

DOI: 10.20103/j.stxb.202304130753

廉琪,张弓乔,萨日娜,卢彦磊,刘文桢,胡艳波,赵中华.基于树冠重叠面积的天然混交林林木竞争指数.生态学报,2024,44(5):2057-2068.

Lian Q, Zhang G Q, Sarina, Lu Y L, Liu W Z, Hu Y B, Zhao Z H. Competition index of natural mixed forests based on canopy overlap area. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2057-2068.

基于树冠重叠面积的天然混交林林木竞争指数

廉琪¹, 张弓乔¹, 萨日娜¹, 卢彦磊¹, 刘文桢², 胡艳波¹, 赵中华^{1,*}

1 中国林业科学研究院林业研究所, 林木资源高效生产全国重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091

2 甘肃省小陇山林业试验局林业科学研究所, 甘肃省栎类次生林生态系统重点实验室, 天水 741022

摘要: 构建基于树冠重叠面积和林木混交关系的竞争指数, 探究天然混交林林分及主要树种竞争的表达方法, 并以甘肃省小陇山林区锐齿槲栎天然混交林为研究对象, 采用胸径、树高、冠幅、距离等信息的 2 期调查数据, 对新构建的基于树冠重叠面积的天然混交林林木竞争 (CIM) 指数进行验证, 并选取 Spearman 系数, 对 CIM 竞争指数和传统竞争指数进行相关性分析。结果表明, 采用树冠投影重叠和考虑树高关系确定竞争木的方法能有效避免竞争木多选或漏选; CIM1、CIM2、CIM3 能够表达出混交林竞争压力变化, 表现出竞争压力越大林木蓄积生长量越小的趋势, 将树种混交因子引入竞争指数能够提高蓄积生长量与竞争指数的相关性, 更加客观的描述林分中竞争状况。竞争指数与蓄积生长量相关性由大到小排序为 CIM2>CIM3>CIM1>Bella 竞争指数 (CIO)>简单竞争指数 (CI)>CIO2>CIO1, 表明竞争指数 CIM2 对混交林竞争表达更具参考意义。林分中主要树种锐齿槲栎由于相邻木中同树种相邻木增加, 导致竞争压力增大。天然混交林中树种组成复杂多样, 林木分布不均匀, 在竞争指数中引入树种混交因子能够较为真实的反映林木竞争状况。

关键词: 竞争指数; 锐齿槲栎; 天然混交林; 树冠重叠面积

Competition index of natural mixed forests based on canopy overlap area

LIAN Qi¹, ZHANG Gongqiao¹, Sarina¹, LU Yanlei¹, LIU Wenzhen², HU Yanbo¹, ZHAO Zhonghua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Oak Secondary Forest Ecosystem of Gansu Province, Xiaolongshan Research Institute of Forestry in Gansu Province, Tianshui 741022, China

Abstract: Competition in forests plays a significant role in the process of tree growth, and the competition indices were typically used to quantify the intensity of competition among individual trees. However, due to the rich composition of tree species and the patchy distribution in natural mixed forests, there were still few studies on tree competition in natural mixed forests. In this study, we constructed a competition index based on the overlapped area of tree crowns and interspecies interactions, which allowed us to investigate the intensity of competition in natural forests and among major tree species. Specifically, we focused on the *Quercus aliena* natural forest in Xiaolongshan Forest District of Gansu Province and used data of DBH (breast height diameter), tree height, crown size, and distance from two surveys to validate the newly developed CIM (Competition Index based on Overlapping area and Mixing) index. To evaluate the effectiveness of our index, we utilized the CIM and conventional competition indices, such as CIO (Competitive Influence-Zone Overlap) and CI (Competition Index), and employed the Spearman coefficient to analyze their correlation with growth accumulation. We found that our method of determining competing trees using crown projection overlaps and tree height was an effective tool that could help prevent excessive selection or omission of competing trees. The results indicated that CIM1, CIM2, and CIM3 could effectively capture changes in competition pressure across natural forests and demonstrated that as competition pressure increased, tree growth accumulation decreased. In addition, by introducing the tree species mixing factor into our

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32171780)

收稿日期: 2023-04-13; 网络出版日期: 2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zzhwl@caf.ac.cn

competition indices, we improved the correlation between growth accumulation and competition indices and provided a more objective representation of competition status in the natural forest. Specifically, our study found that the correlation between competition indices and growth accumulation was the highest for CIM2, followed by CIM3, CIM1, CIO, CI, CIO2, and CIO1. The competition index CIM2 provided more comprehensive information regarding competition within the mixed forests. Our investigation into the competitive pressures of *Quercus aliena* revealed that the intensity of competition increased with the number of intraspecies competing trees in close proximity. Given the complex and diverse species composition and patchy distribution of trees in mixed forests, it is critical to introduce sufficient factors into competition indices to obtain a reasonably accurate representation of the competitive relationship between trees. Overall, our study provided an effective method for expressing the competitive relationship between trees in natural mixed forests and demonstrated the importance of considering multiple factors when measuring competition intensity.

Key Words: competition index; *Quercus aliena*; natural mixed forests; canopy overlap area

植物个体的生长不仅取决于自身的遗传特性,还取决于生境立地质量及对环境资源的利用状况。竞争是植物群落中普遍存在的现象,竞争能力的差异由扎根类型和深度、植株大小、生长率、高度、截留光的能力或其他特征决定^[1-4],也是由于环境条件和资源水平的限制对物种竞争能力产生深刻的影响。竞争的结果不仅影响个体的生存、生长和繁殖,而且影响种群空间分布动态和群落的物种多样性,反过来,竞争也影响和改变着生境条件,使之有利或不利于植物个体的生长,从而驱动群落结构的组建、生产力的形成和植物群落系统的发展与演替,因此,植物的竞争研究一直是植物生长、种群动态和群落演替方向的核心问题之一^[2-3,5]。

森林生态系统是以乔木为主体的森林生物群落(包括动物、植物和微生物)与非生物环境(光、热、水、气、土壤等)之间相互作用,并进行能量转换和物质循环流动的综合生态体系。林木是构成森林生态系统的主体,个体间的竞争关系研究是了解林木个体生长、以及整个群落特征、动态变化的关键^[3,6]。林木竞争的概念形成于 19 世纪末,早期的研究主要以定性描述为主,从 1884 年 Kraft 提出通过形态定性来描述竞争关系的林木分级法算起,定性描述已有 130 多年的历史^[7]。20 世纪 50 年代以来,大量学者针对不同地区不同物种提出了不同的林木竞争指数系统^[5,8-25],用数量化的指标来反映林木之间的竞争关系^[17]。由于林木生长的固着性,林木之间的相互作用主要发生在相邻个体之间,导致竞争常在局域范围内发生^[5-6]。因此也常将竞争指数称为邻体竞争模型^[26]。竞争指数在形式上反映的是林木个体生长与生存空间的关系,取决于林木本身的状态(如胸径、树高和冠幅等)和林木所处的局部环境(邻近树木的状态),但其实质是反映林分对环境资源需求与现实生境中林木对环境资源占有量之间的关系^[11]。为描述和表达林木竞争的关系,人们投入了大量的精力来构建竞争指数,迄今为至,至少提出了 30 余种竞争指数模型^[5,9-17,26-30]。如 Hegyi^[14]提出简单竞争指数(CI),采用对象木与竞争木的胸径因子和两者之间的距离因子反映林木间的竞争压力。基于 Hegyi 竞争指数,汤孟平等^[10]引入 Voronoi 图计算竞争指数,学者们提出了 V_hegyi 竞争指数;李际平等学者^[29]通过胸径加权 Voronoi 图确定竞争木,进而提出了 W_V_hegyi 竞争指数;除此之外,根据不同的侧重点,提出了其他形式的竞争指数,如 Bella^[12]基于竞争影响区域的竞争指数(CIO),认为是林木的树冠或根系发生接触竞争现象才会发生,并根据林分中树冠投影是否重叠确定是否构成竞争,利用树冠重叠面积、树冠因子、竞争木和对象木的胸径等因子构建竞争指数;Opie^[16]提出的单木竞争指标,通过表达对象木所在空间中所具有的单位胸高断面面积的大小来反映对象木承受的竞争压力;惠刚盈等^[11,15,27]提出了基于交角的林木竞争指数,能够体现林木受到的上方遮盖和侧面挤压,即综合考虑了林木水平方向、垂直方向和相对位置 3 方面因素;Brown^[13]提出潜在生长面积(APA)表达林分的生长空间,根据样地面积以及各林木的大小和位置进行计算。将对象木与周围林木之间的距离垂直平分,由各垂直平分线围成的多边形即是对象木的潜在生长面积,通过生长面积来表达对象木所承受的竞争压力。Charles C D^[31]结合林分潜在生长、树冠的拥挤和遮蔽来计算目标树的预期径向生长(NCI),总体而言,大多竞争指数的构建是将林木的生长指标,如胸径、树高、冠幅、冠长、树冠重叠面积等作为自变量,把竞争指数作为因变量,按照是否考虑林木间距离,分为与距离有关的竞争指数和与距离

无关的竞争指数 2 大类^[8]。

构建竞争指数不仅要考虑选择的指标能够反映出林木竞争状态或生长环境,还要考虑对竞争状态变化的敏感程度,而且构建的竞争指标要具有一定的生理和生态学意义^[8]。当不考虑林木间距离时,仅采用林木的属性信息来描述竞争状态的指标因其表达林木的竞争状况能力弱,预估效果差,试用范围小而逐步被淘汰。考虑距离的竞争指标由于同时考虑了对象木与竞争木的属性信息和竞争范围,因而具有更好地表达竞争状态的能力,良好的模拟与预测能力和更广的适用范围而受人青睐。然而,考虑距离的竞争指数往往在如何确定竞争范围或竞争木数量上存在较大的争论^[32],例如在采用 Hegyi 竞争指数描述林木竞争时,不同的研究者在确定竞争范围时方法不同,有采用固定半径法,半径选取通常在 5 m^[33-34]、6 m^[35]、8 m^[36]、10 m^[33]也有采用固定相邻木数量的方法^[11,15],Hui 等^[15]提出了基于空间结构参数的林木竞争指数(SCI),该指数不仅考虑了竞争木上方的遮盖和侧翼的挤压,还考虑了竞争木位置分布和不同树种对竞争的影响,一定程度上能够表达出多树种天然林的林木竞争状态,但该指数在选择竞争木时采用了 4 株固定相邻木的方法,仍然存在漏选或多选竞争木的问题。因此,无论是采用固定半径还是采用固定相邻木个数,都会出现竞争木选取不准确的问题,从而并不能完全反映出林木的竞争状态^[37]。此外,林木的竞争状态不仅与相邻木的数量有关,而且与相邻木的树种、相对位置等均有密切的关系,对于由不同树种组成的林分而言,种内种间关系远较由单一树种组成的林分复杂,不同的树种间往往并不一定是竞争的关系,而是相互促进的关系^[2,30]。传统的竞争指数对于描述组成单一、林木位置相对统一的人工林具有一定的适用性,但对于树种组成复杂、林木间距离变化较大的天然林显然并不一定适用。综上所述,本研究针对混交林中对象木的竞争木选取方法及树种竞争的表达进行改进,构建含胸径、树高、树冠重叠面积、树种等因子的混交林综合竞争指数,并以甘肃小陇山锐齿槲栎天然混交林为对象,利用 2 期定位监测数据对其进行验证,通过蓄积生长量与竞争指数的相关性分析新构建指数的有效性,为天然混交林林木竞争表达提供参考。

1 研究区概况

甘肃小陇山林区地处秦岭西段,地理坐标为东经 104°22'—106°43',北纬 33°30'—34°49',东西长 212.5 km,南北宽 146.5 km,兼具我国南北方气候特征,属于温带向亚热带过渡地带,大多数地域属暖温带湿润-中温带半湿润大陆性季风气候类型,年均降水量 800 mm,年平均蒸发量 1420 mm,湿润度 0.36—0.45,相对湿度 69%,无霜期 184.8 d,土壤以山地棕壤和山地褐土为主。由于特殊的地理位置,小陇山林区植物组成复杂多样,是甘肃省生物种质资源最丰富的地区之一。林区内主要有锐齿槲栎(*Quercus aliena*)、山榆(*Ulmus macrocarpa*)、太白槭(*Acer giraldii*)、华山松(*Pinus armandii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)、漆树(*Rhus verniciflora*)、青榨槭(*Acer davidii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、千金榆(*Carpinus cordata*)、甘肃山楂(*Crataegus kansuensis*)、刺楸(*Kalopanax septemlobus*)等乔木树种。

2 研究方法

2.1 样地调查

2008 年 9 月,在甘肃省小陇山林业保护中心百花林场埡坪营林区小阳沟营 71 林班内,运用 TOPCON 全站仪(GTS-601)建立了 1 块面积为 70 m×70 m 的每木定位长期监测样地,对样地内胸高($h=1.3$ m)直径大于 5 cm 的林木进行定位挂牌,记录树种、胸径、树高、冠幅、更新状况、林木健康等基本信息。每 5 年对样地进行一次复测,调查时除对定位林木调查基本信息外,对于胸径达到 5 cm 的更新幼树也要调查相关信息,并用皮尺测量更新幼树与其最近 3 株相邻木间的距离,运用两点间距离公式,计算出更新幼树的坐标。对 2008 年、2018 年两期调查数据进行分析,林分基本特征如表 1 所示。

2.2 竞争木确定方法的改进

在确定竞争木时,仅判断对象木与相邻木的树冠投影是否重叠会增加竞争木的数量,从而在一定程度上

表 1 小陇山锐齿槲栎天然混交林林分及主要树种群落基本特征
Table 1 Basic stand characteristics of natural mixed forest and major tree species communities in Xiaolongshan forest region

调查时间 Time	树种 Species	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	平均冠幅 Average crown width/m	树种数 Tree species number	树种组成 Tree species composition	密度 Density/ (株/hm ²)	断面积 Basal area/ (m ² /hm ²)	重要值 Important value	Shannon- Wiener 指数 Shannon- Wiener's index	Simpson 指数 Simpson's index
2008 年	所有树种 All species	19.6	12.6	4.9	36	3 锐齿槲栎 2 山榆 1 太白槭 4 其他 3 <i>Quercus aliena</i> 2 <i>Ulmus macrocarpa</i> 1 <i>Acer giraldii</i> 4 Other	843	25.39		3.96	0.90
	锐齿槲栎 <i>Quercus aliena</i>	25.8	16.5	5.6				8.49	0.24		
	太白槭 <i>Acer giraldii</i>	15.5	11.7	4.8				2.70	0.15		
	山榆 <i>Ulmus macrocarpa</i>	26.6	16.6	6.7				4.04	0.11		
	所有树种 All species	21.9	13.4	6.1	36	3 锐齿槲栎 2 山榆 1 太白槭 4 其他 3 <i>Quercus aliena</i> 2 <i>Ulmus macrocarpa</i> 1 <i>Acer giraldii</i> 4 Other	755	28.41		3.85	0.89
2018 年	所有树种 All species	11.73%	6.35%	24.49%							
	锐齿槲栎 <i>Quercus aliena</i>	13.62%	11.52%	26.79%							
	太白槭 <i>Acer giraldii</i>	8.55%	3.48%	16.67%							
	山榆 <i>Ulmus macrocarpa</i>	9.43%	7.78%	19.40%							
	所有树种 All species	11.73%	6.35%	24.49%							
相对变化率 Relative change rate							-10.44%	11.89%			
								2.56%			
								1.44%			
								0.22%			

DBH: 乔木主干离地表面胸高处的直径 Diameter at breast height; 表中百分数表示 2018 年基本数据相比 2008 年基本数据上升(下降)的比例

夸大林木的竞争,因此,在确定竞争木时还需要考虑对象木与竞争木在空间上的位置关系。本研究将树冠投影重叠且树高不低于对象木 2 m 的相邻木作为竞争木。具体方法如下:将林木树冠简化为圆形,以对象木树干为中心,以其树冠半径为搜索半径寻找符合上述条件的林木。树冠重叠可通过对象木与相邻木间的距离 ($Dist_{ij}$) 及二者的树冠半径的大小关系判断重叠面积,分以下 4 种情况(图 1):

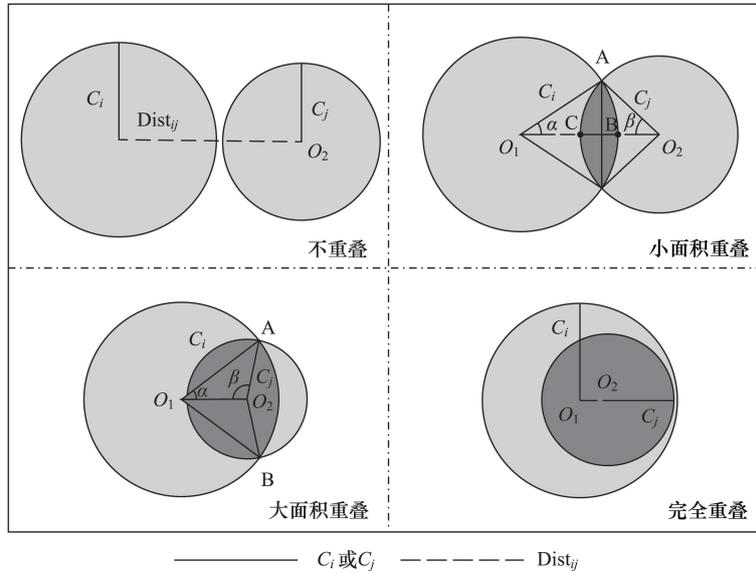


图 1 树冠重叠示意图

Fig.1 Schematic diagram of canopy overlap

C_i :对象木树冠半径 (m); C_j :相邻木树冠半径 (m); O_1 :对象木树冠中心; O_2 :相邻木树冠中心; $Dist_{ij}$:对象木与相邻木间距离 (m); A、B、C:对象木与相邻木树冠接触交点

图 1 中, C_i 为对象木树冠半径 (m), C_j 为相邻木的树冠半径 (m), $Dist_{ij}$ 为对象木与相邻木间的距离 (m)。不重叠表示 $Dist_{ij} \geq C_i + C_j$,对象木树冠与相邻木树冠相离,重叠面积为 0,不发生竞争关系;小面积重叠和大面积重叠表示 $|C_i - C_j| < Dist_{ij} < C_i + C_j$,对象木树冠与相邻木树冠投影重叠,如果相邻木 (j) 的树高不低于对象木 (i) 2 米,则认为二者存在竞争;完全重叠表示 $Dist_{ij} \leq |C_i - C_j|$ 时,对象木树冠与相邻木树冠完全重叠,如果相邻木 (j) 的树高不低于对象木 (i) 2 米,则认为二者存在竞争,重叠面积即为竞争木 (j) 的树冠面积。4 种情况树冠重叠面积 ZO_{ij} 计算公式如下:

$$ZO_{ij} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} ZO_{ij} &= \sum_{j=1}^N 2 \times (S_{\text{扇形}O_1AB} + S_{\text{扇形}O_2AC} - S_{\text{三角}AO_1O_2}) \\ &= \sum_{j=1}^N 2 \times \left[\left(\frac{1}{2} \times \arccos \alpha \times C_i^2 \right) + \left(\frac{1}{2} \times \arccos \beta \times C_j^2 \right) - \sqrt{p(p - C_i)(p - C_j)(p - Dist_{ij})} \right] \\ &= \sum_{j=1}^N \arccos \left(\frac{C_i^2 + Dist_{ij}^2 - C_j^2}{2 \times C_i \times Dist_{ij}} \right) \times C_i^2 + \arccos \left(\frac{C_j^2 + Dist_{ij}^2 - C_i^2}{2 \times C_j \times Dist_{ij}} \right) \times C_j^2 - \\ &\quad 2 \times \sqrt{p(p - C_i)(p - C_j)(p - Dist_{ij})} \end{aligned} \tag{2}$$

$$ZO_{ij} = \pi \times C_j^2 \tag{3}$$

式中, p 为海伦公式即三角形面积计算公式,其计算式如下:

$$p = \frac{a + b + c}{2} \tag{4}$$

2.3 竞争指数

在天然混交林中,由于树种众多,树种之间的关系远较由单一树种组成的林分复杂,一般认为,相同树种之间对资源的竞争往往更加激烈。因此,本研究在竞争指数中引入树种混交因子。借鉴 Gadow^[38]等提出的简单混交度的概念,基于种内竞争大于种间竞争的假设,提出下式来表达树种混交竞争因子:

$$M_i = \frac{n + 0.5(N - n)}{N} = \frac{0.5n}{N} + 0.5 \quad (5)$$

式中, M_i 为树种混交竞争因子, N 为竞争木的数量; n 为与对象木为同一树种的竞争木数量。该式表明,同种竞争木越多,对象木所受竞争压力越大, M_i 取值范围为 $[0.5, 1]$ 。

基于 Bella^[12] 竞争指数及其变形^[28], 引入树种混交竞争因子, 构建以下竞争指数 CIM 来表达天然混交林林木竞争:

$$\text{CIM1}_i = \sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \times M_i \quad (6)$$

$$\text{CIM2}_i = \sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \times \left(\frac{D_j}{D_i} \right) \times M_i \quad (7)$$

$$\text{CIM3}_i = \sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \times \left(\frac{H_j}{H_i} \right) \times M_i \quad (8)$$

式中, D_i 为对象木 i 的胸径 (cm), D_j 为竞争木 j 的胸径 (cm), ZA_i 为对象木树冠面积 (m^2), ZO_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 树冠投影重叠面积 (m^2), H_i 为对象木 i 的树高 (m), H_j 为竞争木 j 的树高 (m), N 为对象木相邻竞争木的个数。

为验证改进后的竞争指数的有效性,本研究还计算了 Bella^[12] 竞争指数及其变形,表达式如下:

$$\text{CIO}_i = \sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \times \left(\frac{D_j}{D_i} \right) \quad (9)$$

$$\text{CIO1}_i = \sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \quad (10)$$

$$\text{CIO2}_i = \sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i} \times \left(\frac{H_j}{H_i} \right) \quad (11)$$

式(9)为 Bella 竞争指数,式(10)和式(11)为其变形^[28],式中, D_i 为对象木的胸径, D_j 为竞争木的胸径, H_i 为对象木的树高, H_j 为竞争木的树高, N 为对象木 i 的竞争木数量,符号意义与式(6、7、8)相同。

此外,由于 Hegyi 简单竞争指数 (CI)^[14] 因所需参数较少,计算简便,广泛应用于人工林竞争强度量化。本研究应用其计算混交林林木竞争,公式如下:

$$CI_i = \sum_{j=1}^N \frac{D_j}{D_i} \times \frac{1}{\text{Dist}_{ij}} \quad (12)$$

式中, D_i 为对象木 i 的胸径, D_j 为竞争木 j 的胸径, Dist_{ij} 为对象木与竞争木之间的距离。 CI_i 值越大,表明对象木受到竞争木的竞争压力越大。

2.4 生长量计算

在分析竞争指数与生长量关系时,采用蓄积生长量 (m^3),计算公式如下:

$$\Delta V = V_t - V_{t-n} \quad (13)$$

式中, V_t 为当前蓄积量 (m^3), V_{t-n} 为 n 年前的蓄积量 (m^3)。锐齿槲栎混交林主要树种二元材积计算公式如下^[39]:

$$V_{\text{华山松}} = 0.000059973839 D^{1.8334312} H^{1.0295315} \quad (14)$$

$$V_{\text{栎类}} = 0.000060970532 D^{1.8735078} H^{0.94157465} \quad (15)$$

$$V_{\text{阔叶树}} = 0.000057887451 D^{1.8445849} H^{0.98088457} \quad (16)$$

2.5 数据分析

利用 Winkelmass 和 anaconda 3 软件对小陇山天然混交林样地数据进行预处理,数据处理时设置 3.5 m 缓冲区,位于缓冲区的林木只作为对象木的竞争木。Hegyi 简单竞争指数和 Bella 竞争指数及其变形在确定竞争木时采用树冠投影重叠方法,CIM 竞争指数采用改进的竞争木选择方法。应用 Excel 2019 进行数据分析,将计算数据归一化处理。利用 Origin 2021 软件分析以上竞争指数并与蓄积变化量进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同竞争指数对天然混交林林木竞争的表达

采用 Bella 竞争指数及其变形(CIO、CIO1、CIO2)、Hegyi 简单竞争指数(CI)和 CIM 竞争指数(CIM1、CIM2、CIM3)对 2008、2018 年两期数据进行分析,结果如图 2 所示。由图 2 可知,竞争指数 CIO1 与其他竞争指数表现结果相反,即林分 2008 年的竞争压力大于 2018 年,其差异可能源自竞争木的选择方法。因此,只利用竞争木与对象木树冠重叠面积与对象木的树冠面积之比无法准确说明竞争的变化。结合表 1 林分基本特征数据可知,10 年内林分的平均胸径、平均树高及平均冠幅等基本特征都有不同程度的上升,林分密度降低,林木间平均距离增加,但林分密度的变化小于胸径、树高和冠幅等因子的变化,因此,竞争指数的变化主要由胸径、树高及冠幅等因子决定,因此 2018 年林分竞争指数值应大于 2008 年。

3.2 竞争指数与蓄积生长量相关性分析

将林分竞争指数与林分 10 年的蓄积生长量进行分析得图 3。由图 3 可以看出,CIM 系列指数在描述林分竞争与蓄积生长量的关系时,均明显的表示出随着竞争指数的升高,蓄积生长量的上四分位点、中位数及平均值均下降,说明竞争越大,单木生长过程中所受到的生长压力越大,蓄积生长量越小。而 CIO、CIO2 以及 CI 指数并未表现出竞争压力增加,蓄积生长减小的趋势,其中 CI 指数箱线图表明在竞争指数较大即竞争压力较大时,蓄积生长量也较大,这与事实不符,说明其并不适用于描述天然混交林的竞争。CIO 及 CIO2 竞争指数在描述竞争压力与蓄积生长量的关系时,存在波动趋势,表明它们在竞争压力小时对蓄积生长量的描述并不准确。CIO1 指数则表现出完全相反的趋势,进一步说明只采用对象木与竞争木的树冠重叠面积无法准确表达林木的竞争。为进一步了解蓄积生长量与竞争指数的相关性,选取 Spearman 相关系数进行分析,结果如图 4 所示。竞争指数与蓄积生长量相关性都在双尾检验中表现为极显著相关($P < 0.01$),竞争指数与蓄积生长量的相关系数均为负值,表明随着竞争指数升高蓄积生长量降低,二者之间相关性由大到小排序为 $CIM2 > CIM3 > CIM1 > CIO > CI > CIO2 > CIO1$,其中 CIM2 指数与蓄积生长量的相关性最强为 -0.79 ,CIO1 与蓄积生长量的相关性最差为 -0.17 ,其余竞争指数的相关系数值介于二者之间。

3.3 主要树种竞争强度分析

为进一步验证 CIM 竞争指数的合理性,对样地中的主要树种的竞争指数进行分析。表 2 为林分中主要树种锐齿槲栎、太白槭和山榆种群的 10 年变化特征,并将主要树种竞争强度变化绘制在图 5 中,结合表 1、表 2 可以看出,2008 年至 2018 年,锐齿槲栎种群个体较大,林冠位于林分上层,混交因子上升表明种内竞争更加激烈,竞争木与对象木树冠投影重叠面积与对象木树冠面积比值下降,表明该种群上层空间更为开放。根据

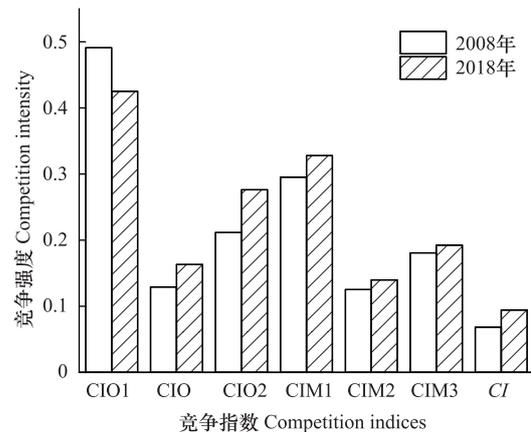


图 2 林分竞争指数 10 年变化

Fig.2 Decadal variation chart of the competition indices of the forest stand

CIO: Bella 竞争指数; CIO1、CIO2: Bella 竞争指数变形; CIM: 基于树冠重叠面积天然混交林林木竞争指数; CIM1、CIM2、CIM3: 基于树冠重叠面积天然混交林林木竞争指数变形; CI: Hegyi 竞争指数

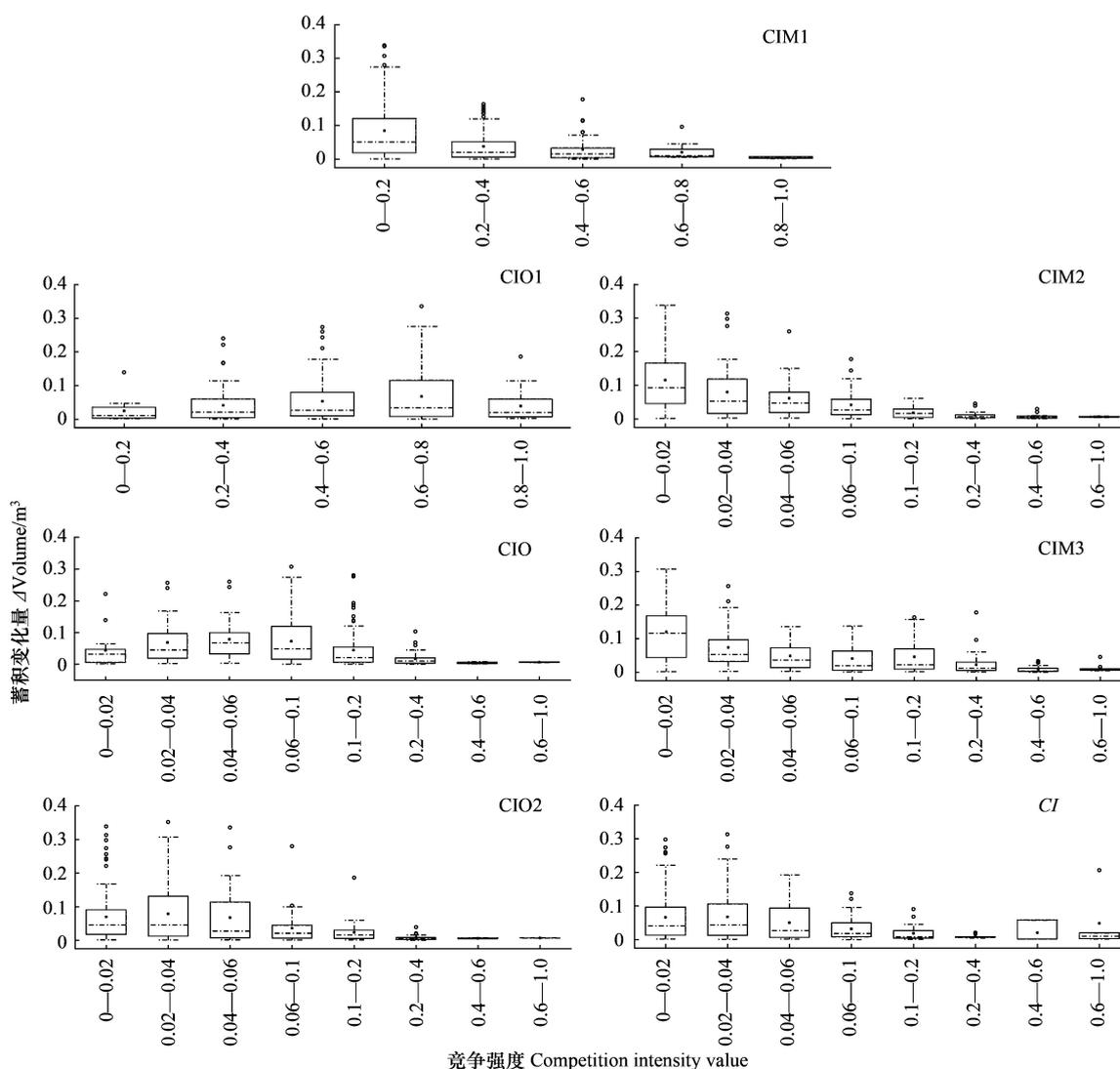


图3 竞争指数与蓄积生长量关系

Fig.3 Relationship between Competition Indices and Volume Growth

锐齿槲栎竞争强度变化可知, CIO1、CIO 及 CIO2 指数均表现出竞争压力下降趋势, 与 CIM1、CIM2、CIM3 指数竞争指数略微上升的趋势相反, 表明 2018 年时, 锐齿槲栎种群种内竞争压力上升。太白槭种群个体较小, 树高较低, 在林分中竞争压力较大, $\sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i}$ 均值从 2008 年 174.1% 继续上升至 2018 年的 181.3%, 表明该种群个体林分上层空间仍面临较强的竞争压力, 混交因子略微降低, 除 CIO1 指数外, 其余指数均表现出一致的变化趋势; 山榆种群个体也属于林分中较大的个体, 混交因子无变化, $\sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i}$ 均值下降, 2018 年林分上层空间较 2008 年更为开阔, 各指数对竞争描述与实际一致。CI 指数在上述三个主要树种群落中均表现出相同的变化趋势, 主要是由于胸径因子变化导致。综上所述, 当混交因子变化较小时, 各指数均可以表达林分竞争, 但当林分中混交因子发生变化或变化较大时, CIM 系列指数对林分竞争描述更加符合实际情况, 说明混交因子的引入可以真实表达林分的种内与种间竞争。综合来看, CIM2 指数由于胸径因子简单易测, 对混交林竞争表达更具参考意义。

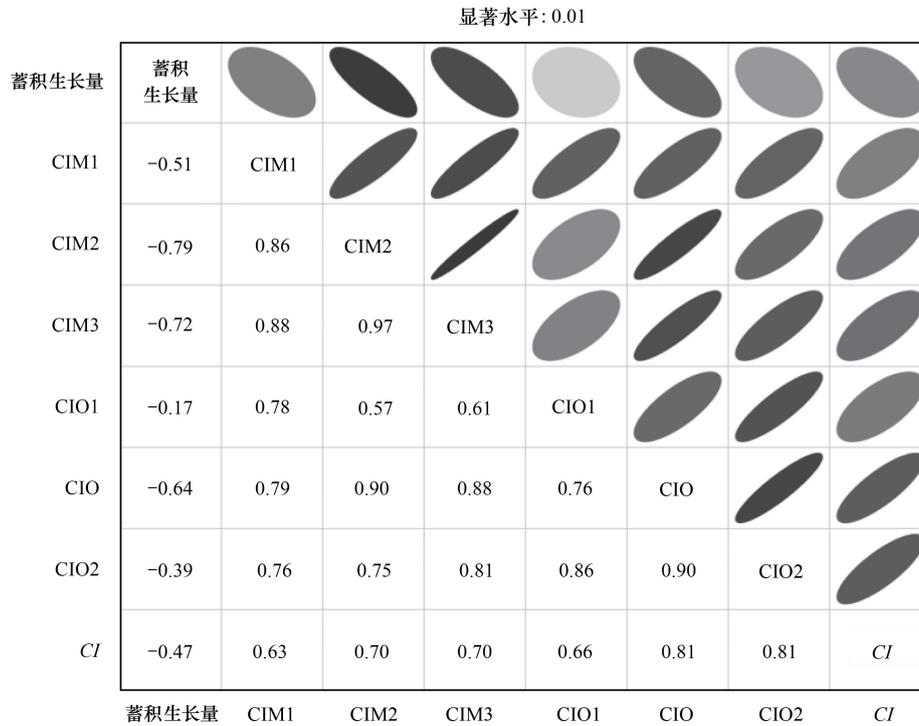


图 4 竞争指数与蓄积生长量相关系数图

Fig.4 Correlation coefficient diagram of competition indices and volume growth

表 2 主要树种特征 10 年变化情况表

Table 2 Decadal changes in characteristics of main tree species communities

树种 Species	调查时间 Time	混交因子 M_i	ZA_i 平均树冠面积 Average crown area/m ²	$\sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i}$ 均值 Mean value	$\sum_{j=1}^N \frac{ZO_{ij}}{ZA_i}$ 改进均值 Improved mean value	$\sum_{j=1}^N H_j/H_i$ 均值 Mean value	$\sum_{j=1}^N H_j/H_i$ 改进均值 Improved mean value	$\sum_{j=1}^N D_j/D_i$ 均值 Mean value	$\sum_{j=1}^N D_j/D_i$ 改进均值 Improved mean value
锐齿槲栎	2008 年	0.61	29.7	253.4%	87.2%	5.5	3.1	5.7	3.7
<i>Quercus aliena</i>	2018 年	0.69	44.4	225.0%	79.5%	7.2	3.8	7.8	4.9
太白槭	2008 年	0.69	22.0	260.3%	174.1%	7.2	5.8	10.4	9.1
<i>Acer giraldii</i>	2018 年	0.68	28.8	256.1%	181.3%	9.8	8.2	13.5	12.6
山榆	2008 年	0.61	35.2	250.4%	119.9%	6.4	3.6	6.0	4.0
<i>Ulmus macrocarpa</i>	2018 年	0.61	49.4	211.8%	109.5%	7.9	4.2	7.6	4.7

4 讨论

4.1 竞争木的选择方法

树木通过光合作用才能进行物质生产,光合作用的效率与树冠所能接受的光照量关系密切。部分学者认为^[40-41],竞争只在一定的范围或在林木间树冠发生接触或重叠时才会出现。因此,以往的竞争木选择常用固定半径或树冠投影重叠的方法进行确定^[12],特别是在人工林的竞争研究中,但这两种方法容易出现竞争木多选或漏选的问题。对于天然林混交林而言,林分中林木位置分布随机,林木间的距离变化不一,采用固定半径选择竞争木的方法显然不适用于天然交林。本研究采用了树冠投影重叠的方法确定竞争木,同时,针对天然混交林树种多样、林木大小分化复杂的特点,在利用树冠投影重叠选择竞争木时还考虑了树高关系,认为只有

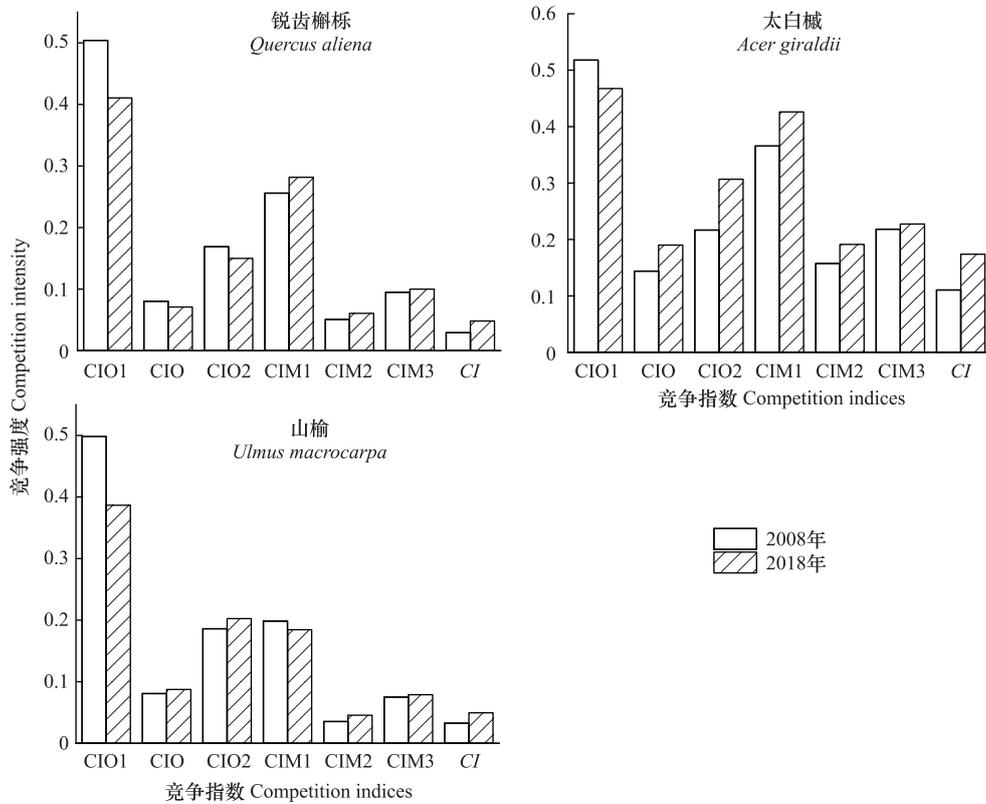


图5 主要树种群落竞争强度分析

Fig.5 Analysis of competition intensity of main tree species communities

相邻木的树高不低于对象木 2 m 的相邻木作为竞争木。研究中 Hegyi 简单竞争指数和 Bella 竞争指数及其变形竞争指数在确定竞争木时只考虑了树冠投影重叠, CIM 竞争指数采用了既考虑树冠投影重叠又考虑了对象木与相邻木的树高关系, 结果显示, CIM 系列竞争指数对天然混交林竞争压力描述更加细致, 与客观实际相符。沈琛琛等^[42]认为, 在竞争指数应用中首先要选用至少两个相关性高的竞争指标, 才能保证可以相互验证其计算结果; 其次要尽量多采用些无相关性的竞争指标, 以丰富竞争指标, 更全面地反映林分竞争状态。

4.2 混交因子在竞争指数中的应用

混交林群落是不同树种个体共同存在的总和, 因此, 可以认为混交林群落是不同树种在小尺度上相互作用的结果。这种相互作用可以促进或减少相邻木的生长, 且在很大程度上是由相邻树木同时产生积极(例如, 生态位分化或提升)或消极(例如, 资源竞争)影响形成的, 由此造成的植物种内或种间竞争对林木的个体生长过程影响深远^[30, 43-46]。一般而言, 植物的生态位需求越接近, 竞争也就越强^[3]。同种植物由于基本相同的形态、生理及生活史特征, 对资源、空间等需求高度相似^[2], 导致竞争压力较种间竞争压力大。本研究对锐齿槲栎天然混交林主要树种竞争强度分析时发现, 在竞争指数中加入树种混交因子, 能够很好地反映出对象木相邻木树种变化对竞争产生的影响, 如锐齿槲栎种群和太白槭种群, 经历了 10 年的自然生长, 一些林木死亡, 群落中的锐齿槲栎种群总体上而言, 相邻木为同种的概率上升, 最终导致该树种的种内竞争压力增加。因此, 在竞争指数中加入混交因子, 进一步细化了对象木竞争压力的来源组成, 使竞争指数对竞争压力的描述更符合林分实际。前人在研究中也发现, 植物种间竞争关系多样, 不同树种对于资源的争夺能力不同, 这种关系造成的影响目前难以量化, 混交因子只能描述种内个体施加的竞争影响, 因此, 在今后的研究中还要关注不同树种之间的相互作用的大小并加以量化, 才能够更加深入了解植物种间竞争机制。

5 结论

研究针对天然混交林林木的竞争表达,改进了现有竞争木的确定方法,提出了通过对象木与竞争木的树冠重叠面积和树高关系来确定竞争木和其数量,有效地避免了传统方法在确定竞争木时出现多选或漏选的现象;同时,结合混交林中树种多样,竞争关系复杂的实际情况,在竞争指数中引入混交竞争因子,并结合重叠面积、胸径、树高等因子,构建了新的混交林的单木竞争指数。应用甘肃小陇山林区锐齿槲栎天然混交林长期定位监测样地调查数据验证了新构建竞争指数的有效性,新构建的竞争指数 CIM 系列指数应用改进的竞争木选择办法及引入混交因子后, CIM2 指数与蓄积生长量的相关性最强,且选用的林分基本指标容易获取,可以用于反映天然混交林的真实竞争状况。

参考文献(References):

- [1] DiTommaso A, Aarssen L W. Resource manipulations in natural vegetation: a review. *Vegetatio*, 1989, 84(1): 9-29.
- [2] 李博, 陈家宽, 沃金森 A R. 植物竞争研究进展. *植物学通报*, 1998, 33(4): 18-29.
- [3] 杜峰, 梁宗锁, 胡莉娟. 植物竞争研究综述. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 157-163.
- [4] Tremmel D C, Bazzaz F A. How neighbor canopy architecture affects target plant performance. *Ecology*, 1993, 74(7): 2114-2124.
- [5] Weiner J, Conte P T. Dispersal and neighborhood effects in an annual plant competition model. *Ecological Modelling*, 1981, 13(3): 131-147.
- [6] Stoll P, Weiner J. A neighborhood view of interactions among individual plants. *The Geometry of Ecological Interactions*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 11-27.
- [7] 孟宪宇. 测树学. 北京:中国林业出版社, 2006:118-119.
- [8] 关玉秀, 张守攻. 竞争指标的分类及评价. *北京林业大学学报*, 1992, 14(4): 1-8.
- [9] Daniels R F. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *Forest Science*, 1976, 22(4): 454-456.
- [10] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 周国模, 赵明水. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争. *生态学报*, 2007, 27(11): 4707-4716.
- [11] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 袁士云, 刘文桢. 基于交角的林木竞争指数. *林业科学*, 2013, 49(6): 68-73.
- [12] Bella I E. A new competition model for individual trees. *Forest Science*, 1971, 17(3): 364-372.
- [13] Brown G S. Point density in stems per acre//; Forest Research Institute, New Zealand Forest Service, 1965.
- [14] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine standssimulation. *Royalcoll. For, Res. Notes*, 1974, 74-90.
- [15] Hui G Y, Wang Y, Zhang G Q, Zhao Z H, Bai C, Liu W Z. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests. *Forest Ecology and Management*, 2018, 422: 49-58.
- [16] Opie Jack E. Predictability of individual tree growth using various definitions of competing basal area. *Forest Science*, 1968, 14(3): 314-323.
- [17] Staebler G R. Growth and spacing in an even-aged stand of Douglas-fir, 1951.
- [18] 马履一, 王希群. 生长空间竞争指数及其在油松、侧柏种内竞争中的应用研究. *生态科学*, 2006, 25(5): 385-389.
- [19] 陈立新, 哈雪梅, 段文标, 韩冬荟, 李常准, 刘玉萍, 沈海龙, 张鹏. 红松人工林优势木竞争指数影响因子. *生态学报*, 2022, 42(5): 1777-1787.
- [20] 宋语涵, 张晨, 蔡体久, 琚存勇. 基于 Voronoi 图的阔叶红松林空间结构特征分析. *北京林业大学学报*, 2021, 43(1): 20-26.
- [21] 董莉莉, 刘红民, 赵济川, 高英旭, 汪成成, 范俊岗. 林分结构对辽东山区蒙古栎林天然更新的影响. *林业科学研究*, 2021, 34(5): 104-110.
- [22] 杜秀芳, 汤孟平, 潘建勇, 沈钱勇, 杨帆. 临安区不同森林类型竞争指数比较研究. *生态学报*, 2020, 40(12): 4064-4072.
- [23] 褚欣, 潘萍, 欧阳勋志, 臧颢, 吴自荣, 汪清, 单凯丽. 闽楠天然次生林林木综合竞争指数研究. *西北林学院学报*, 2019, 34(4): 199-205.
- [24] 吕勇, 钱升平, 吕飞舟, 朱光玉. 青冈栎次生林林木综合竞争压力指数研究. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(10): 1-6.
- [25] 潘磊, 王轶夫, 孙钊, 乔晶晶, 邱思玉, 孙玉军. 长白落叶松树冠半径分布特征及其对竞争的响应. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 27-37.
- [26] 张跃西. 邻体干扰模型的改进及其在营林中的应用. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(4): 352-357.
- [27] 白超, 赵中华, 胡艳波. 基于交角的林木竞争指数应用研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(7): 138-145.
- [28] 黄新峰, 亢新刚, 杨华, 赵浩彦, 江帆, 王静洲, 万猛. 5 个林木竞争指数模型的比较. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(7): 127-134, 140.
- [29] 李际平, 房晓娜, 封尧, 孙华, 曹小玉, 赵春燕, 李建军. 基于加权 Voronoi 图的林木竞争指数. *北京林业大学学报*, 2015, 37(3): 61-68.
- [30] Williams L J, Paquette A, Cavender-Bares J, Messier C, Reich P B. Spatial complementarity in tree crowns explains overyielding in species

- mixtures. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 63.
- [31] Canham C D, LePage P T, Coates K D. A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(4): 778-787.
- [32] 刘红润, 李凤日. 红松天然林种内和种间竞争关系的研究. *植物研究*, 2010, 30(4): 479-484.
- [33] 周志强, 刘彤, 李云灵. 立地条件差异对天然东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)种间竞争的影响. *生态学报*, 2007, 27(6): 2223-2229.
- [34] 刘彤, 李云灵, 周志强, 胡海清. 天然东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)种内和种间竞争. *生态学报*, 2007, 27(3): 924-929.
- [35] 李志洪, 胡淑仪, 李伟, 李清湖. 粤东北马尾松-木荷混交林种内种间竞争强度分析. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(8): 91-95.
- [36] 刘方炎, 李昆, 廖声熙, 崔永忠. 濒危植物翠柏的个体生长动态及种群结构与种内竞争. *林业科学*, 2010, 46(10): 23-28.
- [37] 徐道炜, 刘金福, 洪伟. 森林群落种内种间竞争研究进展. *亚热带农业研究*, 2014, 10(3): 199-204.
- [38] Gadov K V, Fuldner K. Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung. *Forst Und Holz*, 1993, 48(21): 602-606.
- [39] 小陇山林业实验局. 林业资料汇编: 林业资料汇编(第二辑), 1984.
- [40] Getzin S, Wiegand K, Schumacher J, Gougeon F A. Scale-dependent competition at the stand level assessed from crown areas. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2478-2485.
- [41] 李树人, 赵勇, 阎志平. 日本落叶松林冠层光生态场研究. *应用生态学报*, 1997, 8(2): 123-126.
- [42] 沈琛琛, 雷相东, 王福有, 马武, 沈剑波. 金苍林场蒙古栎天然中龄林竞争关系研究. *林业科学研究*, 2012, 25(3): 339-345.
- [43] Michalet R, Chen S Y, An L Z, Wang X T, Wang Y X, Guo P, Ding C C, Xiao S. Communities: are they groups of hidden interactions? *Journal of Vegetation Science*, 2015, 26(2): 207-218.
- [44] Potvin C, Dutilleul P. Neighborhood effects and size-asymmetric competition in a tree plantation varying in diversity. *Ecology*, 2009, 90(2): 321-327.
- [45] Fichtner A, Härdtle W, Bruehlheide H, Kunz M, Li Y, von Oheimb G. Neighbourhood interactions drive overyielding in mixed-species tree communities. *Nature Communications*, 2018, 9: 1144.
- [46] Van de Peer T, Verheyen K, Ponette Q, Setiawan N N, Muys B. Overyielding in young tree plantations is driven by local complementarity and selection effects related to shade tolerance. *Journal of Ecology*, 2018, 106(3): 1096-1105.