

# 闽楠天然次生林林木综合竞争指数研究

褚欣,潘萍,欧阳勋志\*,臧颢,吴自荣,汪清,单凯丽

(江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045)

**摘要:**以江西省吉安市闽楠天然次生林作为研究对象,通过八邻域平移法确定对象木,分别采用四邻体法、Voronoi 图法选取竞争木,并基于 Hegyi 简单竞争指数重新构建含胸径、树高、冠幅及林木间距等因子的综合竞争指数,利用 Pearson 相关分析法和曲线拟合比较分析不同方法选取竞争木的简单竞争指数与综合竞争指数的优劣。结果表明:1)简单竞争指数和综合竞争指数与胸径、树高及冠幅之间均呈极显著负相关( $P<0.01$ );2)综合竞争指数与胸径、树高及冠幅的相关性和拟合度均高于简单竞争指数;3)基于 Voronoi 图法构建的简单竞争指数和综合竞争指数与胸径、树高及冠幅的相关性和拟合度均高于基于四邻体法构建的简单竞争指数和综合竞争指数。研究结果可为闽楠天然次生林的合理经营与保护等措施的制订提供参考依据。

**关键词:**闽楠;次生林;竞争单元;综合竞争指数

**中图分类号:**S757.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2019)04-0199-07

## Comprehensive Competition Index of Natural Secondary *Phoebe bournei* Forest

CHU Xin,PAN Ping,OUYANG Xun-zhi\*,ZANG Hao,WU Zi-rong,WANG Qing,SHAN Kai-li

(College of Forestry,Jiangxi Agricultural University,Nanchang 330045,Jiangxi,China)

**Abstract:**Based on the typical sample investigation on the natural secondary forest,the eight neighbourhood translation method was used to determine the objective trees. The competitive trees were selected by the methods of four neighbourhoods and Voronoi map. Based on the Hegyi simple competition index,the comprehensive competition indexes of the factors such as DBH,tree height,crown width and tree spacing were reconstructed. A comparative analysis was made between the simple competitive index and comprehensive competitive index of different selection methods of the competitive trees. The main results and conclusions were as follows:1) There was a significant negative correlation between the simple competition index and comprehensive competition index with the DBH,tree height and crown width ( $P<0.01$ ). 2) The correlations and the fitting degrees between the comprehensive competition index with the DBH,tree height and crown width were all higher than that of simple competition index. 3) The correlations and the fitting degrees between the simple competition index and comprehensive competition index based on the Voronoi map were all higher than the simple competition index and comprehensive competition index constructed by the four neighborhood method.

**Key words:***Phoebe bournei*; secondary forest; competition unit; comprehensive competition index

在一定的资源生长空间里,林木竞争现象随处可见,为了获得生长发育所需要的一些必要条件(阳光、水分、养分等),林木间就出现了共同资源的争夺

情况,从而导致部分林木由于生存资源不足,出现生长迟缓或者死亡的现象<sup>[1-2]</sup>,竞争的结果主要就是林木生物体发育的差异<sup>[3-4]</sup>。林木间竞争强度与树木

收稿日期:2018-09-03 修回日期:2018-12-27  
基金项目:林业公益性行业科研专项(201504301);国家自然科学基金(31360181,31760207)。  
作者简介:褚欣,女,硕士在读,研究方向:森林资源监测与管理。E-mail:chuxin8\_2015@163.com  
\*通信作者:欧阳勋志,男,博士生导师,研究方向:森林资源监测与管理。E-mail:oyxz\_2003@hotmail.com

个体的胸径大小、树高大小、冠幅大小以及树木所处的空间环境有重要的关系<sup>[5]</sup>,为了表达林木间竞争的强度,相关学者提出了竞争指数(competition index)的概念<sup>[6]</sup>。竞争指数是反映林木间竞争强度的一个指标模型,用来表达林木生长对周围环境资源的需求量与占有量之间的关系。

目前已有很多学者提出了不同的竞争指数,如 Hegyi 提出了简单竞争指标(CI)<sup>[7]</sup>,利用对象木与竞争木的胸径因子以及两者之间的距离因子来反映林木的竞争状况;J. E. Opie<sup>[8]</sup>提出了单木竞争指标(S),主要是表达一个对象木所在空间具有单位断面积的大小;吕飞舟<sup>[9]</sup>等提出了以共生圈模式(FSI)为基础的竞争压力指数,根据其计算的压力指数值(CSI)可将林木进行分级;J. D. Arney<sup>[10]</sup>提出了竞争压力指数(CSI),主要是指利用林木胸径因子的函数来表达林木的生长空间,认为所有林木其最大限度的生长空间面积与具有相同胸径大小的自由树冠幅幅度面积相一致;张晔瑾<sup>[11]</sup>等研究了有关树冠因子的林木竞争指数(CCI),此竞争指数主要是根据 Hegyi 建立的简单竞争指数的基本形式,综合考虑了林分中竞争木的树高对其相应对象木的整体生长造成的影响,同时也考虑了各个林木之间冠幅重叠以及研究的对象木与其对应的竞争木之间的距离问题;吕勇<sup>[12]</sup>等在相关研究中也重新建立了林木综合竞争压力指数(C-CI),此竞争指数模型形式主要是根据 Arney 建立的林木竞争压力指数(CSI)模型的形式,同时考虑到了林木树高因子对林木竞争造成的影响即引入了林木最大生长空间冠幅重叠体积的概念;I. E. Bella<sup>[13]</sup>和 D. I. Bolnick<sup>[14]</sup>提出的 Bella 竞争指标,认为只要与对象木的冠幅有重叠的林木均可看作为该对象木的竞争木;汤孟平<sup>[15]</sup>等提出了 V\_Hegyi 竞争指数,即基于标准地林木的相对坐标信息,将泰森多边形即 Voronoi 图引用到林业中,利用 Voronoi 图竞争单元来判定竞争木,最终进行林木竞争指数的计算。在已有的竞争指数模型研究中主要涉及了林木胸径大小比、树高大小比、冠幅重叠面积大小比、冠幅重叠体积大小比以及冠幅幅度大小与林木间距离比等单个或 2 个因子与林木间距离的组合形式,针对林木胸径、树高、冠幅 3 个因子与林木间距离的组合形式还尚未有相关研究。

闽楠(*Phoebe bournei*)是中国特有树种,是国家Ⅱ级重点保护植物,具有重要的经济价值和生态价值。目前针对闽楠的研究主要涉及其人工林生物量结构特征<sup>[16-17]</sup>,天然林的种间联结性、空间结构<sup>[18]</sup>、群落种间竞争<sup>[19-20]</sup>、自然更新和植物多样性研究<sup>[21]</sup>,以及天然林与人工林生长特性<sup>[22]</sup>等,针对其

林木竞争指数方面的研究较少。因此,本研究以闽楠天然次生林为对象,采用不同方法确定竞争木,基于 Hegyi 简单竞争指数重新构建含胸径、树高、冠幅及林木间距等因子的综合竞争指数,比较分析不同方法选取竞争木的简单竞争指数与综合竞争指数的优劣,为闽楠天然次生林的合理经营与保护、抚育间伐等措施的制订提供参考依据。

## 1 研究区概况

吉安市处于江西省中部、赣江中游地区(113°48′—115°56′E,25°58′—27°57′N),主要是山地和丘陵地貌。该区属于亚热带季风气候,年平均气温18.6℃,年平均日照 1 720~1 800 h,年平均降水量 1 360~1 577 mm。土壤以红壤土为主,约占土壤总面积的 60%。森林自然资源非常丰富,地区内的植被类型包括针阔混交林、针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、竹林等,其中地带性植被类型主要以常绿阔叶林为主,针叶林主要是以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)为主。

## 2 研究方法

### 2.1 标准地设置与调查

通过当地林业部门的了解,在研究区内选择安福县、井冈山市以及遂川县,对闽楠天然次生林分布区域进行踏查。在踏查的基础上,选取人为活动干扰程度相对较轻且林分在分布区域内具有代表性的地块设置标准地调查。标准地大小依据其分布地形和闽楠树种分布情况等因素而定,标准地面积为 400 m<sup>2</sup>(20 m×20 m)或 600 m<sup>2</sup>(20 m×30 m),总共 23 块标准地,其中 2015 年 8 月设置与调查 12 块,2016 年 7 月 11 块。采取相邻网格的调查方法,对每块标准地依次划分为 4 个或 6 个 10 m×10 m 小样方,共有 100 个小样方。将每个小样方范围作为基本的林木调查单元,调查林分中所有林木胸径≥2 cm 的乔木的相对坐标位置(*x*、*y* 坐标)、树种、胸径、冠幅、树高等各林木因子的基础信息。标准地基本情况见表 1。

### 2.2 竞争指数的选取

利用 Excel 2010 将所有调查数据进行初步整理,根据每个标准地林木的相对坐标,将实测标准地分别向 8 个邻域(上、下、左、右、左上、左下、右上、右下)进行偏移(图 1),并确定偏移后的林木坐标,最后将所有林木信息数据导入 ArcGIS 10.2 中,基于林木相对坐标信息,形成点状图层(Point)即林木空间分布情况,根据各个标准地的四角坐标,形成相应面状区域(Polygon)即标准地区域范围。

表 1 标准地基本概况  
Table 1 Basic conditions of sample plots

项目	平均胸径 /cm	平均树高 /m	平均冠幅 /m	林分密度 /(株·hm <sup>-2</sup> )	每公顷断面积 /(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
均值	13.7	9.7	3.5	735	12.00
标准差	7.3	3.3	1.4	593	8.67
最小值	4.1	4.1	1.4	75	1.54
最大值	30.1	16.6	8.0	2225	31.57

选取了 2 种简单竞争指数模型,分别为基于四邻体的竞争指数 CI 和基于 Voronoi 图的竞争指数 CI-A,这 2 种竞争指数模型形式均采用如下公式:

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

式中, $CI_i$  表示林分中对象木  $i$  的简单竞争指标; $D_i$  表示林分中对象木  $i$  的胸径大小; $D_j$  表示对象木四周第  $j$  株竞争木胸径( $j=1,2,3\cdots n$ ); $L_{ij}$  表示林分中对象木  $i$  与其对应的竞争木  $j$  之间的距离。

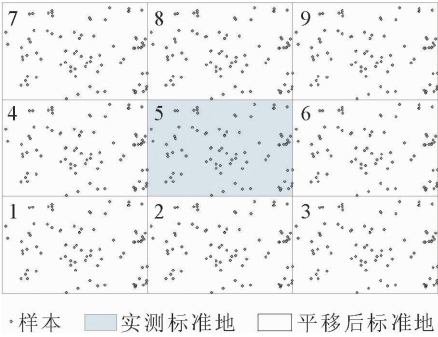


图 1 标准地边缘矫正示意图  
Fig.1 Edge correction plot diagram

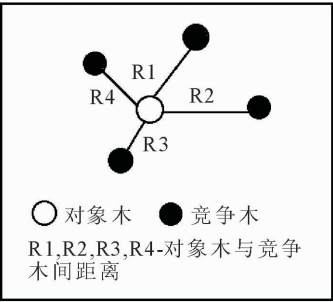


图 2 四邻体竞争单元  
Fig.2 Four adjacent woods competition unit

2.3 竞争单元的确定

2.3.1 四邻体法竞争指数竞争单元 根据 Hegyi 提出的简单竞争指数确定竞争单元,即确定竞争木株数  $n$ 。惠刚盈<sup>[5]</sup>等提出了最佳的空间结构单元,即邻近木株数  $n=4$  株,空间结构单元最优。选取距离对象木最近的 4 株邻近木作为对象木的竞争木,从而确定相应的竞争单元(图 2)。

2.3.2 Voronoi 图法竞争指数竞争单元 Voronoi 图法主要是以标准地乔木层中的每株林木为目标,利用 ArcGIS 中邻域分析创建泰森多边形的功能,

基于每株林木  $x,y$  定位坐标生成树木竞争 Voronoi 泰森多边形图(图 3)。泰森多边形内部的点为对象木,与泰森多边形相交的点即为该对象木的竞争木,竞争木的数量与泰森多边形的边数相等。

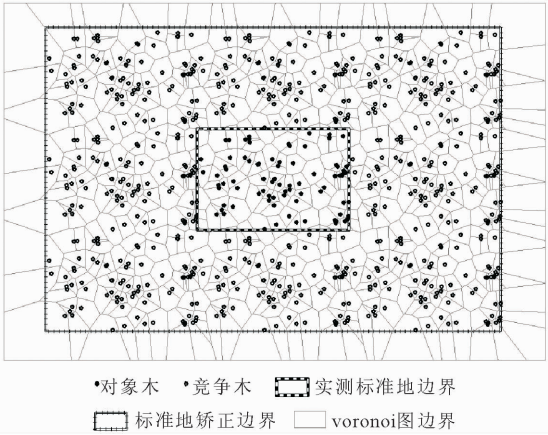


图 3 林木 Voronoi 多边形示意图  
Fig.3 Tree Voronoi polygon schematic diagram

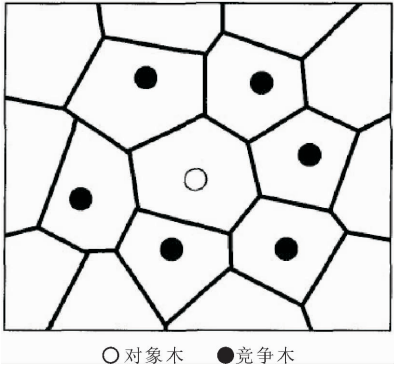


图 4 Voronoi 图竞争单元  
Fig.4 Voronoi map competition unit

2.4 对象木与竞争木的确定

2.4.1 对象木的确定 为确保对象木的样木数量,将图 1 编号为 5 的实测标准地内的全部林木作为对象木,其余偏移后区域内林木只选作竞争木。所有标准地以此类推,总共有 1 308 株对象木。

2.4.2 竞争木的确定 采用 2 种方法选取对象木相对应的竞争木:一是选择距离对象木最近的 4 株林木即四邻体作为竞争木;二是基于 Voronoi 图根据泰森多边形的竞争单元及其边数来确定相对应的竞争木。

2.5 边界木的处理

为了保证对象木的样木数量,采用偏移法即八邻域平移法<sup>[23-24]</sup>消除边缘效应,把矩形标准地分别向八个邻域进行偏移,将标准地周围的林分视为与标准地一致,标准地内的林木全部作为对象木,偏移后的区域内林木只选作竞争木,共形成 9 个区域(图 1)。

2.6 综合竞争指数模型的构建

基于 Hegyi 简单竞争指数模型的形式,构建以林木胸径、树高、冠幅的乘积作为一个综合考虑因子,用竞争木的胸径、树高、冠幅乘积与对象木的胸径、树高、冠幅乘积的比值再乘以两者之间距离的倒数。模型如下:

$$CI-C_i=\sum_{j=1}^n\left(\frac{D_j\cdot H_j\cdot CW_j}{D_i\cdot H_i\cdot CW_i}\right)\cdot\left(\frac{1}{L_{ij}}\right)\quad (2)$$

式中,CI-C<sub>i</sub> 表示林分中对象木的综合竞争指标;D<sub>i</sub>、H<sub>i</sub>、CW<sub>i</sub> 分别表示林分中对象木*i* 的胸径、树高和冠幅直径;D<sub>j</sub>、H<sub>j</sub>、CW<sub>j</sub> 分别表示林分中竞争木*j* 的胸径、树高和冠幅直径;L<sub>ij</sub> 示林分中对象木与其相对应的竞争木*j* 之间的距离。模型第一部分采用竞争木与对象木的胸径、树高、冠幅 3 个林分因子乘积的比值来表示,既考虑到了林木水平方向上的大小,也考虑到了林木垂直方向上的大小;第二部分采用了对象木与竞争木之间距离的倒数来表示,此部分考虑到了林木间距离的问题,两部分加起来即可构成林木综合竞争指数模型。

表 2 不同竞争指数与林木胸径、树高和冠幅相关分析结果

Table 2 Correlation analysis results of different competitive indexes with DBH,tree height and crown width

项目	相关系数	CI	CI-C1	CI-A	CI-C2
胸径	Kendall's tau_b	-0.520**	-0.537**	-0.563**	-0.583**
	Spearman's rho	-0.704**	-0.729**	-0.748**	-0.775**
树高	Kendall's tau_b	-0.544**	-0.560**	-0.586**	-0.603**
	Spearman's rho	-0.678**	-0.714**	-0.725**	-0.757**
冠幅	Kendall's tau_b	-0.535**	-0.573**	-0.565**	-0.586**
	Spearman's rho	-0.650**	-0.708**	-0.675**	-0.709**

注: \*\* 表示在置信度(双侧)为 0.01 时有显著的相关性。

3.2.2 不同竞争指数与林木树高的拟合 从图 6 可以看出,不同竞争指数随着树高的增大均减小。林木主要集中分布在树高为 5~7 m,随着树高的增大,竞争指数急剧减小,当树高>7 m 后,林木竞争指数减少的速度趋于平缓。综合竞争指数与树高的拟合度均大于简单竞争指数,即 CI-C1>CI、CI-C2>CI-A;基于 Voronoi 图法构建的竞争指数与树高的拟合度高于基于四邻体法构建的竞争指数,即 CI-A>CI、CI-C2>CI-C1。

3.2.3 不同竞争指数与林木冠幅的拟合 从图 7 可以看出,不同竞争指数随着冠幅的增大均减小。林木主要集中分布在冠幅为 2~3 m 范围内,随着

通过不同方法选取竞争木,采用简单竞争指数和综合竞争指数进行林木竞争指数分析,其中基于四邻体法构建的简单竞争指数为 CI、综合竞争指数为 CI-C1;基于 Voronoi 图法构建的简单竞争指数为 CI-A、综合竞争指数为 CI-C2。

3 结果与分析

3.1 不同竞争指数与林木因子相关分析

由表 2 可以看出,相关系数 Kendall's tau\_b 和相关系数 Spearman's rho 均为负值,表明林木竞争指数与胸径、树高和冠幅均是负相关关系,且均在 0.01 水平上极显著相关(P<0.01)。2 种相关系数的绝对值均表现出综合竞争指数高于简单竞争指数,且基于 Voronoi 图法构建的竞争指数高于基于四邻体法构建的竞争指数。

3.2 不同竞争指数与林木因子拟合

3.2.1 不同竞争指数与林木胸径的拟合 从图 5 可以看出,不同竞争指数随着胸径的增大均减小。林木主要集中分布在胸径为 2~5 cm 范围内,随着胸径的增大,竞争指数急剧减小,当胸径>5 cm 后,林木竞争指数减小的速度趋于平缓。综合竞争指数与胸径的拟合度均大于简单竞争指数,即 CI-C1>CI、CI-C2>CI-A;基于 Voronoi 图法构建的竞争指数与胸径的拟合度高于基于四邻体法构建的竞争指数,即 CI-A>CI、CI-C2>CI-C1。

冠幅的增大,竞争指数急剧减小,当冠幅>3 m 后,林木竞争指数减小的速度趋于平缓。综合竞争指数与冠幅的拟合度均大于简单竞争指数,即 CI-C1>CI、CI-C2>CI-A;基于 Voronoi 图法构建的竞争指数与冠幅的拟合度高于基于四邻体法构建的竞争指数,即 CI-A>CI、CI-C2>CI-C1。

4 结论与讨论

本研究表明,闽楠天然次生林的简单竞争指数和综合竞争指数与林木胸径、树高及冠幅之间均呈极显著负相关(P<0.01);综合竞争指数与林木胸径、树高及冠幅的相关性均高于简单竞争指数;基于

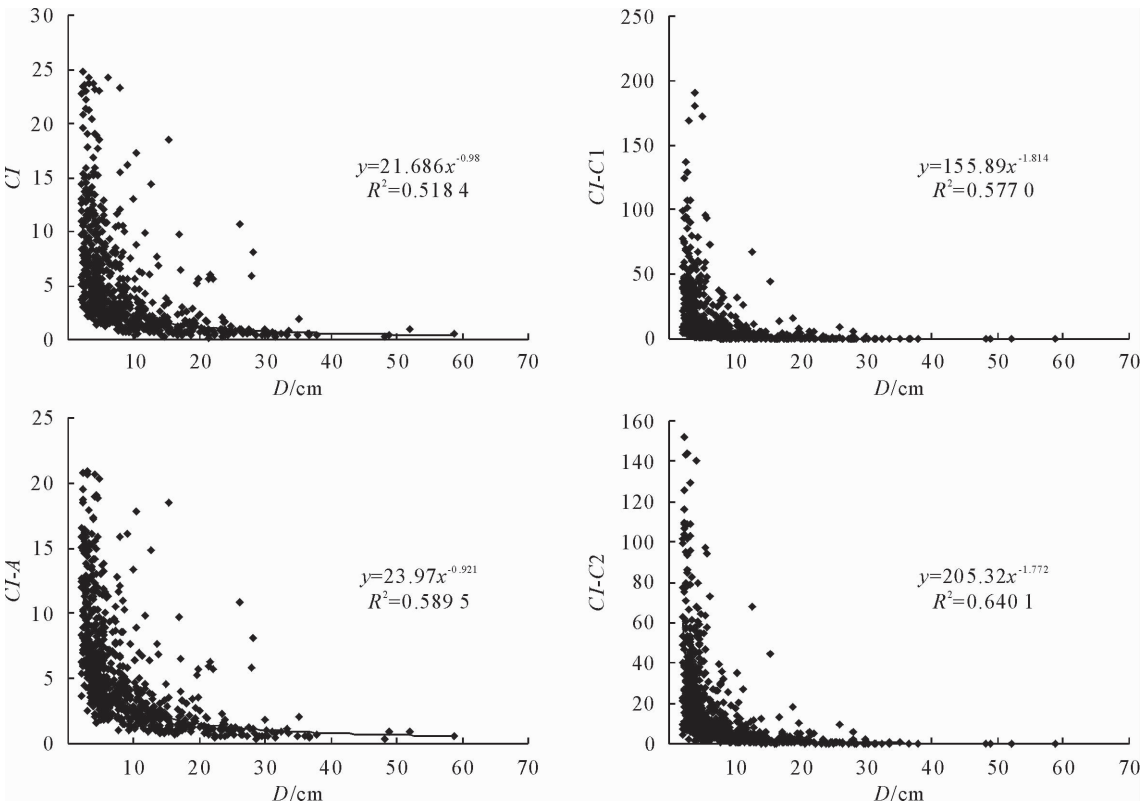


图 5 不同竞争指数与林木胸径拟合结果

Fig. 5 The fitting of different competition index and DBH

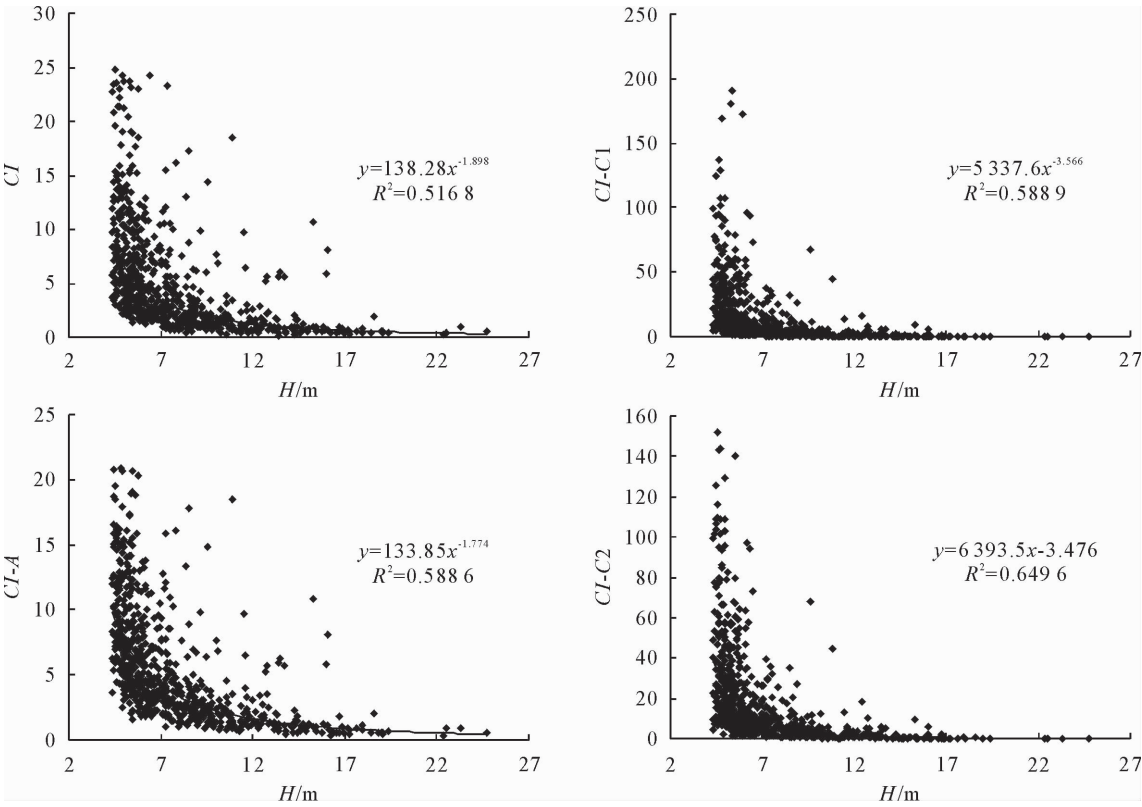


图 6 不同竞争指数与林木树高拟合结果

Fig. 6 The fitting of different competition index and tree height

Voronoi 图法构建的简单竞争指数和综合竞争指数要优于基于四邻体法构建的简单竞争指数和综合竞争指数,说明合理的确定其竞争木数量有利于更加

准确地评判林木竞争情况。钱升平<sup>[23]</sup>等以青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)为研究对象,基于简单竞争指数竞争单元的构建,表明对象木周围的竞争木

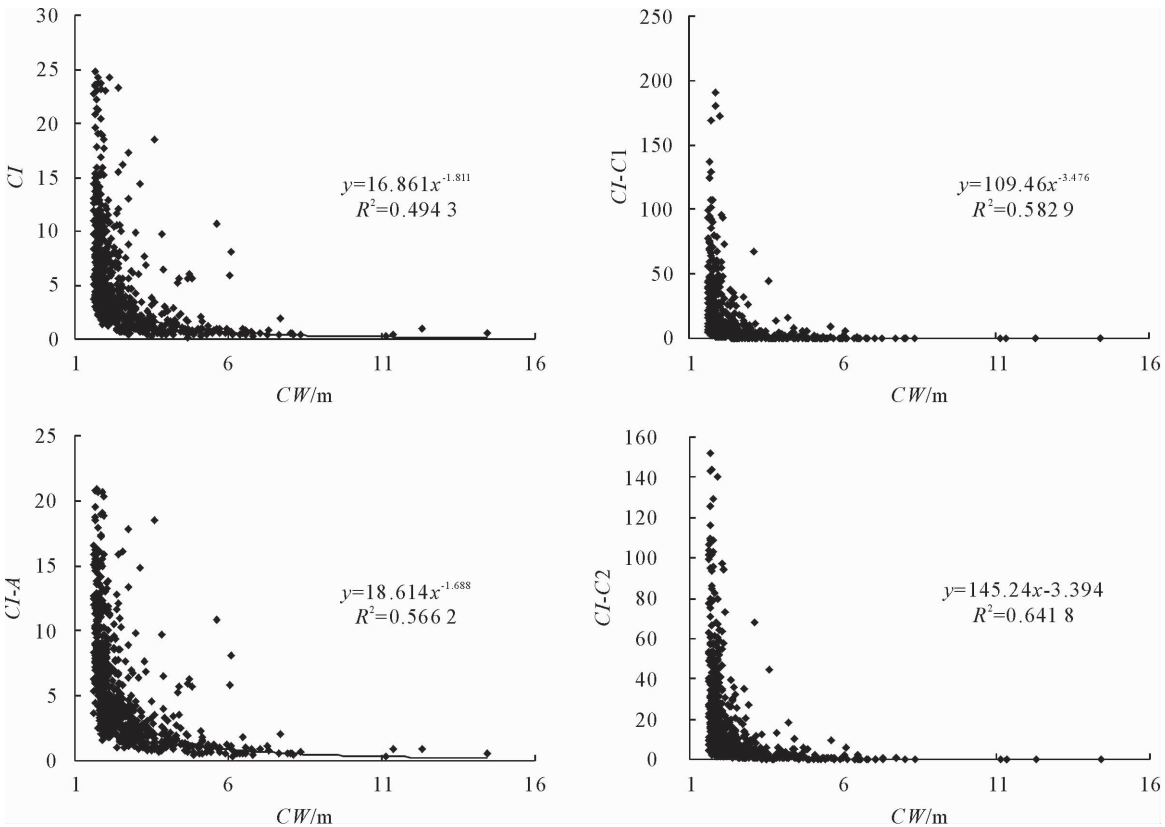


图 7 不同竞争指数与林木冠幅拟合结果

Fig. 7 The fitting of different competition indexes and crown width

数量为 6 株最合理。由此看出,林木竞争状况受不同林分、不同树种和各种不同环境因子等的影响,因此进行林分竞争方面的研究时,需要根据林分的实际情况选择不同的研究方法。

闽楠天然次生林随林木胸径、树高和冠幅的增大,其简单竞争指数和综合竞争指数值即竞争强度均越小,这与树木的正常生长规律相符合;林分中大部分树木集中分布在径阶为 0~20 cm 范围内,说明闽楠天然次生林小径阶乔木数量较多,符合天然次生林生长的特点,即天然林幼树幼苗数量居多,自然更新速度快。简单竞争指数和综合竞争指数与胸径、树高及冠幅之间均呈幂函数关系,所有模型的次幂值均为负值,这与 D. S. Yin<sup>[25]</sup>等、V. Šeběň<sup>[26]</sup>等研究的天然次生林林木竞争结果相似,说明林木个体越大,其周围竞争单元内的林木对其竞争强度就越弱。基于 Voronoi 图法构建的简单竞争指数和综合竞争指数与胸径的曲线拟合,其拟合度均高于基于四邻体法构建的简单竞争指数和综合竞争指数,分别为 0.62、0.64,高于吕勇<sup>[12]</sup>等研究的青冈栎次生林拟合度 0.50,低于曾思齐<sup>[27]</sup>等研究的青冈栎次生林拟合度 0.74、李际平<sup>[24]</sup>等研究的杉木生态公益林拟合度 0.70,原因可能是由于林分密度、林木所在的环境因子(阳光、水分、养分)等的差异以及构建竞争指数模型的因子不同等造成的影响。本研究表

明,综合竞争指数拟合度高于简单竞争指数,说明综合竞争指数比简单竞争指数适用性更高,根据拟合图可以看出,林木在胸径为 10 cm 以上,竞争压力明显减小,因此为了促进闽楠天然次生林的合理经营,应在闽楠树种胸径大小达到 10 cm 之前实施必要的抚育措施,而曾思齐<sup>[27]</sup>等研究了青冈栎次生林种内与种间竞争表明,当林木胸径达到 25 cm 之前要采取相应的人工抚育间伐措施,减少林木生长的竞争强度,改善其生长环境。可以算出,不同树种由于其自身属性特征导致的生长发育阶段不同,因此其抚育间伐的时间段也有所不同。

林木间的竞争作用与众多因素有关联,本研究选取能够反映林木生物学特性的林木胸径、树高、冠幅及林木间距等因子建立综合竞争指数模型来表达林木获取资源的能力,且综合竞争指数模型相对于简单竞争指数模型更具有适用性,此结果与张晔瑾<sup>[11]</sup>等、吕勇<sup>[12]</sup>等研究的综合竞争指数结果相似,均表明竞争指数模型中加入树高、冠幅等因子对模型优度有一定的提高,且都比 Hegyi 提出的简单竞争指数模型效果更好。基于 Voronoi 图法构建的简单竞争指数和综合竞争指数优于基于四邻体法构建的简单竞争指数和综合竞争指数,弥补了 Hegyi 简单竞争指数固定 4 株竞争木的缺陷。惠刚盈<sup>[5]</sup>等也研究出了不同的竞争指数模型,其适用性均比 He-



gyi 简单竞争指数要高。由此可以看出,林分竞争指数不是唯一的,每个竞争指数都有其适用性,在未来的研究中,可根据林分的现实情况进一步分析各个竞争指数,探索更优的综合竞争指数模型。

参考文献:

[1] 夜来比,杨华,赵广亮,等. 单木竞争指标的研究进展[J]. 西北林学院学报,2012,27(6):152-158.  
ZI L B,YANG H,ZHAO G L,*et al.* A review on the competition indices of individual trees[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(6):152-158. (in Chinese)

[2] 仇建习,汤孟平,娄明华,等. 基于 Hegyi 改进模型的毛竹林空间结构和竞争分析[J]. 生态学报,2016,36(4):1058-1065.  
QIU J X,TANG M P,LOU M H,*et al.* Analysis of the spatial structure and competition with a *Phyllostachys edulis* stand-based on an improved Hegyi model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(4):1058-1065. (in Chinese)

[3] 吴建强,王懿祥,杨峪,等. 基于 GIS 技术的林木竞争指数计算系统的设计与开发[J]. 西北林学院学报,2014,29(4):175-181.  
WU J Q,WANG Y X,YANG Y,*et al.* Design and development of competition index calculation system based on GIS technology[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(4):175-181. (in Chinese)

[4] SKOLE D L. Secondary forest expansion in the Brazilian Amazon and the refinement of forest transition theory[J]. Society & Natural Resources,2003,16(4):277-294.

[5] 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]. Scientia Silvae Sinicae, 2013,49(6):68-73. (in Chinese)

[6] 袁兴中,陈忠礼,刘红. 消落带湿地优势植物竞争关系[J]. 生态学杂志,2011,30(9):1863-1867.

[7] 殷鸣放,薛娟,宁良智,等. 基于近自然林业经营的不同密度林木竞争关系比较分析[J]. 西北林学院学报,2013,28(5):149-153.  
YIN M F,XUE J,NING L Z,*et al.* Comparative study on competition relationship of the forests with different densities based on near-nature forestry management[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(5):149-153. (in Chinese)

[8] OPIE J E. Predictability of individual tree growth using various definitions of competing basal area[J]. Forest Science,1968,14(3):314-323.

[9] 吕飞舟,石程远,朱光玉,等. 基于冠幅比数的次生林林木分级研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(3):211-214.  
LV F Z,SHI C Y,ZHU G Y,*et al.* Classification of the secondary forest based on crown comparison index[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(3):211-214. (in Chinese)

[10] ARNEY J D. Tables for quantifying competitive stress on individual trees[M]. 1973.

[11] 张晔琨,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.

[12] 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.

[13] BELLA I E. A new competition model for individual trees[J]. Forest Science,1971,17(17):364-372.

[14] BOLNICK D I,INGRAM T,STUTZ W E,*et al.* Ecological release from interspecific competition leads to decoupled changes in population and individual niche width[J]. Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences,2010,277(1689):1789-1797.

[15] 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 M P,CEHN Y G,SHI Y J,*et al.* Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(11):4707-4716. (in Chinese)

[16] 刘宝,陈存及,林思祖,等. 不同密度闽楠苗木地上部分与地下部分竞争的定量研究[J]. 福建林学院学报,2013,33(2):119-123.

[17] 邵明晓,文仕知,何功秀,等. 不同林龄闽楠人工林生物量结构特征[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(6):44-48.

[18] 游晓庆,彭诗涛,郭孝玉,等. 闽楠天然次生林林分空间结构研究[J]. 江西农业大学学报,2016,38(4):660-667.

[19] 刘宝,陈存及,陈世品,等. 福建明溪闽楠天然林群落种间竞争的研究[J]. 福建林学院学报,2005,25(2):117-120.

[20] 张宁,张怀清,林辉,等. 基于竞争指数的杉木林分生长可视化模拟研究[J]. 林业科学研究,2013,26(6):692-697.

[21] 李雪云,潘萍,臧颀,等. 闽楠天然次生林自然更新的影响因子研究[J]. 林业科学研究,2017,30(5):701-708.

[22] 江香梅,肖复明,叶金山,等. 闽楠天然林与人工林生长特性研究[J]. 江西农业大学学报,2009,31(6):1049-1054.  
JIANG X M,XIAO F M,YE J S,*et al.* A study on the growth characteristics of *Phoebe bournei* in natural forest and plantation stands[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009,31(6):1049-1054. (in Chinese)

[23] 钱升平,吕飞舟,边更战,等. 基于简单竞争指标的青冈栎次生林林木竞争单元构建[J]. 林业资源管理,2016(2):56-61.

[24] 李际平,房晓娜,封尧,等. 基于加权 Voronoi 图的林木竞争指数[J]. 北京林业大学学报,2015,37(3):61-68.  
LI J P,FANG X N,FENG Y,*et al.* Tree competition indexes based on weighted Voronoi diagram[J]. Journal of Beijing Forestry University,2015,37(3):61-68. (in Chinese)

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

[26] ŠEBEN V,BOSEL A M,KONOPKA B,*et al.* Indices of tree competition in dense spruces stand originated from natural regeneration[J]. Forestry Journal,2013,59(3):172-179.

[27] 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. (in Chinese)