北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

# 两种竞争指数对杉木生长和生物量评估的影响

马佳欣 孙玉军 朱兆廷

# Effects of two types of competition indices on growth and biomass assessment of *Cunninghamia lanceolata*

Ma Jiaxin, Sun Yujun, Zhu Zhaoting

引用本文:
马佳欣, 孙玉军, 朱兆廷. 两种竞争指数对杉木生长和生物量评估的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):72–82. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230230
Ma Jiaxin, Sun Yujun, Zhu Zhaoting. Effects of two types of competition indices on growth and biomass assessment of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):72–82. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230230

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230230

**您可能感兴趣的其他文章**
**Articles you may be interested in**

杉木人工林灌木层生物量模型构建
Biomass model construction of shrub layer of Chinese fir plantation
北京林业大学学报, 2018, 40(3): 34–41. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170257

黑龙江西部地区人工小黑杨立木可加性生物量模型
Additive system of biomass equations for planted *Populus simonii* × *P. nigra* in western Heilongjiang Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2018, 40(11): 58–68. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180062

甘肃大野口青海云杉距离加权大小比竞争指数研究
Distance–weighted size ratio competition index in the forest of Picea crassifolia in Dayekou, Gansu Province of northwestern China
北京林业大学学报, 2017, 39(2): 40–48. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160210

基于分位数回归法的杉木可变指数削度方程构建
Modeling variable exponential taper function for *Cunninghamia lanceolata* based on quantile regression
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 70–78. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200253

基于随机森林的杉木适生性预测研究
Prediction of adaptability of *Cunninghamia lanceolata* based on random forest
北京林业大学学报, 2017, 39(12): 36–43. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170260

不同龄组长白落叶松种内及种间竞争研究
Intraspecific and interspecific competition of *Larix olgensis* plantations in different age groups
北京林业大学学报, 2018, 40(9): 33–44. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180126

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230230

# 两种竞争指数对杉木生长和生物量评估的影响

马佳欣　孙玉军　朱兆廷
（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开放性实验室，北京 100083）

**摘要:【目的】**通过比较综合竞争指数与 Hegyi 竞争指数，探索林木竞争对杉木生长和生物量的影响，并深入解析综合竞争指数在杉木生物量模型中的作用。**【方法】**以福建省将乐国有林场的杉木人工林为研究对象，基于胸径计算 Hegyi 竞争指数，结合胸径、树高和冠幅构建综合竞争指数；采用相关系数 Kendall's tau 和 Spearman's rho，检验两种竞争指数与杉木生长及生物量的相关性；通过散点图拟合，分析林木竞争对杉木生长因子及生物量的影响；利用三级联合控制方案将胸径、树高和综合竞争指数纳入到杉木相容性生物量模型中，系统研究杉木立木及其各组分的生物量。**【结果】**(1)相关性分析表明，无论是 Hegyi 竞争指数还是综合竞争指数，均与杉木的生长和生物量呈显著负相关(Kendall's tau 和 Spearman's rho，$P < 0.01$)，其中综合竞争指数的两种相关系数绝对值均高于 Hegyi 竞争指数，表明其解释能力更强。(2)散点图拟合结果表明，两种竞争指数与胸径、树高、冠幅及各生物量组分(如树干、树枝、树叶和根系)之间均呈显著的幂函数关系，且随着竞争强度的增加，这些因子呈下降趋势。综合竞争指数在拟合生长因子和生物量方面的表现优于 Hegyi 竞争指数。(3)在构建杉木生物量模型的过程中，引入了综合竞争指数，并采用三级联合控制方案，成功构建了杉木生物量相容性模型。该模型以整株生物量为核心，通过科学的模型构建方法，有效协调了整株生物量与各分项生物量之间，以及不同分项生物量间的相容性问题。**【结论】**林木竞争对杉木生长产生了显著的抑制效应。与 Hegyi 竞争指数相比，综合竞争指数提供了更加全面且精确的林木竞争强度评估。将综合竞争指数纳入杉木生物量模型后，模型的拟合和预测准确度得到提升，表明综合竞争指数不仅在理论上具有重要价值，而且在实际应用中具有较高的适用性。

**关键词：**杉木；Hegyi 竞争指数；综合竞争指数；相容性生物量模型
**中图分类号：**S758.2　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)05−0072−11
**引文格式：**马佳欣，孙玉军，朱兆廷. 两种竞争指数对杉木生长和生物量评估的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：72−82. Ma Jiaxin, Sun Yujun, Zhu Zhaoting. Effects of two types of competition indices on growth and biomass assessment of *Cunninghamia lanceolata*［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 72−82.

## Effects of two types of competition indices on growth and biomass assessment of *Cunninghamia lanceolata*

Ma Jiaxin　Sun Yujun　Zhu Zhaoting
(Key Laboratory of Forest Resources & Environmental
Management, State Forestry & Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** ［**Objective**］This paper aims to explore the effects of tree competition on growth and biomass of *Cunninghamia lanceolata* by comparing comprehensive competition index (CCI) with the Hegyi competition index (HCI), and to further elucidate the role of CCI in biomass model of *Cunninghamia lanceolata*. ［**Method**］(1) This study was conducted in *Cunninghamia lanceolata* plantations of Jiangle State Forest Farm in Fujian Province of eastern China. The HCI was calculated based on DBH, while CCI was constructed by integrating DBH, tree height and crown width. The relationship between two competition

**收稿日期:** 2023−11−16　**修回日期:** 2025−03−29
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31870620)，林业科学技术推广项目([2019]06)。
**第一作者:** 马佳欣。主要研究方向：森林资源监测与模型。Email: 18813007197@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
**责任作者:** 孙玉军，博士，教授。主要研究方向：森林资源监测、林业遥感。Email: sunyj@bjfu.edu.cn　地址：同上。
**本刊网址:** http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

indices and growth as well as biomass of *Cunninghamia lanceolata* were tested using Kendall's tau and Spearman's rho correlation coefficients. The effects of tree competition on growth factors and biomass were analyzed through fitting scatter plots. A compatible biomass model for *Cunninghamia lanceolata* was developed by incorporating DBH, tree height and CCI using a three-level joint control scheme, and a systematic study was conducted on biomass models of *Cunninghamia lanceolata* trees and their individual components. [**Result**] (1) Correlation analysis revealed that both HCI and CCI exhibited significantly negative correlations (Kendall's tau and Spearman's rho) with growth and biomass of *Cunninghamia lanceolata* ($P < 0.01$). Moreover, the absolute values of correlation coefficients for CCI were greater than those for HCI. (2) Scatter plot fitting showed significant power function relationships between two competition indices and DBH, tree height, crown width, and biomass components (bole, branches, leaves and roots) of *Cunninghamia lanceolata*. As competition index increased, the biomass of DBH, tree height, bole, branches, leaves, and roots all decreased. Notably, CCI outperformed HCI in fitting growth factors and biomass of *Cunninghamia lanceolata* with higher coefficients of determination. (3) In the process of developing biomass model for *Cunninghamia lanceolata*, CCI was introduced and a three-level joint control scheme was applied. A compatible biomass model was successfully constructed. This model, centered on the whole-tree biomass, effectively coordinated compatibility between whole-tree biomass and its individual components, as well as among different components. [**Conclusion**] Tree competition significantly inhibits the growth of *Cunninghamia lanceolata*. Compared with HCI, CCI provides a more comprehensive and accurate assessment of tree competition intensity. Incorporating CCI into biomass model of *Cunninghamia lanceolata* enhances the model's fitting and prediction accuracy. This indicates that CCI not only has theoretical value but also demonstrates its applicability in practical use.

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata*; Hegyi competition index; comprehensive competition index; compatibility biomass model

林木个体间为争夺生存必需的资源如光、水和养分而产生的抑制作用被称为林木竞争，这对其生长速率、生物量配置、存活概率和群落构成产生重大影响[1]。为了更好地理解竞争机制对林木的影响和量化竞争关系，学者们提出了“竞争指数”的概念[2]。竞争指数是一个用于描述林木间竞争强度的指标模型。它不仅反映了单一树木对资源的需求量，还考虑了其在实际生长环境中对资源的占有量。简而言之，这一指数试图捕捉树木生长与其周围环境资源之间的动态关系。

根据 Burkhart 等[2]的分类，竞争指数可分为与距离无关和与距离有关的竞争指数两大类。前者（如 Basal Area Limited 指数和 Bella 指数）通过林分断面积或树冠特征评估竞争强度，适用于树种单一、分布均匀的林分；后者（如 Hegyi 指数及其改进模型）则基于对象木与竞争木的胸径及空间距离量化竞争效应，适用性较广，尤其在混交林等异质性环境中更具优势[3]。胸径、树高和冠幅是表征与林木竞争的关键参数[4]。然而，尽管已有大量关于单一因子的竞争指数研究[5]，但针对这 3 个因子与林木间距离的综合竞争指数的研究仍然较少。

杉木（*Cunninghamia lanceolata*）作为林业中重要的优质树种，在木材生产和防护林建设中占据重要地位。由于其生长速度快且木质优良，杉木在多个领域得到了广泛应用[6]。然而，杉木林的生产力和生态服务功能受到多种因素的影响，其中林木竞争是不可忽视的重要因素。本研究以杉木为研究对象，旨在构建一个综合竞争指数模型，通过整合林木胸径、树高、冠幅等关键指标，以全面评估林木竞争关系，并将传统 Hegyi 竞争指数与新构建的综合竞争指数进行对比分析。在此基础上，进一步建立杉木立木相容性生物量模型。该模型为杉木人工林的生物量估算提供可靠依据，也为森林经营、保护策略制定以及抚育间伐等管理措施的实施提供参考。

## 1　研究区概况与研究方法

### 1.1　研究区概况

福建省将乐县国有林场（117°05′ ~ 117°40′E，26°26′ ~ 27°04′N），海拔在 400 ~ 800 m 之间。该地区属于中亚热带季风气候，受季风影响，降水量较为丰富。统计数据显示，年平均降水量为 2 700 mm[7]。年平均气温 18 ~ 20 ℃，7 月为年度最热月份，而 1 月为最冷月份。历史记录显示，平均最高气温和最低气温分别为 41.7℃ 和−6.9℃。由于气候条件适

宜，该地区的植物种类相当丰富，湿润性的常绿针叶林在此地生长良好。马尾松（*Pinus massoniana*）、杉木和毛竹（*Phyllostachys heterocycla*）是该地区的主要树种，分布广泛[8]。

### 1.2 数据收集

本研究选取杉木人工林作为研究对象。根据林龄（7～38 年），将其划分为 5 个龄组：幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林。在所有龄组中，共设立了 7 块 20 m × 30 m 的标准地，标准地基本情况见表 1。在每块标准地内，挑选了 3～4 棵具有代表性的标准木作为研究对象，总共选取了 26 棵标准木。这些标准木根据 2 cm 的径阶宽度进行分组，每个径阶中均匀分布了 2～3 棵树，以确保研究结果的广泛适用性和准确性。

为了测量林木各部分的鲜质量，采用“分层切割法”对树干、树枝和树叶进行实测。此外，使用“混合取样法”对各杉木器官样本进行取样。对于根系的采样，采用了“分层挖掘法”，并按不同深度（0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 和 60～80 cm）进行挖掘和称质量。之后，所有采集的样品均被带回实验室进行处理。样品在 105℃ 的烘箱中烘干至恒质量，测定干物质质量。通过累加各部分的干物质质量，计算得到整株对象木的生物量，对象木统计信息见表 2。

### 1.3 数据分析

本研究的数据分析基于 Python 3.7 进行。为探讨 Hegyi 竞争指数和综合竞争指数与杉木生长及生物量的关联性，采用相关系数 Kendall’s tau 和 Spearman’s rho 进行相关性分析。然后通过散点图拟合，深入分析了林木竞争对杉木生长因子及生物量的影响。最后，利用三级联合控制方案，将胸径、树高和综合竞争指数纳入杉木相容性生物量模型，系统研究了杉木立木及其各分项的生物量模型。通过留一法交叉验证对模型进行评估，以确定其在实际应用中的可靠性和准确性。

### 1.4 林木竞争指数的计算

首先采用了 Hegyi 竞争指数来评估每个杉木个体的林木竞争强度。该竞争指数[9]的计算公式为

$$I_{Ci} = \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{D_j}{D_i}\right)\left(\frac{1}{L_{ij}}\right) \tag{1}$$

式中：$I_{Ci}$ 是林分中标准木 $i$ 的简单竞争指数；$D_i$ 是林分中标准木 $i$ 的胸径；$D_j$ 是标准木周围第 $j$ 棵竞争木的胸径（$j$=1，2，3，…，$n$）；$L_{ij}$ 是林分中标准木 $i$ 与其对应的竞争树木 $j$ 之间的距离[9]。

之后，基于 Hegyi 竞争指数模型，引用了一个综合竞争指数模型（comprehensive competition index，$I_{CC}$）。在这个模型中，竞争木的胸径、树高、冠幅的乘积与对象木的胸径、树高、冠幅乘积的比值再乘以

**表 1 标准地基本情况**

Tab. 1 Basic situation of sample plots

| 龄组 | 年龄/a | 海拔/m | 坡向 | 坡度/(°) | 坡位 | 平均胸径/cm | 平均树高/m | 郁闭度 | 林分密度/(株·hm$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 幼龄林 | 7 | 219 | 北偏东71° | 31 | 中上 | 4.8 | 4.2 | 0.28 | 2 575 |
| | 10 | 192 | 西偏北8° | 15 | 中 | 12.4 | 12.9 | 0.35 | 2 400 |
| 中龄林 | 15 | 240 | 东偏南19° | 29 | 中 | 14.3 | 14.3 | 0.67 | 1 933 |
| 近熟林 | 24 | 242 | 北偏东45° | 45 | 上 | 15.2 | 15.2 | 0.74 | 1 767 |
| | 28 | 215 | 北偏东23° | 22 | 全 | 20.6 | 20.6 | 0.86 | 1 475 |
| 成熟林 | 31 | 286 | 南偏东18° | 22 | 下 | 22.6 | 22.6 | 0.76 | 850 |
| 过熟林 | 38 | 214 | 南偏东18° | 43 | 中 | 26.9 | 26.9 | 0.72 | 467 |

**表 2 标准木统计信息**

Tab. 2 Statistical information of standard trees

| 变量 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
|---|---|---|---|---|
| 胸径（$D$）/cm | 5.90 | 27.70 | 17.06 | 6.38 |
| 树高（$H$）/m | 4.60 | 25.00 | 16.06 | 5.72 |
| 冠幅（$C_W$）/m | 1.20 | 5.55 | 3.09 | 0.97 |
| Hegyi 竞争指数（$I_C$） | 0.64 | 4.10 | 1.85 | 0.90 |
| Comprehensive竞争指数（$I_{CC}$） | 0.26 | 5.33 | 1.18 | 1.06 |
| 总生物量/kg | 8.16 | 462.62 | 182.16 | 148.52 |

它们之间的距离的倒数[10]。综合竞争指数可以同时考虑多个因素，以更准确地衡量树木间的竞争程度。

该竞争指数的计算公式为

$$I_{CCi}=\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{D_jH_jC_{Wj}}{D_iH_iC_{Wi}}\right)\left(\frac{1}{L_{ij}}\right) \tag{2}$$

式中：$I_{CCi}$ 表示标准木 $i$ 的综合竞争指数，$D_i$、$H_i$、$C_{Wi}$ 分别表示标准木 $i$ 的胸径、树高和冠幅直径，而 $D_j$、$H_j$、$C_{Wj}$ 则分别代表竞争木 $j$ 的胸径、树高和冠幅直径，$L_{ij}$ 表示对象木 $i$ 与其对应竞争木 $j$ 之间的距离。该模型的第一部分是使用对象木与竞争木的胸径、树高、冠幅 3 个因子乘积的比值来表示，这样既考虑了树木在水平方向上的影响因子，也考虑了在垂直方向上的影响因子。第二部分是使用标准木与竞争木之间距离的倒数来表示，这样是考虑了树木间距离的影响。将这两部分相结合，得到综合竞争指数模型，这个模型预期能够全面地评估林木之间的竞争强度[10]。根据惠刚盈等[11]的研究，最佳的竞争空间结构单元是邻近的 4 棵树，这种空间结构单元被认为是最优的。因此，选择距离对象木最近的 4 棵树作为竞争木。

### 1.5　构建相容性生物量模型

尽管本研究样本量有限，但同时结合了分层抽样和系统抽样的采样策略和统计分析方法确保了数据的外推价值。运用非线性方程进行生物量独立模型的拟合，充分考虑了杉木生物量的非线性特征。通过引入综合竞争指数，模型不仅能表征生物量与树木特征之间的关系，还能揭示森林内部竞争对生物量分布的影响。此外，为确保模型各组分生物量方程的相容性，采用三级联合控制方案，成功地建立了基于总生物量的相容性生物量模型。该方法已被前人研究验证有效[12]。

生物量独立模型

$$W=aX_1^bX_2^cX_3^d \tag{3}$$

式中：$W$ 表示树木的总生物量或各个分项的生物量。$X_1$、$X_2$、$X_3$ 分别为自变量的胸径($D$)、树高($H$)和综合竞争指数($I_{CC}$)。$a$、$b$、$c$、$d$ 为模型的参数。

之后本研究基于总生物量构建了一个三级控制法的相容性生物量模型。首先，一级控制聚焦于整株总生物量，通过对总生物量的独立模型进行回归估计，并按比例将估计的总生物量分配给地上部分和根部，确保这两部分的生物量之和等同于整株的总生物量。随后，二级控制针对地上部分的生物量，按比例分配以使地上部分生物量等于树干和树冠生物量的总和。最后，三级控制定向于树冠生物量，将其分配为树枝和树叶生物量的总和。通过这种分级控制方法，确保了生物量分配的相容性，从而在各个层次上均能准确反映生物量的分布。

一级控制方程

$$\widetilde{w_2}=\frac{f_2(x)}{f_2(x)+f_3(x)}\widehat{w_1} \tag{4}$$

$$\widetilde{w_3}=\frac{f_3(x)}{f_2(x)+f_3(x)}\widehat{w_1} \tag{5}$$

二级控制方程

$$\widetilde{w_4}=\frac{f_4(x)}{f_4(x)+f_7(x)}\widetilde{w_2} \tag{6}$$

$$\widetilde{w_7}=\frac{f_7(x)}{f_4(x)+f_7(x)}\widetilde{w_2} \tag{7}$$

三级控制方程

$$\widetilde{w_5}=\frac{f_5(x)}{f_5(x)+f_6(x)}\widetilde{w_7} \tag{8}$$

$$\widetilde{w_6}=\frac{f_6(x)}{f_5(x)+f_6(x)}\widetilde{w_7} \tag{9}$$

式中：$f_2(x)$、$f_3(x)$、$f_4(x)$、$f_5(x)$、$f_6(x)$和$f_7(x)$ 分别为各树种地上部分、地下部分(树根)、树干、树枝、树叶、树冠的生物量模型；$\widehat{w_1}$为总生物量的估计值；$\widetilde{w_i}$为联合估计后的估计值，$i$ 为 2 ~ 7，分别代表地上部分、根、树干、树枝、树叶和树冠生物量。

### 1.6　对相容性模型进行化简并估计参数

对总生物量进行独立模型回归，得到总生物量的模型参数和估计值$\widehat{w_1}$，并将$\widehat{w_1}$代入一级控制方程，把地上部分和地下部分(树根)的原方程形式代入一级控制方程，化简后得到

$$\widetilde{w_2}=\frac{1}{1+a_1D^{b_1}H^{c_1}I_{CC}^{d_1}}\widehat{w_1} \tag{10}$$

$$\widetilde{w_3}=\frac{1}{1+\frac{1}{a_1}D^{-b_1}H^{-c_1}I_{CC}^{-d_1}}\widehat{w_1} \tag{11}$$

同样，以一级控制的地上估计量$\widetilde{w_2}$为基础，代入二级控制方程，把树干和树冠的原方程形式代入二级控制方程，化简后得到

$$\widetilde{w_4}=\frac{1}{1+a_2D^{b_2}H^{c_2}I_{CC}^{d_2}}\widetilde{w_2} \tag{12}$$

$$\widetilde{w_7}=\frac{1}{1+\frac{1}{a_2}D^{-b_2}H^{-c_2}I_{CC}^{-d_2}}\widetilde{w_2} \tag{13}$$

以二级控制的树冠估计量$\widetilde{w_7}$为基础，代入三级控制方程，把树枝和树叶的原方程形式代入三级控制方程，化简后得到

$$\widetilde{w_5}=\frac{1}{1+a_3D^{b_3}H^{c_3}I_{CC}^{d_3}}\widetilde{w_7} \tag{14}$$

$$\widetilde{w_6} = \frac{1}{1+\frac{1}{a_3}D^{-b_3}H^{-c_3}I_{CC}^{-d_3}}\widetilde{w_7} \quad (15)$$

式中：$a_1$、$b_1$、$c_1$ 为一级控制方程待模拟的参数，$a_2$、$b_2$、$c_2$ 为二级控制方程待模拟的参数，$a_3$、$b_3$、$c_3$ 为三级控制方程待模拟的参数。

### 1.7 模型的检验和评价

为了评估构建的模型在拟合度和预测能力方面的表现，用均方根误差（root mean square error，RMSE）、平均绝对误差（mean absolute error，MAE）和平均误差（mean error，ME）检验指标。通过留一法交叉验证进行模型评估，以确定其在实际应用中的可靠性和准确性[13−16]。

## 2 结果与分析

### 2.1 两种竞争指数与林木因子及生物量相关分析

由表 3 可见，所有测定指标（胸径、树高、冠幅以及树枝、叶、树干和根系的生物量）与 Hegyi 竞争指数（$I_C$）和 综合竞争指数（$I_{CC}$）均呈显著负相关（$P < 0.05$）。这一结果表明，随着竞争指数的增加，树木的生长指标呈现下降趋势。值得注意的是，基于 Kendall's tau 和 Spearman's rho 相关系数的比较分析显示，$I_{CC}$ 与这些变量的相关性均显著高于 $I_C$。

### 2.2 不同竞争指数与林木因子的拟合

杉木的林木参数（胸径 $D$、树高 $H$ 和冠幅 $C_W$）与两种竞争指数（$I_C$ 和 $I_{CC}$）之间均存在显著的幂函数关系（$P < 0.01$）（图 1）。具体而言，胸径与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 均呈极显著负相关（$P < 0.01$），表明随着竞争强度的增加，杉木的径向生长受到显著限制。树高与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 的散点图也展现出负相关性，说明竞争强度的增加同样对其生长产生了一定的抑制作用。

从关联程度来看，胸径和冠幅与竞争指数的关系更为紧密。具体而言，胸径与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 的决定系数分别为 0.648 0 和 0.659 1，冠幅与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 的决定系数分别为 0.621 4 和 0.756 3，而树高与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 的决定系数分别为 0.417 5 和 0.436 7。这表明胸径和冠幅受竞争强度的影响更为显著，而树高虽然也与竞争强度存在明显关联，但关联程度相对较弱。

更为重要的是，$I_{CC}$ 与林木参数的关联程度均超过了 $I_C$，即 $R^2_{CCI}$ 值均大于 $R^2_{CI}$ 值。这说明 $I_{CC}$ 在反映林木生长与竞争关系方面可能更具优势。

### 2.3 林木竞争对杉木生物量分配的影响

树干、树枝、树叶和根系生物量与林木的竞争强度均存在显著的幂函数关系（$P < 0.01$）（图 2）。从两个竞争指数（$I_C$ 和 $I_{CC}$）与杉木各部位生物量的拟合情况综合来看，树枝生物量与林木竞争强度的关系更为紧密，其与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 的决定系数分别为 0.622 9 和 0.684 2。相比之下，其他部位生物量与竞争强度的关系较弱，树叶、树干和根系生物量与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 的决定系数分别为 0.519 9 和 0.690 4、0.543 5 和 0.558 2、0.560 8 和 0.599 9。

总体来看，不论是 $I_C$ 还是 $I_{CC}$，它们与杉木的各生物量参数均呈现出负相关性。值得注意的是，$I_{CC}$ 与杉木各组分生物量的拟合度均超越了 $I_C$。未来的研究或将进一步探索林木各组成部分对竞争的响应差异，以及如何在实际的森林经营管理中有效减轻这种竞争压力。

### 2.4 杉木人工林生物量模型建立

为更精确地揭示杉木人工林的生物量与其相关影响因子间的关联，将综合竞争指数整合到生物量模型中。采用多变量（包括胸径 $D$、树高 $H$、冠幅 $C_W$ 以及综合竞争指数 $I_{CC}$）来构建生物量模型。

在构建生物量模型前，进行多变量之间的自相关分析，以评估变量间的线性关联性。考虑到模型的变量包括胸径（$D$），树高（$H$），冠幅（$C_W$）以及综合竞争指数（$I_{CC}$），图 3 中的 Pearson 相关系数结果表明，胸径与树高（0.73）、胸径与冠幅（0.79）均呈现出较强的正相关关系，而胸径与综合竞争指数（−0.68）则呈现出较强的负相关关系。此外，树高与冠幅（0.58）以及树高与综合竞争指数（−0.52）也显示出一定的相关性，而冠幅与综合竞争指数之间的相关性（−0.71）则相对稍强。上述相关性分析反映了林木生物量的各影响因子之间存在一定的关联，这对于进一步构建生物量模型是有指导意义的。

**表 3 两种竞争指数与林木因子及生物量相关性**

Tab. 3 Correlations between two competition indices and forest factors as well as biomass

| 竞争指数 | 相关系数 | $D$ | $H$ | $C_W$ | 树枝生物量 | 叶生物量 | 树干生物量 | 根系生物量 | 总生物量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_C$ | Kendall's tau | −0.625* | −0.493* | −0.554* | −0.606* | −0.520* | −0.575* | −0.618* | −0.588* |
| | Spearman's rho | −0.815* | −0.695* | −0.743* | −0.799* | −0.703* | −0.770* | −0.788* | −0.787* |
| $I_{CC}$ | Kendall's tau | −0.643* | −0.512* | −0.641* | −0.600* | −0.538* | −0.569* | −0.625* | −0.618* |
| | Spearman's rho | −0.819* | −0.696* | −0.808* | −0.788* | −0.746* | −0.776* | −0.816* | −0.800* |

注：*表示相关性显著（$P < 0.05$）。

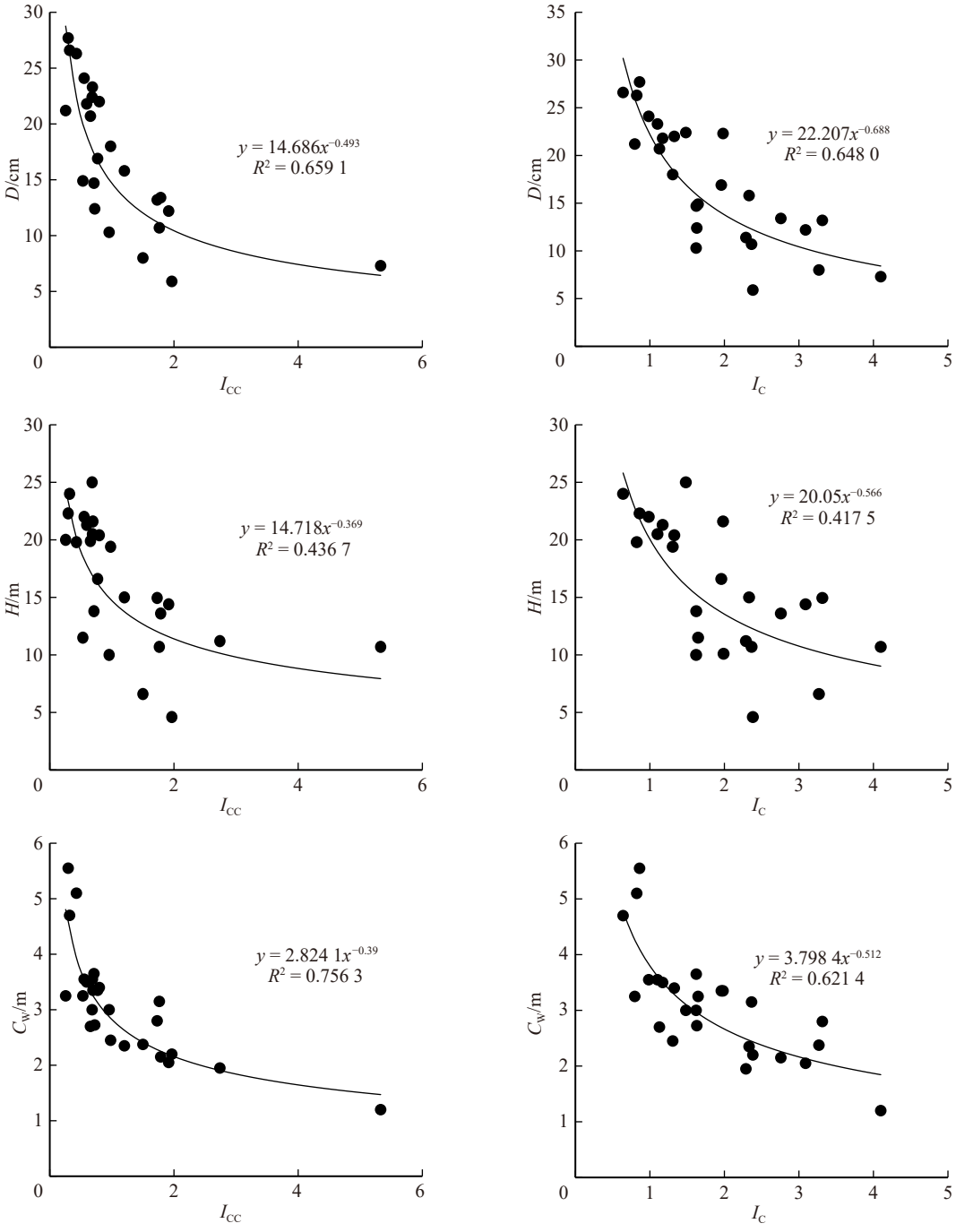



图 1　不同竞争指数与林木因子的拟合

Fig. 1　Fitting of different competition indices with forest factors

虽然各变量间存在不同程度的相关性，但这些变量均可以作为预测因子纳入模型中。后续研究的模型构建将采用包括变量转换和选择合适的非线性函数形式等方法来处理变量间的相关性，确保模型的准确性和解释力。

引入综合竞争指数构建杉木生物量相容性模型，目的是预测整株立木及其不同组分的生物量。从表 4 中模型参数的拟合结果和表 5 的模型检验指标来看，生物量相容性模型在预测树木及其不同组分生物量方面有优良的预测能力。特别是模型在整株和树干生物量预测上表现尤为出色，$R^2$ 值分别高达 0.979 和 0.974，凸显了模型在解释这两个组分生物量上的有效性。尽管树根、树枝和树叶组分的 $R^2$ 值相对较低，分别为 0.799、0.738 和 0.653，这些结果依然证明了模型在这些组分上具有不错的表现。其中树叶组分 $R^2$ 值为最低，这可能与树冠的形态、体积及密度以及树木的整体生长状态有关，这些因素会随着气候和环境的变化而变动。此外，在野外调查及样本采集阶段的潜在生物量损失也可能对模型准确性造成影响。因此，未来研究需要深入探究树叶生物量预测的改进方法，包括探索更合理的模型结构和更有效的预测变量，以提高模型在预测

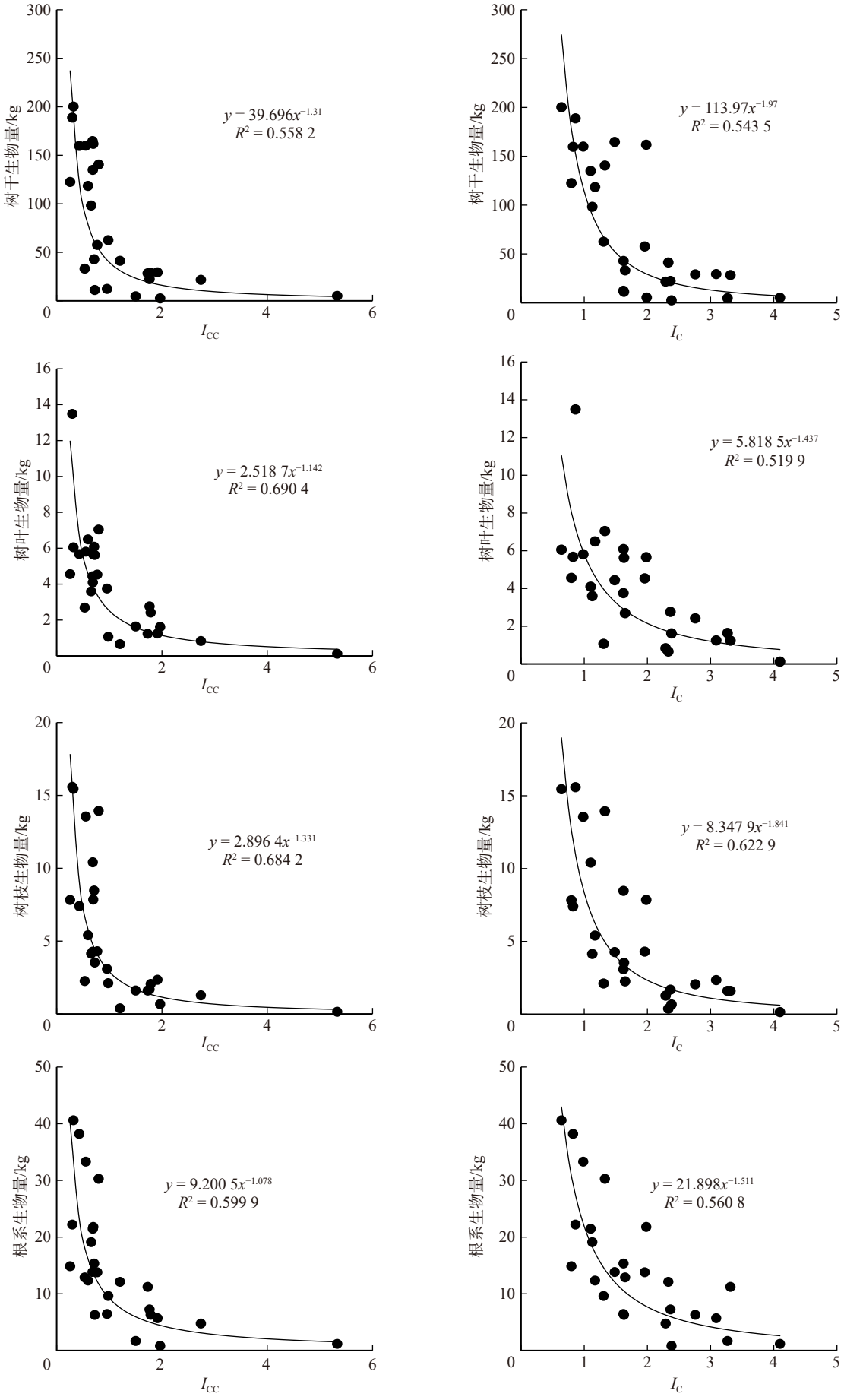



图 2 不同竞争指数与杉木各组分生物量的关系

Fig. 2 Relationship between different competition indices and component biomass of *Cunninghamia lanceolata*

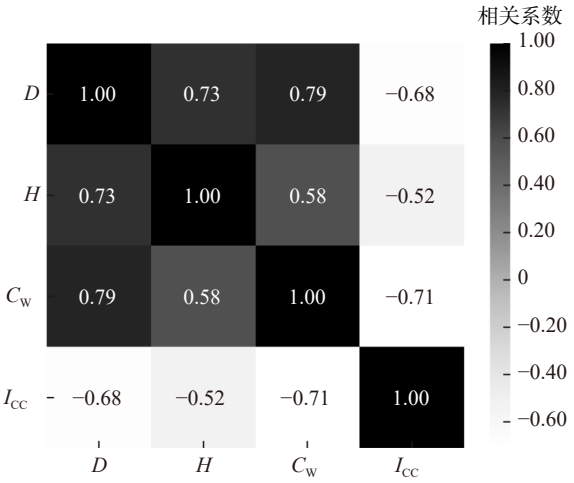



图 3　多变量之间的自相关分析

Fig. 3　Autocorrelation analysis between multiple variables

树叶生物量方面的准确性和适用性。

在模型精度方面，各组分的 RMSE 值在不同生物量组分中表现出一定的变化。整株生物量预测的 RMSE 值为 12.457，表明尽管模型具有较高预测准确性，但仍存在一定程度上与实际值之间的偏差。树干生物量预测的 RMSE 值进一步降低到 9.059，显示了模型在这一组分的高度准确性。树根、树枝和树叶组分的 RMSE 值分别为 5.438、4.036 和 3.751，进一步证明了模型在这些组分的预测上同样展现出较高的精度。所有组分的 ME 值接近零，表明模型没有显著的系统偏差，而 MAE 值的变化反映了模型在各组分生物量预测上的稳定性和可靠性。综上所述，该生物量相容性模型为未来树木生物量预测提供了一种有效的工具，尤其是在考虑到林木竞争因素的情况下。

## 3　讨　　论

林木竞争是影响树木生长、生存和繁殖的关键生态过程[17]。传统的研究方法通常使用基于胸径的简单竞争指数来评估树木之间的竞争关系。然而，这种方法可能忽略了其他重要的生长变量，如树高和冠幅。为了更全面地评估林木之间的竞争关系，本文在简单竞争指数的基础上，提出了一个包含多变量（胸径、树高、冠幅）的综合竞争指数。

简单竞争指数基于树木的胸径和距离来计算，而综合竞争指数则考虑了更多的生长变量。与董利虎等[18]使用的单一变量竞争指数相比，我们的发现和哈雪梅等[19]的观点相同，他们认为包含多个生长参数的综合竞争指数能更准确地反映林木之间的真实竞争关系。结果显示，无论是简单竞争指数还是综合竞争指数，它们都与杉木的生长和生物量有着紧密的联系。进一步分析 Kendall's tau 和 Spearman's rho 相关系数表明，竞争指数与杉木的林木因子及生物量均呈负相关，这与褚欣[10]对闽楠（*Phoebe bournei*）天然次生林的研究结论一致，他们也阐明了竞争强度与树木生长之间的负相关性。

之后本研究通过对散点图的拟合分析发现，竞争指数与杉木的生长和生物量都呈负相关。这一发现与汪金松等[20]研究者的结论一致，他们在研究臭冷杉种群时也观察到了相似的负相关性，进一步证实了竞争对林木生长的显著抑制作用。散点图的结果显示了较高竞争指数与较短的树高之间的联系。

**表 4　相容性联立模型参数估计值**

Tab. 4　Parameter estimates of compatible simultaneous models

| 控制方程分级 | 分量 | 参数估计值 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *a* | *b* | *c* | *d* |
| 总量 | 总生物量 | 0.046 7 | 1.859 2 | 0.778 6 | −0.033 2 |
| 一级 | 地上生物量，树根生物量 | 0.033 1 | 1.758 9 | 0.993 3 | −0.033 5 |
| 二级 | 树干生物量，树冠生物量 | 0.865 2 | 0.996 5 | 0.980 2 | 0.999 5 |
| 三级 | 树枝生物量，树叶生物量 | 0.917 4 | 1.013 5 | 1.000 4 | 1.008 8 |

**表 5　相容性联立模型评价指标**

Tab. 5　Evaluating criteria for compatible simultaneous models

| 组分 | $R^2$ | RMSE | ME | MAE |
|---|---|---|---|---|
| 整株 | 0.979 | 12.457 | −0.159 | 12.959 |
| 树干 | 0.974 | 9.059 | 0.211 | 6.744 |
| 树根 | 0.799 | 5.438 | 0.019 | 3.377 |
| 树枝 | 0.738 | 4.036 | −0.048 | 1.532 |
| 树叶 | 0.653 | 3.751 | −0.001 | 1.149 |

在树木较为密集的环境中，为了获得更多的阳光，树木可能会优先向上生长，从而使得资源分配更均匀，进而影响其生长速度。与胸径和树高的趋势相似，冠幅与 $I_C$ 和 $I_{CC}$ 也呈现出负相关。这意味着在竞争更为激烈的环境中，树木可能更倾向于向上生长以获取阳光，而不是在横向上拓展其冠幅。与此同时，杉木人工林的综合竞争指数与林木胸径、树高及冠幅的关联程度均高于简单竞争指数。这种差异可能是由于简单竞争指数主要基于胸径和距离来计算，而综合竞争指数则考虑了更多的生长变量，如树高和冠幅。这意味着，当使用综合竞争指数时，可以得到一个更为全面的林木竞争评估，这与关于其他综合竞争指数的研究结果类似[21−24]。

此外，与生物量的拟合结果表明随着竞争强度的增长，杉木的树干生物量明显下降。这种趋势在两种竞争指数中都得到了体现，进一步证实了竞争对杉木主要结构部分的生长产生了明显的制约。这可能是因为在竞争激烈的环境中，杉木在争夺光照、水分和养分等关键资源时面临了更大的挑战。同时，树枝、树叶和根系的生物量与两种竞争指数之间也呈现出了负相关性，说明除了树干，竞争同样影响了杉木的其他组成部分。特别是在树枝和树叶的生物量中，与竞争的负相关性更为显著，这可能是因为树冠对林木竞争更为敏感。

综合竞争指数的预测能力超过了简单竞争指数，这种差异可能是由于综合竞争指数能更好地反映林木之间的真实竞争关系[25]。例如，两棵胸径相近但树高差异较大的树木之间的竞争关系可能与两棵胸径和树高都相近的树木之间的竞争关系不同。综合竞争指数可以更好地捕捉这种差异，从而提供更为准确的竞争评估[26]。这一发现为未来的研究提供了新的视角，强调了在评估竞争关系时选择合适的竞争指数的重要性。不同的竞争指数可能会导致不同的研究结果，因此选择一个合适的竞争指数对于得到准确的研究结果至关重要[27]。

生物量模型在森林生态学和森林经营管理中起到了至关重要的作用，这些模型提供了预测树木生物量的有效工具，从而可以更好地理解森林的碳储存和生产力[28−29]。然而，为了构建这些模型，考虑到竞争的影响是非常关键的。传统的生物量模型研究往往只考虑了树木的基本生长参数，而忽略了树木之间的竞争关系。综合竞争指数的引入为这一问题提供了解决方案。通过纳入综合竞争指数，模型的预测性能得到了完善，使得其能够更准确地预测树木的生物量。

在林木生物量的研究领域，传统做法往往是对树木的各个部分（例如，干、枝、叶和根）分别选用模型并单独对参数进行拟合，这可能会造成模型之间的不兼容。为了克服这个问题，骆期邦等[30]提出了采用线性联立模型和非线性联合估计模型以确保总量与各分量之间的一致性；唐守正等[31]则通过非线性联合估计方法进行模型拟合，并与比例调整法进行了对比，认定二级代数和配比拟合方案为最优选择；董利虎等[32]研究者利用分级比值函数联合控制方程组，构建了基于总生物量的一致性模型，以适用于黑龙江 15 个主要树种的生物量估算，该模型展现了较高的精确度。本文通过在各个器官的生物量模型基础上引入综合竞争指数和实施三级联合控制方案，成功地建立了杉木生物量相容性模型。该模型不仅完善了生物量预测的精度，还确保了预测结果中各个分量生物量的一致性和相互依赖性，为准确分析杉木生物量分配提供了参考依据。总之，生物量模型与综合竞争指数之间的关系是复杂而深入的，通过对这一关系的深入研究，我们可以更好地理解林木竞争的机制，从而为森林经营管理和生态学研究提供有力的支持。

通过对综合竞争指数的分析，森林经营者可以明确哪些树木之间的竞争关系较为激烈，这为制定合理的经营策略，如抚育间伐和更新，提供了关键信息[33]。例如，如果某一区域的综合竞争指数特别高，这可能意味着该区域的树木之间的竞争关系特别激烈，因此可能需要进行抚育间伐以减少竞争。此外，综合竞争指数还可以帮助经营者预测树木的生长和生物量，这对于资源的合理利用和保护具有重要意义。总的来说，研究综合竞争对杉木生长及生物量模型的影响为森林经营管理和森林资源的可持续利用提供了有力的支持。

## 4 结　　论

在对杉木生长及生物量模型的深入研究中，综合竞争指数起到了至关重要的作用。综合竞争指数在综合了多个生长变量如胸径、树高和冠幅的基础上，深入地反映了树木间的竞争关系。与此前主要基于胸径的简单竞争指数相比，综合竞争指数为模型预测提供了更为丰富和准确的信息。初步的数据分析揭示了：无论是简单竞争指数还是综合竞争指数，它们都与杉木的生长和生物量呈现负相关性。这意味着，竞争强度越大，杉木的生长越可能受到抑制。进一步散点图的拟合也进一步证实了这一点，显示综合竞争指数与杉木的生长和生物量都呈现负相关性。更为关键的是，综合竞争指数与杉木的林木因子及各组分的生物量关联性明显强于简单竞争

指数。此外，当综合竞争指数被纳入杉木生物量相容性模型中，采用分级联合控制方法进行拟合，模型的拟合效果表现良好。这意味着，综合竞争指数不仅在理论上有一定价值，而且在实际应用中也显示出了其适用性。总的来说，综合竞争指数的引入不仅丰富了研究竞争对林木生长及生物量模型的理论体系，还为实际的森林经营和管理提供了有力的工具和方法。

## 参 考 文 献


[1] 刘方炎, 李昆, 廖声熙, 等. 濒危植物翠柏的个体生长动态及种群结构与种内竞争 [J]. 林业科学, 2010, 46(10): 23−26.
Liu F Y, Li K, Liao S X, et al. Interspecific competition, population structure and growth dynamics of endangered *Calocedrus macrolepis*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(10): 23−26.

[2] Burkhart H E, Tomé M. Modeling forest trees and stands[M]. Dordrecht: Springer, 2012: 352−418.

[3] Hegyi F. A model for stand growth prediction[J]. Forest Science, 1974, 20(3): 341−348.

[4] 张晔珵, 张怀清, 陈永富, 等. 基于树冠因子的林木竞争指数研究 [J]. 林业科学研究, 2016, 29(1): 80−84.
Zhang Y C, Zhang H Q, Chen Y F, et al. Study of tree competition index based on crown feature[J]. Forest Research, 2016, 29(1): 80−84.

[5] 褚欣, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 闽楠天然次生林林木综合竞争指数研究 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(4): 199−205.
Chu X, Pan P, Ouyang X Z, et al. Comprehensive competition index of natural secondary *Phoebe bournei* forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 199−205.

[6] 康冰, 刘世荣, 张广军, 等. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征 [J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1320−1329.
Kang B, Liu S R, Zhang G J, et al. Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest ecosystem in Daqingshan, Guangxi of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1320−1329.

[7] 梁瑞婷, 孙玉军, 周来. 基于分位数回归法的杉木可变指数削度方程构建 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(7): 70−78.
Liang R T, Sun Y J, Zhou L. Modeling variable exponential taper function for *Cunninghamia lanceolata* based on quantile regression[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(7): 70−78.

[8] 王童, 孙玉军, 乔晶晶. 将乐林场马尾松树轮宽度对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 30−39.
Wang T, Sun Y J, Qiao J J. Response of *Pinus massoniana* tree-ring width in the Jiangle area of Fujian Province to climate change[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(9): 30−39.

[9] Sun Z, Wang Y F, Pan L, et al. Hegyi competition index decomposition to improve estimation accuracy of *Larix olgensis* crown radius[J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109322.

[10] 褚欣. 闽楠天然次生林非空间结构特征及其综合竞争指数研究 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
Chu X. Study on the non-spatial structural characteristics and comprehensive competition index of natural secondary forests of *Phoebe bournei*[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.

[11] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 等. 基于交角的林木竞争指数 [J]. 林业科学, 2013, 49(6): 68−73.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H, et al. A forest competition index based on intersection angle[J]. Scinetia Silvae Sinicae, 2013, 49(6): 68−73.

[12] 吴明晶. 福建将乐杉木生物量相容性模型分析 [J]. 福建林业科技, 2020, 47(4): 67−71.
Wu M J. Analysis of biomass of Chinese fir in Jiangle State-Owned Forestry Farm[J]. Fujian Forestry Science and Technology, 2020, 47(4): 67−71.

[13] 李凤日. 长白落叶松人工林树冠形状的模拟 [J]. 林业科学, 2004, 40(5): 16−24.
Li F R. Modeling crown profile of *Larix olgensis* trees[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(5): 16−24.

[14] Wang W W, Ge F X, Hou Z Y, et al. Predicting crown width and length using nonlinear mixed-effects models: a test of competition measures using Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)[J]. Annals of Forest Science, 2021, 29(1): 80−84.

[15] 董利虎. 东北林区主要树种及林分类型生物量模型研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
Dong L H. Developing individual and stand-level biomass equations in Northeast China forest area [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.

[16] 王佳慧, 李凤日, 董利虎. 基于不同预测变量的天然椴树可加性地上生物量模型构建 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3685−3695.
Wang J H, Li F R, Dong L H. Additive aboveground biomass equations based on different predictors for natural *Tilia* Linn.[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3685−3695.

[17] Balandier P, Collet C, Miller J H, et al. Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighbouring vegetation[J]. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2006, 79(1): 3−27.

[18] 董利虎, 李凤日, 贾炜玮. 林木竞争对红松人工林立木生物量影响及模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 15−22.
Dong L H, Li F R, Jia W W. Effects of tree competition on biomass and biomass models of *Pinus koraiensis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(6): 15−22.

[19] 哈雪梅. 基于综合竞争指数和数量化理论模型的红松人工林立地质量评价 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Ha X M. Site quality evaluation of *Pinus koraiensis* plantations based on comprehensive competition index and quantitative theoretical model[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[20] 汪金松, 范秀华, 范娟, 等. 林木竞争对臭冷杉生物量分配的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(4): 14−20.
Wang J S, Fan X H, Fan J, et al. Effects of tree competition on the biomass partitioning of *Abies nephrolepis*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(4): 14−20.

[21] Yin D S. Competition relationship of populations of natural secondary *Acer mono* forest[J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(1): 105−109.

[22] Eben V, Bosela M, Konopka B, et al. Indices of tree competition in dense spruce stands originated from natural regeneration[J]. Forestry Journal, 2013, 59(3): 172−179.

[23] 曾思齐, 龙时胜, 肖化顺, 等. 南方地区青冈栎次生林种内与种间竞争研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10): 1−5.
Zeng S Q, Long S S, Xiao H S, et al. Intraspecific and interspecific competition of *Cyclobalanopsis glauca* secondary forests in south China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(10): 1−5.

[24] 吕勇, 钱升平, 吕飞舟, 等. 青冈栎次生林林木综合竞争压力指数研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(10): 1−6.
Lü Y, Qian S P, Lü F Z, et al. Study on comprehensive competition stress index of *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(10): 1−6.

[25] 钱升平. 青冈栎次生林林木综合竞争压力指数研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
Qian S P. Study on comprehensive competition stress index of *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.

[26] 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.

[27] Pretzsch H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 327: 251−264.

[28] Weiner J, Thomas S C. The nature of tree growth and the "age-related decline in forest productivity" [J]. Oikos, 2001, 94(2): 374−376.

[29] 涂宏涛, 孙玉军, 刘素真, 等. 亚热带杉木人工林生物量及其碳储量分布: 以福建将乐县杉木人工林为例 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(7): 94−99.
Tu H T, Sun Y J, Liu S Z, et al. Stand biomass and carbon storage distribution of Chinese fir plantation in ubtropical China[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2015, 35(7): 94−99.

[30] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北, 等. 立木地上部分生物量模型的建立及其应用研究 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 80−86.
Luo Q B, Zeng W S, He D B, et al. Establishment and application research of the biomass model for the above-ground part of standing trees[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(3): 80−86.

[31] 唐守正, 张会儒, 胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究 [J]. 林业科学, 2000, 36(专刊 1): 19−27.
Tang S Z, Zhang H R, Xu H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(Special 1): 19−27.

[32] 董利虎, 李凤日, 贾炜玮, 等. 含度量误差的黑龙江省主要树种生物量相容性模型 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2653−2661.
Dong L H, Li F R, Jia W W, et al. Compatible biomass models for main tree species with measurement error in Heilongjiang Province of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2653−2661.

[33] 胡雪凡, 段光爽, 张会儒, 等. 蒙古栎次生林林木竞争对不同抚育间伐方式的响应 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(1): 1−9.
Hu X F, Duan G S, Zhang H R, et al. Response of tree competition in natural secondary *Quercus mongolica* forest to thinning treatment[J]. Forestry Research, 2021, 34(1): 1−9.

（责任编辑 范 娟
责任编委 惠刚盈）