

天目山常绿阔叶林胸高断面积生长量影响因子研究

窦啸文^{1,2}, 吴登瑜^{1,2}, 张笑菁^{1,3}, 汤孟平^{1,2}

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】研究常绿阔叶林胸高断面积生长模型, 探究影响胸高断面积生长量的因素, 为常绿阔叶林经营提供理论依据。【方法】以天目山常绿阔叶林为对象, 先对胸高断面积生长量与胸径、竞争和地形因子进行相关性分析, 随后对不同径级、冠幅等级和竞争等级的胸高断面积生长量进行差异性分析, 最后基于岭回归分析法, 建立以胸高断面积生长量对数为因变量的单木生长模型, 定量描述胸高断面积生长量与胸径、竞争和地形因子的关系。【结果】胸径、冠幅、竞争与胸高断面积生长量的斯皮尔曼 (Spearman) 相关系数分别为 0.531、0.427、-0.340。林木胸高断面积生长量随着林木胸径的增大而增大, 不同径级间差异极显著 ($P < 0.01$)。林木胸高断面积生长量随着林木冠幅的增大而增大, 不同冠幅等级间差异极显著 ($P < 0.01$)。不同竞争等级的林木胸高断面积生长量差异极显著 ($P < 0.01$), 且低度竞争时的林木胸高断面积生长量最大。基于径阶平均值的单木生长模型优于基于单株林木的单木生长模型, 且 2 类模型中胸径因子的回归参数均达极显著水平 ($P < 0.01$)。【结论】在天目山常绿阔叶林中影响胸高断面积生长量的主要因子是胸径、冠幅和竞争指数。图 3 表 4 参 45

关键词: 常绿阔叶林; 胸高断面积生长量; 竞争指数; 岭回归分析; 生长模型

中图分类号: S757 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2023)05-1063-10

Study on the factors affecting breast-height basal area increment of evergreen broad-leaved forest in Mount Tianmu

DOU Xiaowen^{1,2}, WU Dengyu^{1,2}, ZHANG Xiaojing^{1,3}, TANG Mengping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] The objective is to study the growth model of breast-height basal area of evergreen broad-leaved forest and to explore the factors affecting breast-height basal area increment (BAI) of evergreen broad-leaved forest, so as to provide a theoretical basis for evergreen broad-leaved forest management. [Method] Taking the evergreen broad-leaved forest in Mount Tianmu as the research object. Firstly, the correlation between BAI and diameter at breast height (DBH), competition and terrain factors were analyzed. Secondly, the differences of BAI among different diameter classes, crown diameter classes and competition classes were discussed. And finally, based on the ridge regression analysis, the individual tree growth model with logarithm of BAI as the dependent variable was established to quantitatively describe the relationship between BAI and DBH, competition and terrain factors. [Result] The Spearman's correlation coefficients between BAI and DBH, crown diameter, and competition were 0.531, 0.427 and -0.34 respectively. BAI was

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-01-20

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (31870617)

作者简介: 窦啸文 (ORCID: 0000-0002-9692-0447), 从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: 1506368680@qq.com。通信作者: 汤孟平 (ORCID: 0000-0001-9277-2822), 教授, 博士, 从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: tmpzafu@163.com

extremely significant different among trees of different diameter classes ($P < 0.01$), and increased with increase of DBH. There was a significant difference ($P < 0.01$) in BAI among trees with different competition classes, and trees with low competition level had the largest BAI. Individual tree growth models based on average diameter grade were superior to those based on individual tree, and the regression parameters of DBH in both types of models were extremely significant ($P < 0.01$). [Conclusion] In the evergreen broad-leaved forest of Mount Tianmu, the main factors affecting BAI are DBH, crown diameter and competition index. [Ch, 3 fig. 4 tab. 45 ref.]

Key words: evergreen broad-leaved forest; breast-height basal area increment; competition index; ridge regression analysis; growth model

断面积生长模型是森林生长和收获预估的重要基础^[1]。目前,在区域尺度上,较为常见的,是基于抽样方法的多个小样地(400~600 m²)调查数据,并用逐步回归的方法^[2-4]建立某个树种的单木断面积生长模型,模型的自变量包括林木大小、竞争、地形等因子^[5-8]。由于逐步回归法直接剔除共线性自变量,导致完全忽视被剔除变量的影响。岭回归分析是一种专门用于共线性数据分析的有偏估计方法。针对共线性的病态数据,岭回归既保留了全部自变量,又在一定程度上减少了多重共线性对回归结果的影响^[9]。但是,岭回归在单木断面积生长模型研究中应用较少。已有研究表明:在群落尺度上,为精准掌握森林空间结构,样地面积至少为2 500 m²^[10]。然而,基于群落大型固定样地,建立包含森林空间结构变量的单木断面积生长模型研究少见报道。因此,岭回归分析应用于建立大型固定样地的单木断面积生长模型的问题值得探讨,可以在不剔除自变量的基础上,对含有不同自变量的模型进行比较,定量描述不同自变量对胸高断面积生长量的影响。

常绿阔叶林是中国亚热带最复杂、生产力最高、生物多样性最丰富的顶级森林群落,对保护环境、维持全球性碳循环平衡和人类可持续发展等都具有极重要的作用^[11]。目前,对常绿阔叶林的研究集中在空间结构^[12-13]、生物多样性^[14]、碳储量^[15]等方面,而关于单木断面积生长量的研究少见报道。本研究以浙江天目山国家级自然保护区内常绿阔叶林为对象,分析林木大小、竞争因子、地形因子与胸高断面积生长量的相关性,再对不同胸径大小、冠幅和竞争等级的胸高断面积生长量进行差异性分析,最后基于岭回归,建立以胸高断面积生长量对数为因变量的单木生长模型,定量描述胸高断面积生长量与胸径、竞争和地形因子的关系,为常绿阔叶林经营提供理论依据。

1 研究区概况

天目山国家级自然保护区位于浙江省杭州市临安区西北部(30°18'30"~30°24'55"N, 119°24'11"~119°28'21"E),距杭州市中心94 km,总面积为4 284 hm²。该保护区属中亚热带向北亚热带过渡气候,受海洋暖湿气流影响,季风盛行,气候温和。年平均气温为8.8~14.8℃,最冷月平均气温为-2.6~3.4℃,最热月平均气温为19.9~28.1℃。雨水充沛,年降水量为1 390~1 870 mm。森林类型多样,主要有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、落叶矮林、针叶林和毛竹 *Phyllostachys edulis* 林等^[16]。

2 研究方法

2.1 样地设置

2005年,在研究区内选择代表性地段,设置100 m×100 m的常绿阔叶林固定样地,样地中心地理坐标为:30°19'40"N, 119°26'12"E,并用相邻格子调查法将样地划分成10 m×10 m的网格单元。对网格单元进行每木检尺,记录树种、胸径、树高、活枝下高、冠幅等,并以样地西南角为原点,采用激光对中全站仪(徕卡TCR702)测定每株林木的坐标及海拔。2020年对该样地进行复查。本研究采用2005和2020年2期调查数据,从中筛选出2期均存活且胸径≥5 cm的活立木共计733株。其中,常绿阔叶优势树种有细叶青冈 *Cyclobalanopsis gracilis*、短尾柯 *Lithocarpus brevicaudatus*、青冈 *C. glauca*、小叶青冈 *C. myrsinifolia*、豹皮樟 *Litsea coreana* 等,占全部活立木的51.99%。

2.2 胸高断面面积生长量

林木的生长量指一定间隔期内林木各种调查因子的变化量，分为总生长量、定期生长量、连年生长量、定期平均生长量和总平均生长量等^[17]。本研究采用 2005—2020 年 15 a 间林木胸高断面面积的定期生长量。计算公式为：

$$B_{AI} = \frac{\pi(D_{t_2}^2 - D_{t_1}^2)}{4} \quad (1)$$

式 (1) 中： B_{AI} 为林木胸高断面面积生长量 (cm^2)； D_{t_1} 和 D_{t_2} 分别为林木在 t_1 和 t_2 时的胸径 (cm)。

2.3 生长模型的建立

单木生长模型主要有潜在生长量修正法、回归分析法和生长分析法^[18]。本研究采用回归分析法，建立林木胸高断面面积生长量对数与林木大小、竞争和立地等因子之间的回归方程^[5-8]：

$$\ln B_{AI} = a + bf(x_1) + cf(x_2) + df(x_3) \quad (2)$$

式 (2) 中： B_{AI} 为胸高断面面积生长量； $f(x_1)$ 为林木大小因子的函数； $f(x_2)$ 为林木竞争因子的函数； $f(x_3)$ 为林木立地因子的函数； a 为常数项； b 、 c 、 d 为方程参数。

2.4 模型因子的选取

2.4.1 林木大小因子的选取 林木大小是影响林木断面面积生长量的最重要因子^[6]。林木胸径是反映林木大小的最直观因子，也是预测林木生长最重要的因子之一^[19]。林木胸径平方能够很好地表述林木生长趋势，即林木在幼龄时生长速度较快，成熟时生长达到顶峰，随后生长速度开始逐渐下降^[2]。此外，用胸径对数进行建模分析也较常见^[5-6]。冠幅直接影响林木进行生理活动的的能力^[20]，因此在林木生长模型中常作为反映林木大小的变量。如 MONSERUD 等^[6]发现：冠长率能解释奥地利针叶树种和阔叶树种断面面积生长量 14%~47% 的变异。本研究选取林木的胸径平方、胸径对数和冠幅来代表林木大小。这里，冠幅用冠幅半径表示，计算公式为：

$$C_r = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (3)$$

式 (3) 中： C_r 为林木冠幅半径 (m)； L_1 、 L_2 分别为林木东西、南北冠幅半径 (m)。因此，林木大小因子的函数表达式为：

$$bf(x_1) = b_1 \ln D + b_2 D^2 + b_3 C_r \quad (4)$$

式 (4) 中： D 为林木胸径； b_1 、 b_2 、 b_3 为方程参数。

2.4.2 林木竞争因子的选取 林木竞争限制林木生长^[21]。本研究选取 Hegyi 竞争指数^[22]及其对数形式来表示林木竞争因子的大小。其中，竞争木的选择采用汤孟平等^[23]提出的基于 Voronoi 图的方法。Hegyi 竞争指数的计算公式为：

$$I_C = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{D_j}{D_i L_{ij}} \quad (5)$$

式 (5) 中： I_C 为对象木 i 的竞争指数； D_i 、 D_j 分别为对象木 i 和竞争木 j 的胸径 (cm)； L_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 之间的距离 (m)； n_i 为对象木 i 所在竞争单元的竞争木株数。因此，林木竞争因子的函数表达式为：

$$cf(x_2) = c_1 \ln I_C + c_2 I_C \quad (6)$$

式 (6) 中： c_1 、 c_2 为方程的参数。

2.4.3 立地因子的选取 地形是影响林木生长的重要因素。如 COOMES 等^[24]在研究新西兰的森林时，发现随着海拔的升高，林木生长率有下降的趋势；STAGE 等^[25]发现：坡度、坡向、海拔的交互作用影响森林的物种组成和森林的生产力；BARIBAULT 等^[26]发现：森林地形的差异会导致林木间的生长有很大的不同。根据前人构建的生长模型^[5-6]，选取海拔、坡度和坡向作为模型的立地因子。其中，采用坡向指数 (A_s) 来代表坡向。坡向指数的计算公式为^[27-28]：

$$A_s = -\cos\left(\frac{2\pi\theta}{360}\right). \quad (7)$$

式(5)中: A_s 为坡向指数; θ 为坡向值 ($0^\circ \sim 360^\circ$)。因此, 立地因子的函数表达式为:

$$df(x_3) = d_1 A_1 + d_2 S_1 + d_3 A_s. \quad (8)$$

式(8)中: A_1 为林木所处的海拔; S_1 为林木所处的坡度; d_1 、 d_2 、 d_3 分别为方程参数。将式(4)、式(6)、式(8)代入式(2)得到最终的林木胸高断面积生长模型:

$$\ln B_{AI} = a + b_1 \ln D + b_2 D^2 + b_3 C_r + c_1 \ln I_C + c_2 I_C + d_1 A_1 + d_2 S_1 + d_3 A_s. \quad (9)$$

2.5 统计分析

在 Excel 2019 中对数据进行预处理。基于林木的三维坐标, 利用 ArcMap 10.7 插值分析提取坡度、方位角数据; 基于 ArcMap 10.7 和 Python 语言编程计算每株林木的竞争指数; 在 SPSS 26 中采用 Kolmogorov-Smirnov 检验法对各因子进行正态性分析, 并利用 Spearman 相关系数进行相关性分析; 利用 SPSSAU 采用 Kruskal-Wallis 检验法 (K-W) 和 Nemenyi 法分析不同胸径大小、竞争条件下林木胸高断面积生长量的差异性, 采用岭回归方法建立单木生长模型。

3 结果与分析

3.1 相关性分析

在常绿阔叶林样地内, 计算活立木在 2005 年时的胸径、冠幅、海拔、坡度、坡向指数、竞争指数及 2005—2020 年间胸高断面积生长量的均值、标准差 (表 1)。对各变量进行 Kolmogorov-Smirnov 检验, 发现所有变量的显著性都小于 0.05, 均不符合正态分布, 故用 Spearman 相关系数进行相关性分析 (表 2)。结果表明: 胸高断面积生长量与胸径、冠幅均呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 与竞争指数呈现极显著负相关 ($P < 0.01$), 与地形因子的相关系数均不显著。说明天目山常绿阔叶林的林木胸径、冠幅对林木胸高断面积的生长起到正向作用, 竞争对林木胸高断面积生长起到负向作用, 地形因子对林木胸高断面积生长的影响小。胸径和冠幅均与竞争指数极显著负相关 ($P < 0.01$), 说明竞争抑制林木胸径和冠幅的生长。冠幅与海拔极显著正相关 ($P < 0.01$), 说明海拔影响林木冠幅的生长。坡向指数与冠幅显著负相关 ($P < 0.05$), 说明坡向影响林木冠幅的生长。

表 1 各变量统计结果

Table 1 Statistics results of each variable

项目	胸径/cm	冠幅/m	海拔/m	坡度/(°)	坡向指数	竞争指数	2005—2020年胸高断面积生长量/cm ²
均值	13.15	1.86	631.53	42.50	0.41	8.44	74.80
标准差	8.70	0.79	19.61	15.88	0.48	16.38	93.61

表 2 各变量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of each variable

变量	胸径	冠幅	海拔	坡度	坡向指数	竞争指数	胸高断面积生长量
胸径	1.000						
冠幅	0.714**	1.000					
海拔	0.069	0.129**	1.000				
坡度	-0.024	-0.032	-0.006	1.000			
坡向指数	-0.035	-0.078*	-0.065	0.052	1.000		
竞争指数	-0.618**	-0.374**	-0.020	-0.068	0.038	1.000	
胸高断面积生长量	0.531**	0.427**	0.019	-0.069	0.014	-0.340**	1.000

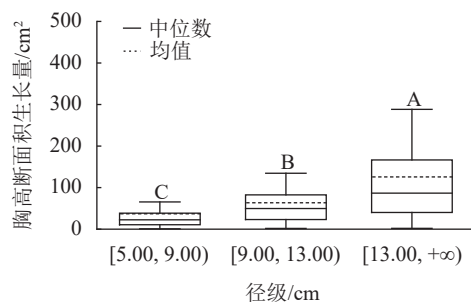
说明: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

3.2 胸径对胸高断面积生长量的影响

样地林木胸径均值为 13.15 cm，胸径最小值为 5.00 cm，最大值为 50.30 cm。根据林木胸径均值和分布范围，将其分为 3 个径级：[5.00, 9.00)、[9.00, 13.00)、[13.00, +∞)，分别表示为 I 径级、II 径级、III 径级。对不同径级林木的胸高断面积生长量进行 Kruskal-Wallis 非参数检验。结果显示：I 径级、II 径级和 III 径级的胸高断面积生长量中位数分别为 22.50、49.68 和 86.71 cm²，K-W 检验的统计量 (H)=185.84， $P<0.01$ ，存在极显著差异，表明胸高断面积生长量随着林木胸径的增加而增加。用 Nemenyi 法进一步证明 (图 1)：I 径级、II 径级、III 径级林木的胸高断面积生长量两两之间差异极显著 ($P<0.01$)。说明林木胸径大小是导致胸高断面积生长量差异的主要因子之一。

3.3 冠幅对胸高断面积生长量的影响

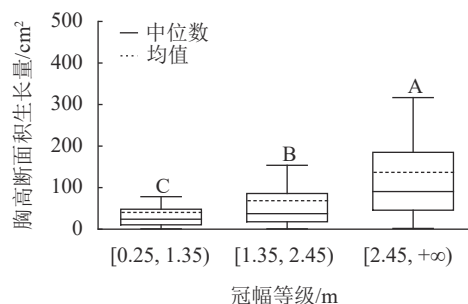
样地林木冠幅均值为 1.86 m，冠幅最小值为 0.25 m，最大值为 6.11 m。根据林木冠幅均值和分布范围，将其分为 3 个等级：[0.25, 1.35)、[1.35, 2.45)、[2.45, +∞)，分别表示为 I 冠幅、II 冠幅、III 冠幅。对不同冠幅等级林木的胸高断面积生长量进行 Kruskal-Wallis 非参数检验。结果显示：I 冠幅、II 冠幅和 III 冠幅林木的胸高断面积生长量的中位数分别为 24.03、37.37 和 90.65 cm²， $H=96.627$ ， $P=0.000<0.01$ ，存在极显著差异，林木胸高断面积生长量随着林木冠幅的增加而增加。用 Nemenyi 法进一步证明 (图 2)：I 冠幅与 II 冠幅、III 冠幅林木的胸高断面积生长量两两之间差异极显著 ($P<0.01$)。说明，林木冠幅大小是导致胸高断面积生长量差异的主要因素之一。



不同大写字母表示在不同径级存在极显著差异 ($P<0.01$)。

图 1 不同径级的胸高断面积生长量

Figure 1 Breast-height basal area increment for different diameter classes



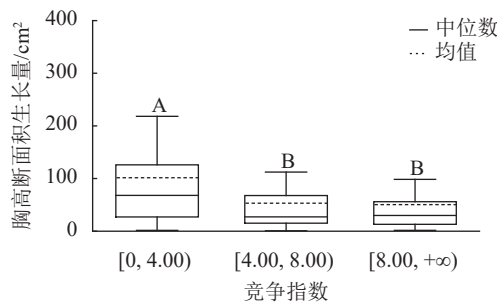
不同大写字母表示在不同冠幅等级存在极显著差异 ($P<0.01$)。

图 2 不同冠幅等级的胸高断面积生长量

Figure 2 Breast-height basal area increment for different crown classes

3.4 竞争对胸高断面积生长量的影响

样地林木竞争指数均值为 8.44，竞争指数最小值为 0.47，最大值为 217.79。根据林木竞争指数均值和分布范围，将其分为 3 个等级：[0, 4.00)、[4.00, 8.00)、[8.00, +∞)，分别用 I 竞争、II 竞争和 III 竞争表示，对应 3 个竞争强度等级：低度、中度、强度。不同等级的竞争指数代表林木受到的竞争压力大小不同，数值越大，竞争压力越大。对不同竞争强度等级林木的胸高断面积生长量进行 K-W 非参数检验。结果显示：I 竞争、II 竞争和 III 竞争林木的胸高断面积生长量的中位数分别为 67.90、27.14 和 29.90 cm²， $H=67.434$ ， $P<0.01$ ，存在极显著差异；不同竞争强度等级的林木的胸高断面积生长量不同，低度竞争强度的林木胸高断面积生长量最大。用 Nemenyi 法进一步证明 (图 3)：低度竞争与中度竞争、强度竞争林木的胸高断面积生长量呈现极显著差异 ($P<0.01$)。低度竞争林木的胸高断面积生长量中位数最大，说明林木受到的竞争压力越小，有利于提高林木胸高断面积生长量。



不同大写字母表示在不同竞争等级存在极显著差异 ($P<0.01$)。

图 3 不同竞争等级的胸高断面积生长量

Figure 3 Breast-height basal area increment for different competition classes

3.5 单木生长模型

因为冠幅、竞争指数与胸径相关系数的绝对值

均大于 0.6, 所以进行最小二乘回归时存在共线性问题。因此, 本研究为探究胸径和竞争指数对胸高断面面积生长量的影响, 以式 (9) 为基础模型, 林木胸高断面面积生长量对数为因变量, 冠幅、海拔、坡度和坡向指数为控制变量, 分别以胸径平方、胸径对数、竞争指数和竞争指数对数的不同组合为自变量进行岭回归, 得到基于单株林木的单木生长模型 (表 3); 对 2005 年调查的林木胸径按 2 cm 为组距进行径阶整化, 对林木大小因子、竞争因子和立地因子计算其每一径阶的平均值, 以每一径阶内林木胸高断面面积生长量对数的平均值为因变量, 冠幅、海拔、坡度和坡向指数等因子的平均值为控制变量, 分别以每一径阶内胸径平方、胸径对数、竞争指数和竞争指数对数的平均值的不同组合为自变量进行岭回归, 得到基于径阶平均值的单木生长模型 (表 4)。其中 2 类岭回归模型的 K 值采用 SPSSAU 给予的推荐值。

表 3 基于单株林木的单木生长模型

Table 3 Individual tree growth models based on individual tree

模型	常数	$\ln D$	D^2	C_r	$\ln I_C$	I_C	A_l	S_l	A_s	R^2	调整 R^2	F
模型1	2.472**	0.350**	0.000**	0.169**	-0.063**	0.002	0.000	-0.002*	0.043	0.267	0.258	32.895**
模型2	2.510**	0.438**		0.202**	-0.087**	0.002	0.000	-0.003*	0.040	0.248	0.240	34.091**
模型3	3.121**		0.001**	0.226**	-0.097**	0.002	0.000	-0.003*	0.038	0.228	0.221	30.639**
模型4	3.435**			0.300**	-0.148**	0.002	0.000	-0.003*	0.031	0.165	0.158	23.970**
模型5	2.459**	0.348**	0.000**	0.169**	-0.051**		0.000	-0.003*	0.043	0.264	0.256	37.076**
模型6	2.323**	0.369**	0.000**	0.173**		0.001	0.000	-0.002	0.043	0.265	0.258	37.325**
模型7	2.330**	0.367**	0.000**	0.173**			0.000	-0.002*	0.043	0.264	0.258	43.402**
模型8	2.497**	0.437**		0.202**	-0.075**		0.000	-0.003*	0.040	0.244	0.238	39.076**
模型9	2.303**	0.473**		0.211**		0.726	0.000	-0.002	0.040	0.242	0.236	38.712**
模型10	3.107**		0.001**	0.226**	-0.087**		0.000	-0.003*	0.038	0.225	0.219	35.221**
模型11	2.941**		0.001**	0.238**		0.000	0.000	-0.002	0.037	0.220	0.213	34.109**

说明: D : 胸径; C_r : 冠幅; I_C : Hegyi 竞争指数; A_l : 海拔; S_l : 坡度; A_s : 坡向指数; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; 表中数值均为模型回归系数。

表 4 基于径阶平均值的单木生长模型

Table 4 Individual tree growth models based on average of diameter grade

模型	常数	$\ln D$	D^2	C_r	$\ln I_C$	I_C	A_l	S_l	A_s	R^2	调整 R^2	F
模型12	11.245*	0.351**	0.000**	0.232**	-0.098	-0.037**	-0.014	0.013	0.287	0.949	0.917	30.114**
模型13	11.286	1.238**		0.252	-0.102	0.057	-0.019	0.018	0.384	0.956	0.933	43.045**
模型14	12.499*		0.000**	0.266**	-0.128**	-0.058**	-0.015*	0.012	0.232	0.931	0.897	27.004**
模型15	15.728**			0.285**	-0.156**	-0.063**	-0.019*	0.015	0.219	0.843	0.780	13.395**
模型16	9.904	0.470**		0.264**	-0.120*		-0.013	0.011	0.254	0.951	0.927	39.004**
模型17	13.085*	0.404**	0.000**	0.213**		-0.045**	-0.018*	0.014	0.243	0.947	0.920	35.603**
模型18	12.101*	0.555**	0.000**	0.249**			-0.017*	0.013	0.172	0.945	0.924	43.334**
模型19	13.520*	0.796**		0.293**	-0.122		-0.021*	0.019	0.360	0.947	0.925	44.235**
模型20	14.260*	1.341**		0.197		0.045	-0.025*	0.021	0.378	0.952	0.933	49.636**
模型21	12.695**		0.000**	0.283**	-0.160**		-0.015*	0.010	0.146	0.858	0.802	15.164**
模型22	14.932**		0.000**	0.261**		-0.071**	-0.019*	0.014	0.154	0.922	0.890	29.406**

说明: D : 胸径; C_r : 冠幅; I_C : Hegyi 竞争指数; A_l : 海拔; S_l : 坡度; A_s : 坡向指数; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; 表中数值均为模型回归系数。

在基于单株林木的单木生长模型中 (表 3), 比较模型 2 和模型 3、模型 8 和模型 10、模型 9 和模型 11, 发现含有胸径对数的模型比含有胸径平方的模型拟合精度高; 比较模型 1~模型 4, 发现含有胸径因子的模型拟合精度优于不含胸径的模型; 比较模型 1、模型 5、模型 6 和模型 7, 有无竞争指数对模型的拟合精度影响小; 比较模型 1~模型 11, 发现模型中常数项、胸径对数、胸径平方、冠幅和竞争指数对数的回归系数均极显著 ($P < 0.01$), 说明胸径、冠幅和竞争指数对数是单木生长模型中的重要因子; 比较

模型 1~模型 11 的 R^2 及调整后的 R^2 ，模型 1 是基于单株林木的单木生长模型中的最优模型，该模型中的常数项、胸径对数、胸径平方、冠幅、竞争指数对数和坡度等回归系数显著 ($P < 0.05$)。

在基于径阶平均值的单木生长模型中 (表 4)，比较模型 13 和模型 14、模型 19 和模型 21、模型 20 和模型 22，发现含有胸径对数的模型比含有胸径平方的模型拟合精度高；比较模型 12~模型 15，发现含有胸径因子的模型拟合精度优于不含胸径因子的模型；比较模型 12、模型 16、模型 17 和模型 18，有无竞争指数对模型的拟合精度影响小；比较模型 12~模型 22，发现模型中胸径对数和胸径平方的回归系数均显著 ($P < 0.05$)，说明胸径是基于径阶平均值的单木生长模型中的重要因子；比较模型 12~模型 22 的 R^2 及调整后的 R^2 ，得出模型 13 是基于径阶平均值单木生长模型中的最优模型，该模型中胸径对数的回归系数极显著 ($P < 0.01$)。

比较表 3 和表 4 中的模型，发现 2 类生长模型中胸径因子的回归系数均显著，且含有胸径因子的模型拟合精度均优于不含胸径因子的模型；基于径阶平均值的单木生长模型拟合精度高于基于单株林木的单木生长模型。

4 讨论

通过对胸径与胸高断面积生长量进行 Spearman 相关分析和 Kruskal-Wallis 检验，发现胸径与胸高断面积生长量呈正相关，且胸高断面积生长量随着胸径的增大而增大。该结论与多数学者的研究一致，如 CHI 等^[29] 在研究中国神农架常绿落叶阔叶混交林的林木大小、相邻木和立地条件对林木生长的影响时发现，林木的生长量与初始胸径大小具有显著的相关关系，并且随着初始胸径的增大而增大。FIEN 等^[30] 对美国缅因州中部的异龄林单木生长和死亡的影响因子进行了研究，认为树种的胸高断面积与胸径均呈显著正相关。有研究表明：林木生长通常会先随胸径的增大而增加，在达到一定阶段后又会随胸径的增大而减小^[31]。但也有研究指出：不同的森林类型，林木生长与胸径的关系有较大差异^[32]。

竞争与胸高断面积生长量的 Spearman 相关分析表明：竞争与胸高断面积生长量呈现负相关关系，低度竞争强度有助于林木生长。这个结论与前人的研究结果基本一致，de GROOTE 等^[33] 研究了比利时北部森林竞争对夏栎 *Quercus robur*、欧洲山毛榉 *Fagus sylvatica* 和红槲栎 *Q. rubra* 生长的影响，指出竞争与断面积生长量呈负相关。窦啸文等^[34] 在研究天目山针阔混交林竞争对生长的影响时，证实林木胸高断面积生长量与 Hegyi 竞争指数服从对数函数关系，且胸高断面积生长量与竞争指数显著负相关。

分析地形因子与胸高断面积生长量的相关性发现：海拔、坡向、坡度等地形因子与胸高断面积生长量的相关性较小。POMPA-GARCÍA 等^[35] 研究了地形对墨西哥针叶树生长的影响，指出林木基部断面积生长量随海拔的变化有显著差异，海拔 1 001~1 500 m 的地区林木基部断面积生长量较高。本研究所选取的林木在同一固定样地内，海拔范围为 575~677 m，地形变化不大，因此对林木生长影响较小。

本研究中竞争指数的回归系数并非都在单木生长模型达显著水平，这可能与竞争指数的选择有关。有研究表明：在选择与距离有关的竞争指数时，包含树冠因子的竞争指数优于胸径大小比值的竞争指数^[31]。而本研究中冠幅因子的回归系数均在单木生长模型达到显著水平，这也验证了这一观点。但是，也有学者认为采用与距离无关的竞争指数的生长模型的拟合精度优于采用与距离相关的竞争指数的生长模型^[36]。针对常绿阔叶林的生长模型，与距离无关的竞争指数是否优于与距离有关的竞争指数值得探讨。

林木生长还受光照、温度、水和土壤等因子的影响^[37-41]，本研究未考虑这些因素。近些年来，有学者构建了不同树种的生长混合效应模型，发现混合效应模型的拟合精度明显优于一般模型^[42-45]。因此，在进一步研究中，可构建多因子的混合效应模型，综合分析影响林木胸高断面积生长量的因素。

5 结论

通过对浙江天目山国家级自然保护区内的常绿阔叶林的林木胸高断面积生长量的影响因子进行分析，得出以下主要结论：①胸径、冠幅和竞争指数与胸高断面积生长量的相关性高，地形因子与胸高断面积生长量的相关性低。②不同径级、冠幅等级和竞争指数等级的胸高断面积生长量差异性显著。③基于径阶平均值的单木生长模型拟合精度高于基于单株林木的单木生长模型，且胸径和冠幅的回归系数均

显著。④影响常绿阔叶林胸高断面积生长量的主要因子是林木胸径、冠幅和竞争指数,海拔、坡度等地形因子对胸高断面积生长量的影响不大。

6 参考文献

- [1] 唐守正, 杜纪山. 利用树冠竞争因子确定同龄间伐林分的断面积生长过程[J]. 林业科学, 1999, **35**(6): 35 – 41.
TANG Shouzheng, DU Jishan. Determining basal area growth process of thinned even aged stands by crown competition factor [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, **35**(6): 35 – 41.
- [2] 王建军, 曾伟生, 孟京辉. 考虑预估期间林木枯死及采伐影响的杉木单木胸高断面积生长模型研究[J]. 西北林学院学报, 2017, **32**(3): 181 – 185.
WANG Jianjun, ZENG Weisheng, MENG Jinghui. Individual-tree basal area growth model for *Cunninghamia lanceolata* with the consideration of thinning and tree mortality in the prediction interval [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, **32**(3): 181 – 185.
- [3] 卢军. 长白山地区天然混交林单木生长模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
LU Jun. *Individual Tree Growth Models of Natural Mixed Forest in Changbai Mountains*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005.
- [4] 罗保蟠. 吉林蛟河针阔叶混交林主要树种单木生长模型[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
LUO Baoyue. *Individual Tree Growth Model of Main Tree Species in Coniferous and Broad-leaved Mixed Forest in Jiaohe, Jilin*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [5] WYKOFF W R. A basal area increment model for individual conifers in the northern Rocky Mountains [J]. *Forest Science*, 1990, **36**(4): 1077 – 1104.
- [6] MONSERUD R A, STERBA H. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria [J]. *Forest Ecology Management*, 1996, **80**(1): 57 – 80.
- [7] OZDEMIR E. Individual tree basal area increment model for sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) in coppice-originated stands [J/OL]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2021, **193**: 357[2022-09-18]. doi:10.1007/s10661-021-09128-5.
- [8] STERBA H, BLAB A, KATZENSTEINER K. Adapting an individual tree growth model for Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in pure and mixed species stands [J]. *Forest Ecology Management*, 2002, **159**(1/2): 101 – 110.
- [9] 满敬鑫, 杨薇. 基于多重共线性的处理方法[J]. 数学理论与应用, 2010, **30**(2): 105 – 109.
MAN Jinglun, YANG Wei. Based on multiple collinearity processing method [J]. *Mathematical Theory and Application*, 2010, **30**(2): 105 – 109.
- [10] 李丽, 惠淑荣, 惠刚盈, 等. 森林结构调查最小面积的研究[J]. 林业资源管理, 2007(2): 47 – 51.
LI Li, HUI Shurong, HUI Gangying, et al. A study on the minimum area of forest spatial investigation [J]. *Forest Resources Management*, 2007(2): 47 – 51.
- [11] 包维楷, 刘照光, 刘朝禄, 等. 中亚热带湿性常绿阔叶次生林自然恢复15年来群落乔木层的动态变化[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(6): 702 – 709.
BAO Weikai, LIU Zhaoguang, LIU Chaolu, et al. Fifteen-year changes of tree layer in secondary *Castanopsis-Schima* humid evergreen broad-leaved forest in central subtropics of western China [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, **24**(6): 702 – 709.
- [12] 张毅锋, 汤孟平. 天目山常绿阔叶林空间结构动态变化特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(5): 1959 – 1969.
ZHANG Yifeng, TANG Mengping. Analysis on spatial structure dynamic characteristics of evergreen broad-leaved forest in Tianmu Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(5): 1959 – 1969.
- [13] 龙俊松, 汤孟平. 天目山常绿阔叶林空间结构与地形因子的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(1): 47 – 57.
LONG Junsong, TANG Mengping. Relationship spatial structure and terrain factors of evergreen broad-leaved forest in Mount Tianmu [J]. *Journal Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(1): 47 – 57.
- [14] 贺金生, 陈伟烈, 李凌浩. 中国中亚热带东部常绿阔叶林主要类型的群落多样性特征[J]. 植物生态学报, 1998, **22**(4): 303 – 311.
HE Jinsheng, CHEN Weilie, LI Linghao. Community diversity of the main types of the evergreen broad-leaved forest in the eastern part of the middle subtropical China [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1998, **22**(4): 303 – 311.
- [15] 邱凤英, 肖复明, 郭捷, 等. 江西金盆山林区天然常绿阔叶林生态系统碳储量研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020,

- 40(1): 105 – 113.
- QIU Fengying, XIAO Fuming, GUO Jie, *et al.* Carbon storage of evergreen broad-leaved forest, Jinpenshan, Jiangxi Province [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2020, **40**(1): 105 – 113.
- [16] 汤孟平, 周国模, 施拥军, 等. 天目山常绿阔叶林优势种群及其空间分布格局[J]. *植物生态学报*, 2006, **30**(5): 743 – 752.
- TANG Mengping, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, *et al.* Study of dominant plant populations and their spatial patterns in evergreen broadleaved forest in Tianmu Mountain, China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, **30**(5): 743 – 752.
- [17] 孟宪宇. 测树学[M]. 3版. 北京: 中国林业出版社, 2006: 173 – 174.
- MENG Xianyu. *Forest Mensuration* [M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006: 173 – 174.
- [18] 张会儒. 森林经理学研究方法与实践[M]. 北京: 中国林业出版, 2018: 194 – 195.
- ZHANG Huiru. *Research Methods and Practice of Forest Management* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2018: 194 – 195.
- [19] WEINER J, DAMGAARD C. Size-asymmetric competition and size-asymmetric growth in a spatially explicit zone-of-influence model of plant competition [J]. *Ecological Research*, 2006, **21**(5): 707 – 712.
- [20] 吴明钦, 孙玉军, 郭孝玉, 等. 长白落叶松树冠体积和表面积模型[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(5): 1 – 5.
- WU Mingqin, SUN Yujun, GUO Xiaoyu, *et al.* Predictive models of crown volume and crown surface area for Korean larch [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, **42**(5): 1 – 5.
- [21] LOONEY C E, D'AMATO A W, PALIK B J, *et al.* Size-growth relationship, tree spatial patterns, and tree-tree competition influence tree growth and stand complexity in a 160-year red pine chronosequence [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, **424**: 85 – 94.
- [22] HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands [M]//FRIES J. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974: 74 – 90.
- [23] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于Voronoi图的群落优势树种种内种间竞争[J]. *生态学报*, 2007, **27**(11): 4707 – 4716.
- TANG Mengping, CHEN Yonggang, SHI Yongjun, *et al.* Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant population based on Voronoi diagram [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(11): 4707 – 4716.
- [24] COOMES D A, ALLEN R B. Effects of size, competition and altitude on tree growth [J]. *Journal of Ecology*, 2007, **95**(5): 1084 – 1097.
- [25] STAGE A R, SALAS C. Interactions of elevation, aspect, and slope in models of forest species composition and productivity [J]. *Forest Science*, 2007, **53**(4): 486 – 492.
- [26] BARIBAULT T W, KOBE R K, FINLEY A O. Tropical tree growth is correlated with soil phosphorus, potassium, and calcium, though not for legumes [J]. *Ecological Monographs*, 2012, **82**(2): 189 – 203.
- [27] 陈兵红, 靳全锋, 柴红玲, 等. 浙江省大气PM_{2.5}时空分布及相关因子分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 817 – 829.
- CHEN Binghong, JIN Quanfeng, CHAI Hongling, *et al.* Spatiotemporal distribution and correlation factors of PM_{2.5} concentrations in Zhejiang Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 817 – 829.
- [28] 付婧婧, 吴志伟, 闫赛佳, 等. 气候、植被和地形对大兴安岭林火烈度空间格局的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(5): 1672 – 1682.
- FU Jingjing, WU Zhiwei, YAN Saijia, *et al.* Effects of climate, vegetation, and topography on spatial patterns of burn severity in the Great Xing'an Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(5): 1672 – 1682.
- [29] CHI Xiulian, TANG Zhiyao, XIE Zhongqiang, *et al.* Effects of size, neighbors, and site condition on tree growth in a subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest, China [J]. *Ecology and Evolution*, 2015, **5**(22): 5149 – 5161.
- [30] FIEN E K P, FRAVER S, TEETS A, *et al.* Drivers of individual tree growth and mortality in an uneven-aged, mixed-species conifer forest [J/OL]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **449**(4): 117446[2022-09-18]. doi: 10.1016/j.foreco.2019.06.043.
- [31] CANHAM C D, LEPAGE P T, COATES K D. A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, **34**(4): 778 – 787.
- [32] MULLER-LANDAU H C, CONDIT R S, HARMS K E, *et al.* Comparing tropical forest tree size distributions with the predictions of metabolic ecology and equilibrium models [J]. *Ecology Letters*, 2006, **9**: 589 – 602.
- [33] de GROOTE S R E, VANHELLEMONT M, BAETEN L, *et al.* Competition, tree age and size drive the productivity of mixed forests of pedunculate oak, beech and red oak [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, **430**: 609 – 617.

- [34] 窦啸文, 汤孟平. 基于引力模型的林木竞争分析[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(10): 2695 – 2704.
DOU Xiaowen, TANG Mengping. Gravitational model-based competitive analysis of forest trees [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(10): 2695 – 2704.
- [35] POMPA-GARCÍA M, VIVAR-VIVAR E D, SIGALA-RODRÍGUEZ J A, *et al.* What are contemporary Mexican conifers telling us? A perspective offered from tree rings linked to climate and the NDVI along a spatial gradient [J/OL]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(18): 4506[2022-09-18]. doi: 10.3390/rs14184506.
- [36] KAHRIMAN A, ŞAHİN A, SÖNMEZ T, *et al.* A novel approach to selecting a competition index: the effect of competition on individual-tree diameter growth of Calabrian pine [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, **48**(10): 1217 – 1226.
- [37] REICH P B, TJOELKER M G, WALTERS M B, *et al.* Close association of RGR, leaf and root morphology, seed mass and shade tolerance in seedlings of nine boreal tree species grown in high and low light [J]. *Functional Ecology*, 1998, **12**(3): 327 – 338.
- [38] BAKER T R, BURSLEM D F R P, SWANIE M D. Associations between tree growth, soil fertility and water availability at local and regional scales in Ghanaian tropical rain forest [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2003, **19**: 109 – 125.
- [39] REICH P B, OLEKSYN J. Climate warming will reduce growth and survival of Scots pine except in the far north [J]. *Ecology Letters*, 2008, **11**: 588 – 597.
- [40] EGHdami H, WERNER W, de MARCO A, *et al.* Influence of ozone and drought on tree growth under field conditions in a 22 year time series [J/OL]. *Forests*, 2022, **13**: 1215[2022-09-18]. doi: 10.3390/f13081215.
- [41] OUYANG Lei, LU Longwei, WANG Chunlin, *et al.* A 14-year experiment emphasizes the important role of heat factors in regulating tree transpiration, growth, and water use efficiency of *Schima superba* in south China [J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2022, **273**: 107902[2022-09-18]. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107902.
- [42] 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 – 80.
LEI Xiangdong, LI Yongci, XIANG Wei. Individual basal area growth model using multi-level linear mixed model with repeated measures [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, **45**(1): 74 – 80.
- [43] POKHAREL B, DECH J P. Mixed-effects basal area increment models for tree species in the boreal forest of Ontario, Canada using an ecological land classification approach to incorporate site effects [J]. *Forestry*, 2012, **85**(2): 255 – 270.
- [44] 龚召松, 曾思齐, 贺东北, 等. 湖南楠木次生林断面积生长模型研究[J]. 林业资源管理, 2020(2): 87 – 93, 140.
GONG Zhaosong, ZENG Siqi, HE Dongbei, *et al.* A study on the basal area growth model of *Phoebe zhennan* secondary forest in Hunan Province [J]. *Forest Resources Management*, 2020(2): 87 – 93, 140.
- [45] 陈哲夫, 肖化顺, 龙时胜. 基于混合效应的湖南马尾松次生林单木生长模型[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, **41**(1): 100 – 108.
CHEN Zhefu, XIAO Huashun, LONG Shisheng. Growth model for individual tree of secondary *Pinus massoniana* forest in Hunan Province based on mixed effect [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2021, **41**(1): 100 – 108.