D_i} \times \frac{1}{DIST_{ij}} \right)$

注: BA_j : 竞争木 j 的胸高断面积; D_i : 对象木 i 的胸径; D_j : 竞争木 j 的胸径; $DIST_{ij}$: 对象木 i 与竞争木 j 的距离; R : 以对象木 i 为中心的研究半径。

根据以上原理, 本研究设计了9种单木断面积估计模型(表2)。本文利用最小二乘法虚拟变量($LS-DV$)方法估计上述3类模型、9种模型的参数, 计算过程采用 SAS 9.0 软件完成。

表2 9种单木断面积估计模型

模型	回归因子	固定效应
(1)	DBH, LCR	
(2)	DBH, LCR	立地指数、林龄
(3)	DBH, LCR 、林分密度	
(4)	DBH, LCR 、林分密度	立地指数、林龄
(5)	DBH, LCR 、林分密度、 N_n	立地指数、林龄
(6)	DBH, LCR 、林分密度、 SBA	立地指数、林龄
(7)	DBH, LCR 、林分密度、 $C14$	立地指数、林龄
(8)	DBH, LCR 、林分密度、 $C18$	立地指数、林龄
(9)	DBH, LCR 、林分密度、 DCI	立地指数、林龄

2 结果与分析

2.1 单木断面积影响因素的回归分析结果

表3为9种单木断面积估计模型的估计结果。从表中可以看出:

表中第(1)列给出了在没有考虑立地、林龄及密度因子的情况下, 采用最小二乘法估计 DBH 和 LCR 对实际单木断面积生长量的估计结果。 LCR 、 DBH 的系数为正, 而且第(1)列的估计值在置信水平为1%上显著。根据这个估计值, DBH 的增大将导致单木断面积增大。 LCR 系数与单木断面积生长量之间正相关明显, 这主要是由于活冠比例越大, 光合作用积累的单木生长所需的物质越多, 保证了单木生长的需求。然而, 包括立地和林龄因子的第(2)列中的回归结果表明, 回归(1)中较大的系数是由于遗漏变量偏差造成的, 这说明不同的立地条件和林龄是影响单木断面积生长的重要因素, 因此不能忽略遗漏变量对单木断面积生长的影响。当包括立地条件与林龄的固定效应时, 回归的拟合优度 (R^2) 从 0.244 0 增加到 0.986 5, 很显然, 立地条件与林龄的固定效应解释了数据变差的大部分变化。此时, LCR 系数由 1.835 8 下降到 0.761 1, DBH 的系数在加入两个固定效应后由 0.321 0 下降到 0.050 5, 这是由于把包含在 DBH 和 LCR 变量中有

关立地条件和林龄因子的效应分离出去导致的,这样更加准确地揭示了 *DBH* 和 *LCR* 因素对单木断面面积的影响程度。因此,在第(4)列到第(9)列的模型中,同时考虑了立地和林龄因子。

第(3)列的回归是在第(1)列的基础上加入了密度因子。在没有立地条件以及林龄因子的回归结果中,4个密度组的回归系数为正,并随着林分密度的增加而增加。然而,包括了立地条件以及林龄的第(4)列估计结果表明,随着林分密度的增加,密度组的系数逐渐减小并且为负,说明初植密度越大,单木断面面积的变化越小。这是因为单位面积林木株数越多,单木平均生长空间越小,竞争加剧,从而限制了单木的生长。当模拟包括了两个固定效应时,同第(2)列比较,回归拟合优度降低了近8个百分点。这说明同等条件下,立地条件比密度因子对单木断面面积生长的影响要大。但是同不包括固定效应的第(1)列相比,拟合精度大幅提高,这说明密度因子是单木断面面积生长中不可忽略的重要因素。

为了反映某一林分中单木之间的竞争状态,最后5列的回归,除了立地条件与林龄因子外,还分别包括了不同竞争指数对单木断面面积生长的影响。对第(5)列到第(9)列的回归结果进行分析,得到以下结论:

(1)5类竞争指数均提高了模型调整的拟合优度,并且这5类竞争指数均在1%的置信水平下显著地异于0。这说明应用单木竞争指数均可以不同程度地反映单木之间的竞争关系。5类竞争指数的系数均为负,说明单木之间的竞争程度越大单木断面面积的生长率越小。与距离无关竞争指数对单木断面面积生长的影响表现并不稳定:*SBA*对单木断面面积的影响最小,系数为-0.0800,说明保持其它因素不变,*SBA*竞争指数增加1个单位,单木断面面积的变化要降低0.0800单位。*Nn*对单木断面面积的影响最大,在其它因素保持不变的条件下,*Nn*增加1个单位,单木断面面积的变化要降低0.1854个单位。而与距离有关竞争指数*C14*、*DCI*对单木断面面积生长的影响则比较稳定,两者每增加1个单位,单木断面面积生长降低幅度均在0.1300个单位左右。

(2)加入竞争指数后,*DBH*的变化趋于稳定,变化范围在0.1000到0.1300之间,并且系数在1%的置信水平下显著地为正。单木胸高断面直径每增加1个单位,单木断面面积生长将增加0.10%~0.13%左右。*LCR*对单木断面面积生长的影响在不同的变量模型中的显著性不同,其系数明显小于较小显著性的模型中的系数。不过,*LCR*的系数始终为正,说明*LCR*的增加意味着单木断面面积的增大。

表3 9种单木断面面积生长估计模型的回归分析结果

项目	模型								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
<i>DBH</i>	0.321 0 (0.006 3)***	0.050 5 (0.011 1)***	0.291 7 (0.002 4)***	0.123 5 (0.008 5)***	0.102 6 (0.006 3)***	0.126 0 (0.007 2)***	0.111 5 (0.006 4)***	0.109 4 (0.006 0)***	0.107 9 (0.006 3)***
<i>LCR</i>	1.835 8 (0.139 2)***	0.761 1 (0.098 0)***	1.195 8 (0.052 1)***	0.535 6 (0.106 4)***	0.110 8 (0.195 9)	0.212 6 (0.122 6)*	0.155 1 (0.097 6)	0.173 4 (0.087 7)**	0.088 9 (0.091 7)
B 区组			0.646 6 (0.039)***	0.003 1 (0.036 1)	-0.053 5 (0.026 9)	0.016 4 (0.030 3)	-0.079 4 (0.027 6)***	-0.051 4 (0.026 4)*	-0.115 5 (0.027 6)***
C 区组			0.895 6 (0.038 1)***	-0.068 7 (0.049 9)	-0.112 1 (0.036 5)***	-0.052 (0.041 8)	-0.202 4 (0.037 8)***	-0.209 7 (0.037 1)***	-0.024 3 (0.037 2)***
D 区组			1.020 5 (0.037 2)***	-0.153 1 (0.059 4)**	-0.152 5 (0.043 7)***	-0.133 9 (0.049 7)***	-0.086 7 (0.045 4)*	-0.349 9 (0.046 4)***	-0.165 7 (0.043 3)***
E 区组			1.070 2 (0.036 6)***	-0.168 6 (0.062 7)***	-0.124 2 (0.046 5)***	-0.151 5 (0.052 1)***	-0.096 1 (0.047 7)**	-0.132 8 (0.012 7)**	-0.090 4 (0.046 9)*
立地条件	否	是	否	是	是	是	是	是	是
林龄效应	否	是	否	是	是	是	是	是	是
竞争指数(<i>Nn</i>)					-0.185 4 (0.020)***				
竞争指数(<i>SBA</i>)						-0.080 0 (0.029 8)***			
竞争指数(<i>C14</i>)							-0.117 1 (0.016 9)***		
竞争指数(<i>C18</i>)								-0.132 8 (0.012 7)***	

续表3

项目	模型								
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
竞争指数(DCI)									-0.138 9 (0.016 3)***
Adjust-R ²	0.244 0	0.986 5	0.906 3	0.980 9	0.986 3	0.981 0	0.987 2	0.989 1	0.987 3
F 值	62.287	506.592	376.369	553.236	738.561	597.761	789.982	924.327	795.113
标准误	0.556 7	0.074 3	0.195 5	0.088 4	0.069 6	0.107 9	0.067 3	0.061 8	0.066 9

注:系数下面的括号内为标准误,个别系数在1%的显著性水平(***表示)、5%的显著性水平(**表示)下或10%的显著性水平(*表示)下,在统计上是显著的。Adjust-R²:调整后的决定系数。

(3)密度虚拟变量的系数在加入竞争指数后变化较大,尤其是在加入变量SBA竞争指数的模型中,较小的林分密度对单木断面积生长的影响不显著。这是因为竞争是林分密度达到一定程度时才发生的,竞争指数与密度因子具有一定的相关性。密度虚拟变量的系数显著为负,说明相对于2 m×3 m(A)的初植密度,林分密度越大,对单木断面积变化的影响越大。

2.2 不同立地条件/林龄对单木断面积的影响

本文应用的模型允许不同立地条件以及不同林龄状况下都存在个体影响,即包含了模型中忽略的反映个体差异的变量的影响。立地条件对单木断面积的拟合偏差在不同的林分密度下略有不同(表4)。大致呈立地指数增加,单木断面积拟合偏差越大的趋势。

表4 不同立地条件对单木断面积拟合偏差(α_i)的估计结果

小区编号	立地指数	拟合偏差 α_i	小区编号	立地指数	拟合偏差 α_i
A ₁	17.52	0.405 467	C3	15.66	-0.010 052
A ₂	18.12	0.201 743	D1	14.4	-0.228 297
A ₃	16.84	0.421 436	D2	14.24	-0.227 550
B ₁	16.18	0.233 582	D3	14.34	-0.168 851
B ₂	15.32	-0.016 129	E1	14.74	-0.248 257
B ₃	15.98	0.219 883	E2	15.82	-0.236 119
C ₁	14.94	0.006 720	E3	16.02	-0.226 191
C ₂	15.42	-0.127 385			

将立地指数与回归,结果见表5。由表中数据不难看出:立地条件解释了其对平均单木断面积偏差的73.85%。模型的F值为17.80,模型总体设定通过统计的显著性检验,并且变量立地指数(SI)的t值在1%的置信水平下显著。这说明立地指数每增加1个单位,立地条件对平均单木断面积的拟合偏差将增加0.159 3个单位。这也再次说明了立地条件对单木断面积生长具有重要影响。

林龄对平均单木断面积拟合偏差的估计结果见

表6。可以明显地看出,随着林龄的增加,其对平均单木断面积拟合偏差的影响增大。

表5 立地条件和林龄对单木断面积拟合偏差的回归分析结果

影响因子	参数		相关系数(r)
	回归系数(t)	截距(t)	
立地条件	-2.501 6(-4.208 5)	0.159 3(4.218 9)	0.738 5
林龄	-0.337 1(-5.050 8)	0.024 5(5.586 3)	0.859 9

表6 不同林龄对平均单木断面积拟合偏差(γ_i)的估计结果

林龄/a	拟合偏差(γ_i)	林龄	拟合偏差(γ_i)
5	-0.443 692	15	0.116 344
6	-0.274 285	17	0.146 638
7	-0.153 190	19	0.146 467
8	-0.088 244	21	0.153 643
9	-0.041 187	23	0.149 438
11	0.031 952	25	0.176 570
13	0.079 548		

表5中数据可以看出:林龄解释了其对平均单木断面积拟合偏差的85.99%。模型的F值为31.21,模型总体设定通过统计的显著性检验,并且变量林龄的t值在1%的置信水平下显著。这说明林龄每增加1个单位,其对平均单木断面积的拟合偏差将增加0.024 5个单位。与立地条件相比较,林龄对单木断面积拟合精度的影响较小。

3 结论

本文应用面板数据固定效应模型模拟杉木人工林单木断面积生长规律。主要获得以下研究结果:

(1)胸径(DBH)和活冠比例(LCR)虽然对单木断面积生长有影响,但解释能力有限(拟合优度仅为0.244 0)。在考虑立地条件、林龄效应后,拟合优度由0.244 0增加到0.986 5,解释了数据变差的大部分变化。这说明立地条件与林龄因素对单木断面积的生长模拟具有重要影响。立地条件对单木断面

积的拟合偏差在不同的林分密度下略有不同,随立地指数增加,单木断面积拟合偏差越大。随着林龄的增加,其对平均单木断面积拟合偏差的影响也增大。

(2)密度因子是单木断面积生长中不可忽略的重要因素,初植密度越大,单木断面积的变异越小。这主要是因为密度越大,树木个体的营养面积越小,树木生长的分化程度越小所导致。

(3)不同的竞争指数对单木断面积生长的解释有明显的差异,与距离无关竞争指数对单木断面积生长的影响表现并不稳定,而与距离有关竞争指数对象木与其竞争木之间距离的比率($C14$)、Hegyi 距离指数(DCI)对单木断面积生长的影响则比较稳定,两者每增加1个单位,单木断面积生长降低幅度均在0.13个单位左右。

(4)在加入变量 SBA 竞争指数的模型中,密度因子与竞争指数有较强的相关性,较小的林分密度对单木断面积生长的影响不显著。这是因为单木间竞争是林分密度达到一定程度时才发生的。

参考文献:

[1] 雷加富. 中国森林资源[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005
 [2] Wykoff W R. A basal area increment models for individual conifer in the northern Rocky mountains [J]. Forest Science, 1990, 36(4): 1077 - 1104

[3] Monserud R A, Sterba H. A basal area increment model for individual tree growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria [J]. Forest Ecology and Management, 1996, 80: 57 - 80
 [4] Jogsite K. A basal area increment model for Norway spruce in mixed stand in Estonia [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2000, 15: 97 - 102
 [5] Mailly D, Turbis S, Pothier D. Predicting basal area increment in a spatially explicit, individual tree model: a test of competition measure with black spruce [J]. Canadian Journal Forest Research, 2003, 33: 435 - 443
 [6] Hökkä H, Groot A. An individual-tree basal area growth model for black spruce in second-growth peatland stands [J]. Canadian Journal Forest Research, 1999, 29: 621 - 629
 [7] Zhang L, Peng C, Dang Q. Individual-tree basal area growth models for jack pine and black spruce in northern Ontario [J]. The Forestry Chronicle, 2004, 80(3): 366 - 374
 [8] Vanclay J K. Modeling Forest Growth and Yield: Application to Mixed Tropical Forest [M]. Wallingford, UK: CAB International, 1994
 [9] Steneker G A, Jarvis J M. A preliminary study to assess competition in a white spruce-trembling aspen stand [J]. The Forestry Chronicle, 1963, 39: 334 - 336
 [10] Lorimer C G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural trees hardwood stands [J]. Forest Ecology and Management, 1983, 6: 343 - 360
 [11] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands[C]// Fries J. Proceedings, Growth Models for Tree and Stand Simulation, IUFRO S4.01 - 4. Stockholm, Sweden: Department of Forest Yield, Royal College of Forestry, 1974: 74 - 87