

网络出版时间:2012-06-08 15:10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120608.1510.002.html>

5个林木竞争指数模型的比较

黄新峰^{1,2}, 亢新刚¹, 杨 华¹, 赵浩彦¹, 江 帆², 王静洲², 万 猛²

(1 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2 河南省林业调查规划院, 河南 郑州 450045)

【摘要】【目的】比较计算1个Hegyi竞争指数和4个Bella竞争指数的5个林木竞争指数计算模型在评价林木竞争关系中的适应性。【方法】在吉林省汪清林业局金沟岭林场某一近原始状态的针阔混交林内设置40 m×50 m的样地,以样地内对象木5年间的胸高断面面积生长量为因变量,以通过5个竞争指数模型(分别命名为H_1、B_1、B_2、B_3和B_4)计算得到的竞争指数为自变量,构建胸高断面面积生长量模型,采用模型的决定系数来评价各竞争指数模型的适应性。【结果】样地中红皮云杉、冷杉、紫椴和红松4个树种的累计胸高断面面积占有所有样木胸高断面面积总和的比例超过80%,因此将这4个树种作为对象木进行研究。对紫椴和红松而言,模型B_1的适应性最强;对红皮云杉和冷杉而言,各个竞争指数模型的表现不一致。【结论】5个竞争指数模型在不同树种间的适应性表现不一致,说明采用单一竞争指数模型来反映混交林的竞争关系难以获得理想结果,对竞争指数模型还需要进行深入和广泛的研究。

【关键词】 林木竞争;竞争指数模型;胸高断面面积

【中图分类号】 S711

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)07-0127-08

Comparison of 5 tree competition index models

HUANG Xin-feng^{1,2}, KANG Xin-gang¹, YANG Hua¹, ZHAO Hao-yan¹,
JIANG Fan², WANG Jing-zhou², WAN Meng²

(1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 Henan Provincial Academy of Forest Inventory and Planning, Zhengzhou, Henan 450045, China)

Abstract: 【Objective】The study was done in order to compare the adaption of the five tree competition models, including one Hegyi's competition index (CI) and four Bella's CIs. 【Method】One plot representing near-natural conifer and broadleaved mixed forest, sized 40 m×50 m, was established and surveyed in Jingouling forest farm, Wangqing forest bureau, Jilin province. A regression model was formed with the basal area increment in five years as the dependant variable and the CIs as the independent variables. The dependent coefficient of the model was taken as the criterion to assess the models. 【Result】The basal area of four tree species *Abies nephrolepi*, *Picea koraiensis*, *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* amounted to more than 80% of the total basal area in the plot. So they were selected as the target species for the research. As for *Tilia amurensis* and *Pinus koraiensis*, the model B_1 was the most suitable, but for *Picea koraiensis* and *Abies nephrolepi* these models did not demonstrate similar trend. 【Conclusion】The competition models demonstrated different adaption among these tree species, showing that the competition model with one variable could not fully demonstrate the competition relationship for mixed forest and more work on the competition models is necessary.

Key words: forest competition; competition index models; basal area

* [收稿日期] 2011-08-30

[基金项目] 林业公益性行业科研专项(200804027)

[作者简介] 黄新峰(1978—),男,河南洛阳人,工程师,在读博士,主要从事林业信息管理研究。E-mail: whuangfeng@163.com

竞争是生物间相互作用的一个重要方面,是指 2 个或多个生物体在对同一环境资源和能量的争夺中所发生的相互作用。竞争的结果是产生了生物个体生长发育上的差异^[1]。对林木间竞争规律的研究,有助于了解森林的发育和演替过程,预测森林演替的动向,进而辅以必要的人工管理措施,以促进森林生态系统功能的完善和提高^[2]。当前,基于竞争关系的森林经营措施研究,已成为研究的重点^[3-17]。

评价林木竞争状况多采用竞争指数模型。这样的模型有数十种之多,可分为与距离有关和与距离无关 2 大类^[18-20]。与距离无关的模型有林木大小比、干高比等^[21],与距离有关的模型有树冠或影响圈重叠度^[22-24]、点密度指数、距离加权指数、潜在营养面积指数、生长空间^[19,22,25-30]等。

关于竞争指数模型的研究多数基于以下假设:竞争木的大小和远近与资源的分布成比例^[19]。竞争指数因此成为反映树木获取某种资源(水、营养物质、光等)的能力和状态。而竞争过程受众多因素的影响,如树种、林分发育阶段、树木自身获取资源的能力等。树木在生长过程中不断影响环境,限制其他树木对资源的获取,上层大树对中下层小树的压制逐步增强,这加剧了林分中林木的分化^[22,25-29]。

Hegyi^[31]于 1974 年提出采用竞争木与对象木的胸径比值与二者之间距离之比来评价竞争关系^[1,3-17,32-39]。但是,相同胸径的树木其冠幅差别往往很大,尤其是对针叶树和阔叶树而言,这种差异更为显著。而树冠的冠幅大小与树木获取某种资源的能力紧密相连,因此考虑树冠特征的竞争指数模型似乎更适合表达树木受到的竞争压力。因此,Bella 提出以对象木和竞争木的树冠投影重叠面积与对象木树冠投影面积之比,来评价对象木受到的竞争压力^[22],这种方法称为树冠重叠度法^[22-24]。

对于混交林而言,由于树种的生理特性不同,相同胸径的树木冠幅大小差异远超过纯林。为了探明考虑树冠特征的竞争指数模型是否更适合反映树木间的竞争关系,本试验以吉林省汪清林业局金沟岭林场近原始状态的针阔混交林为研究对象,以 1 个计算 Hegyi 竞争指数的模型和树冠重叠度法的 4 个变型作为竞争指数模型,探讨竞争指数与 5 年间隔期胸高断面面积生长量的相关性。

1 研究区概况

研究区为吉林省汪清林业局的金沟岭林场,地理坐标为东经 130°10',北纬 43°22'。地貌属低山丘

陵,海拔 300~1 200 m,坡度多在 5°~25°,少量在 35°以上。该区属季风型气候,全年平均气温 3.9℃左右,积温 2 144℃;1 月份气温最低,平均在-32℃左右;7 月份气温最高,平均在 22℃左右;年降水量 600~700 mm,且多集中在 7—8 月份;早霜从 9 月中旬开始,晚霜延至翌年 5 月末,生长期 120 d。根据 1981—1984 年汪清县土壤普查资料可知,该区属中低山灰化土灰棕壤区,母岩为玄武岩。土壤多为针叶林灰棕壤,沟谷是草甸土、泥炭土、沼泽土或冲积土,结构一般为黏壤土类,粒状结构,湿松,根系多,平均厚度在 40 cm 左右。

该区植被属长白山植物区系,立地条件较好,已知植物有 520 多种,结构复杂,部分区域还保持着原始植被。该区的森林是以红皮云杉、冷杉、紫椴和红松等为主的天然针阔叶混交过伐林。全区经营面积共 1.62 万 hm²,森林总蓄积 206 万 m³。现有森林主要是中龄林和幼龄林,近熟林和过熟林较少。占组成比重较高的树种主要有红皮云杉(*Picea koraiensis*)、冷杉(*Abies nephrolepi*)、红松(*Pinus koraiensis*)、枫桦(*Betula costata*)、紫椴(*Tilia amurensis*)等,其他还有色木(*Acer mono*)、榆树(*Ulmus pumila*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄菠萝(*Phellodendron amurense*)、白桦(*Betula platyphylla*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)等,这些树种所占比例较小。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究使用的数据资料来源于金沟岭林场原始林 20 号样地。该样地林型属于近原始状态的针阔混交林。样地于 1993-06 设置,大小为 40 m×50 m,海拔 700 m,坡向南,坡度 10°,郁闭度 0.9。对样地内胸径(DBH)≥5 cm 的所有树木都进行编号,每 2 年复测 1 次,调查并记录每木的树种、胸径、树高、东西南北 4 个方向的冠幅、第 1 活枝以下高度及生长状态。最初设置样地的目的是为了监测林分蓄积生长率等指标。本研究使用数据是 2008-08 的复测数据。除进行常规调查外,还使用全站仪对样地中所有胸径≥5 cm 的样木进行定位,获取样木的位置信息。

2.2 数据分析方法

将全部调查数据输入电脑,在 MS Access 2000 中建立数据库。将样木坐标数据导入 ArcGIS 9.1

中形成树木空间分布的点状图层(Point),样地四角坐标构成矩形区域(Polygon),形成面状图层。树冠形状取正圆型,以树冠向东、西、南、北 4 个方向伸展的长度的平均值作为树冠圆半径。本研究仅从单株木的角度进行竞争关系分析,未考虑群体间的竞争效应。

2.2.1 边缘矫正 处在样地边缘的对象木,其竞争木可能位于样地之外,为了消除此影响,必须进行边缘矫正。边缘矫正的方法是在样地的上、下、左、右、左上、左下、右上、右下 8 个邻域平移原样地,形成 9 个区域组成的大样地^[23],9 个区域从左到右、从上到下依次编号为 1~9。

2.2.2 竞争木的确定 将编号为 5 的中心样地内的树木作为对象木,其余 8 个样地的树木作为竞争木。

2.2.3 树冠投影重叠区域的确定 在确定竞争木时需要以对象木为圆心,设定搜索半径,位于搜索半径范围内的个体作为该对象木的竞争木。搜索方法分为固定搜索半径^[12-13,16-17,24,32-33,39-40]和可变搜索半径 2 种方法^[22],可变搜索半径方法优于固定搜索半径^[22]。因此,本研究采用可变搜索半径法确定竞争木。

树冠投影形状取正圆形。以东、西、南、北 4 个方向冠长的平均值作为树冠投影圆的半径。与某一对象木树冠投影有交错重叠的个体作为该对象木的竞争木,即 2 个个体之间距离小于两者树冠半径之和时二者存在竞争关系,二者树冠半径之和即为搜索圆半径,可以看出搜索半径是可变的。

利用 ArcGIS 9.1 的叠置分析(Overlay)功能,在样木分布及树冠轮廓图上提取树冠重叠区域,自动记录重叠区域内具有重叠关系的对象木和竞争木编号。

2.2.4 竞争指数的计算 结合该样地调查数据提供的信息,选用 5 个竞争指数模型计算竞争指数,分别命名为 H_1、B_1、B_2、B_3 和 B_4,其中模型 H_1 计算出的是 Hegyi 竞争指数,其余模型计算出的是 Bella 竞争指数及其变型。各模型的竞争指数计算公式如下:

$$\begin{aligned} H_1:CI_i &= \sum_{j=1}^n \frac{D_{i,j}}{D_i \cdot dis_{i,j}}, \\ B_1:CI_i &= \sum_{j=1}^n \frac{a_{i,j}}{A_i}, \\ B_2:CI_i &= \sum_{j=1}^n \frac{a_{i,j} \cdot D_{i,j}}{A_i \cdot D_i}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_3:CI_i &= \sum_{j=1}^n \frac{a_{i,j} \cdot H_{i,j}}{A_i \cdot H_i}, \\ B_4:CI_i &= \sum_{j=1}^n \frac{a_{i,j} \cdot D_{i,j} \cdot H_{i,j}}{A_i \cdot D_i \cdot H_i}. \end{aligned}$$

式中:CI_{*i*}为对象木*i*的竞争指数,D_{*i,j*}为竞争木*j*的胸径,D_{*i*}为对象木*i*的胸径,dis_{*i,j*}为竞争木*D_{i,j}*与对象木*D_i*之间的距离,a_{*i,j*}为对象木*i*和竞争木*j*的投影重叠面积,A_{*i*}为对象木*i*的树冠投影面积,H_{*i,j*}为竞争木*j*的树高,H_{*i*}为对象木*i*的树高。

3 结果与分析

3.1 样地内树种的组成

该样地共有 136 株样木,林分蓄积量 95 m³,胸高断面积 9.21 m²,主要树种有红皮云杉、冷杉、紫椴和红松,这 4 个树种的胸高断面积之和占样地总断面积的 80%以上,因此将这 4 个树种作为考察对象。其余还有色木、枫桦、水曲柳、杨树和其他杂木。株数最多的是红皮云杉,达到 32 株。胸高断面积比重最高的是紫椴,占 45%。胸径最大的树种是紫椴,其胸径最大值达到 100.1 cm(表 1),估测其年龄超过 300 年。表明这一林分是由多树种、多世代组成的异龄混交林^[41]。

3.2 样地内样木的位置及树冠半径

由表 1 和图 1 可知,树冠半径最大的树种是紫椴,其最大树冠半径达到 8.9 m;树冠半径最小值出现于红皮云杉,仅有 0.5 m;最大树冠半径约是最小树冠半径的 18 倍。就树冠半径平均值而言,4 个主要树种从大到小排序为紫椴>冷杉>红松>红皮云杉,表明阔叶树的平均树冠半径大于针叶树。

3.3 进行边缘校正后的样地和样木

对样地进行边缘校正后,9 个区域共有 1 224 (136×9)株样木。将中心样地 5 中的树木作为对象木,其余 8 个样地的树木仅作为竞争木参与计算(图 2)。

3.4 基于 5 个竞争指数模型计算的 4 个树种竞争指数的基本统计指标

图 3 反映了样地内各株样木的树冠投影重叠状况。由于考察的是树木的树冠垂直投影,因此树木的立体结构无法在此体现,在投影图上看到的某一个重叠区域,可能是多组对象木和竞争木共用的区域,在计算竞争指数时,将根据其隶属关系分别对对象木进行计算。

表 1 样地内样木的胸径和树冠半径的统计结果
Table 1 DBH and crown radius of the sample trees

树种代码 Species code	株数 Stem number		胸高断面积 Basal area at breath height		胸径/cm DBH			树冠半径/m Crown radius		
	测定值 Value	比例/% Percentage	测定值/m ² Value	比例/% Percentage	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Average	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Average
A	32	23.5	0.972	10.6	6.4	64.0	15.3	0.5	4.6	2.1
B	26	19.1	1.938	21.0	5.9	58.4	30.9	1.2	4.9	2.8
C	21	15.4	4.127	44.8	7.0	100.1	40.1	1.8	8.9	4.1
D	19	14.0	0.794	8.6	5.8	43.0	19.6	1.2	3.8	2.5
E	6	4.4	0.463	5.0	24.5	40.4	30.8	1.5	4.3	2.9
F	5	3.7	0.275	3.0	10.1	31.0	25.3	2.4	3.8	3.1
G	4	2.9	0.299	3.3	9.7	44.8	28.2	2.5	4.7	3.8
H	2	1.5	0.041	0.4	12.8	19.0	15.9	1.3	2.2	1.7
I	21	15.4	0.300	3.3	8.0	25.4	13.8	1.2	6.5	2.9
合计 Total	136	100.0	9.212	100.0						

注:A. 红皮云杉;B. 冷杉;C. 紫椴;D. 红松;E. 色木;F. 枫桦;G. 水曲柳;H. 榆树;I. 杂木。杂木是由数量较少的几个树种组成,仅作为竞争木参与计算,不作为对象木。下同。

Note: A. *Picea koraiensis*; B. *Abies nephrolepi*; C. *Tilia amurensis*; D. *Pinus koraiensis*; E. *Acer mono*; F. *Betula costata*; G. *Fraxinus mandshurica*; H. *Ulmus pumila*; I. Other species. I was composed of the minority of tree species and only included in models as competitors. The same below.

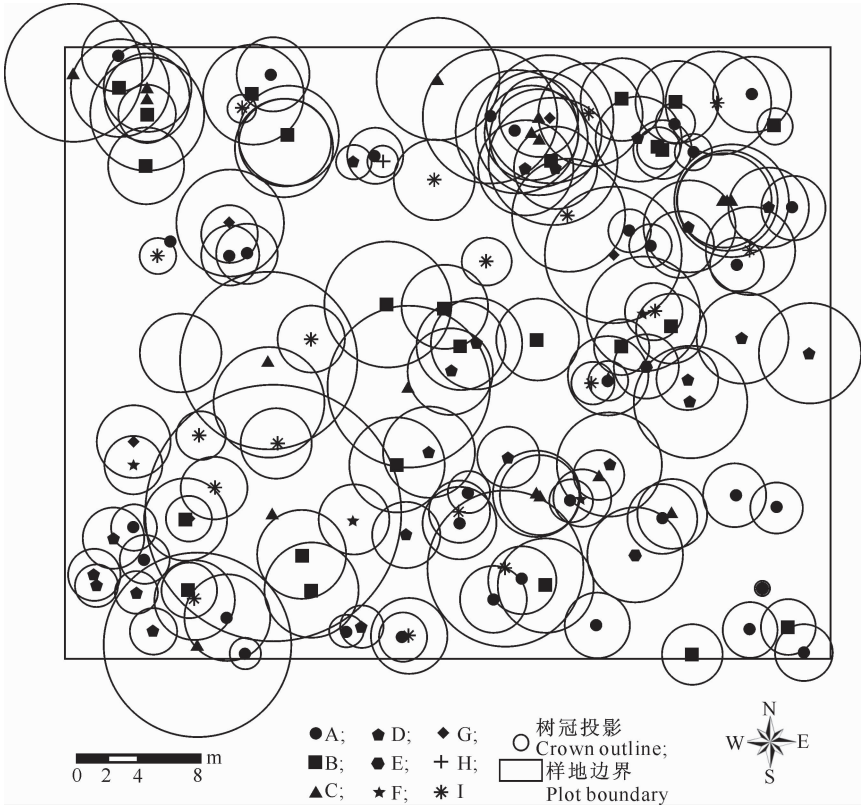


图 1 样地内样木的位置及树冠投影

Fig. 1 Location and crown projections of sample trees

采用 5 种竞争指数模型时,不同树种对象木竞争指数的基本统计指标见表 2。总体而言,采用同一竞争指数模型,各树种最大竞争指数的差异较大,最大达到 8 倍;最小竞争指数差异较小,在 6 倍以内;竞争指数平均值差异在 3 倍以内。对不同竞争指数模型进行比较,以模型 B_1 确定的竞争指数在各树种间的差异最小,在 2 倍以内。

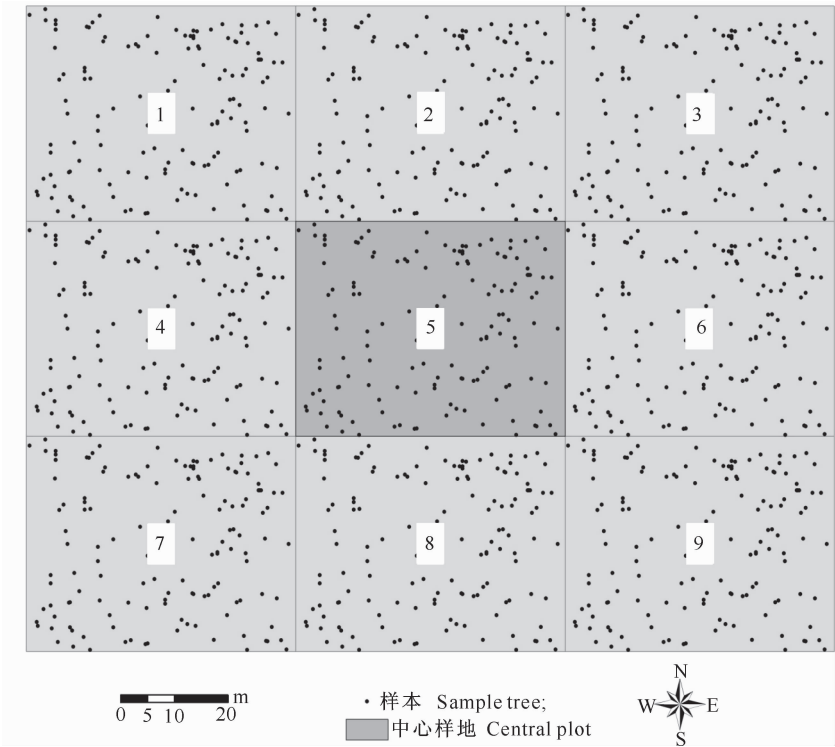


图 2 经边缘校正后的样地和样木
Fig. 2 Plots and sample trees with edge correction

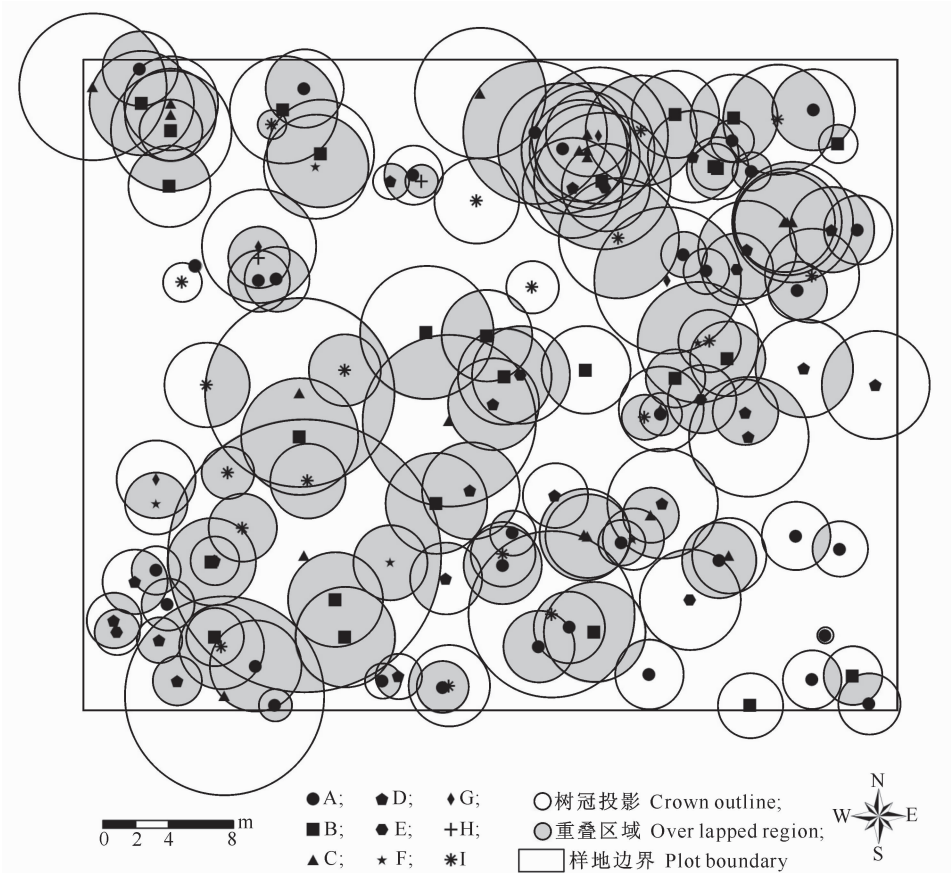


图 3 样地内各株样木树冠投影重叠区域的分布
Fig. 3 Overlapped area distribution of the crown projections for sample trees

表 2 基于 5 个竞争指数模型对 4 个树种竞争指数的计算结果

Table 2 Results of competition index for the four species based on the five competition models

模型 Models	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>			冷杉 <i>Abies nephrolepi</i>			紫椴 <i>Tilia amurensis</i>			红松 <i>Pinus koraiensis</i>		
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average
H_1	11.72	0.31	4.40	10.21	0.16	2.78	84.67	0.46	10.32	18.79	0.17	3.66
B_1	5.42	0.13	1.75	5.03	0.25	1.74	5.66	0.16	1.44	7.23	0.61	2.73
B_2	10.12	0.15	3.83	26.67	0.28	3.54	27.79	0.41	4.75	14.48	0.12	3.17
B_3	13.22	0.15	3.53	11.85	0.26	2.15	8.85	0.67	2.83	7.40	0.11	2.22
B_4	56.66	0.08	10.90	134.55	0.29	9.89	56.02	0.29	10.63	53.52	0.09	9.71

3.5 竞争指数与对象木胸高断面面积生长量的关系

在林分生长和收获预估体系中,林分断面积既是预估材积收获的重要变量,也是被估计的主要因子^[42-43]。竞争指数反映了树木在生长过程中受压制和胁迫的程度。研究胸高断面面积生长量与竞争指数之间的关系,可以为准确地预测树木断面面积生长量提供依据。经对多种数学模型比较,选用逆曲线模型来表达胸高断面面积生长量(胸高断面面积生长量

的对数形式)与竞争指数的关系:

$$\ln(BAI+1)=\frac{a}{CI}。$$

式中:BAI 为对象木 5 年间隔期的胸高断面面积生长量, a 为模型参数,CI 为竞争指数。

5 种竞争指数与胸高断面面积生长量之间的关系见表 3。

表 3 基于 5 个竞争指数模型计算所得竞争指数与 4 个树种胸高断面面积生长量之间的相关性评价

Table 3 Relevant indicators for the competition index based on the 5 competition models and the basal area increment of the four tree species

模型 Models	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>			冷杉 <i>Abies nephrolepi</i>			紫椴 <i>Tilia amurensis</i>			红松 <i>Pinus koraiensis</i>		
	R^2	P	a	R^2	P	a	R^2	P	a	R^2	P	a
H_1	0.290	0.026	1.032	0.482	<0.001	1.522	0.581	<0.001	3.159	0.447	<0.001	1.361
B_1	0.170	0.100	0.245	0.517	<0.001	1.937	0.694	<0.001	3.995	0.597	<0.001	1.208
B_2	0.191	0.079	0.328	0.566	<0.001	2.167	0.645	<0.001	2.365	0.476	0.001	0.947
B_3	0.211	0.064	0.337	0.588	<0.001	2.043	0.692	<0.001	3.228	0.491	<0.001	0.888
B_4	0.053	0.206	0.109	0.557	<0.001	2.135	0.558	<0.001	2.223	0.350	0.005	0.696

由表 3 可知,采用模型 H_1 时,紫椴的胸高断面面积生长量与竞争指数的相关性最强,决定系数(R^2)为 0.581,其余依次为冷杉(0.482)、红松(0.447)和红皮云杉(0.290);采用模型 B_1 时,紫椴的 R^2 有所提高,达到 0.694,其余依次为红松(0.597)、冷杉(0.517)和红皮云杉(0.170);采用模型 B_2 时,紫椴的 R^2 为 0.645,其余依次为冷杉(0.566)、红松(0.476)和红皮云杉(0.191);采用模型 B_3 时,紫椴的 R^2 为 0.692,其余依次为冷杉(0.588)、红松(0.491)和红皮云杉(0.211);采用模型 B_4 时,紫椴的 R^2 为 0.558,其余依次为冷杉(0.557)、红松(0.350)和红皮云杉(0.053)。可见,不管采用何种竞争指数模型,紫椴的 R^2 都是最高的,变动于 0.558~0.694;相关关系最不显著的是红皮云杉, R^2 变动于 0.053~0.290,除模型 H_1 外,其余模型相关性均未达显著水平($P\geqslant 0.05$)。

对于冷杉、紫椴和红松而言,除红松的 B_4 模型外,其余模型所得竞争指数与树种胸高断面面积生长量均表现出极显著的相关性($P\leqslant 0.001$);对紫椴

和红松而言,模型 B_1 的 R^2 最高,适用于表达胸高断面面积生长量与竞争指数的关系;但对于红皮云杉和冷杉,则并非如此。因此,试图从 5 个竞争指数模型中选择 1 个模型来表达 4 个树种的胸高断面面积生长量并不现实。

4 讨论

树木间的竞争过程受到众多因素的影响,如树种自身的生物学特性、林分发育阶段、树木获取资源的能力等。由于天然针阔混交林是多物种、多世代共生的生态系统,其结构复杂、功能多样,是当今生态学和林学研究的重点领域。本试验选用 5 种竞争指数模型来研究针阔混交林中树木间的竞争关系,发现不同模型能够解释胸高断面面积生长量的比例不同,而且各模型的 R^2 在不同树种间的变化趋势也不一致,模型中增加树冠因子后并不能更准确地反映树木间的竞争关系。这说明,试图采用单一竞争指数模型来反映针阔混交林的竞争关系难以获得理想结果,还需要开展更为深入和广泛的研究,比如增加模型中自变量的数量,将环境因子(光照强度、环境

温度、湿度)以及树种的生物学特性等包含进来等。从树木的生长过程和机理角度来研究林木间的关系,将是未来研究的一个重要方向^[42]。

[参考文献]

- [1] 张思玉,郑世群. 笔架山常绿阔叶林优势种群种内种间竞争的数量研究 [J]. 林业科学, 2001, 37(S1): 185-188.
Zhang S Y, Zheng S Q. Quantitive study on intraspecific and interspecific competition for dominant population of evergreen broad-leaved forest in Bijia mountain [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(S1): 185-188. (in Chinese)
- [2] 金则新, 张文标. 濒危植物七子花种内与种间竞争的数量关系 [J]. 植物研究, 2004, 24(1): 53-58.
Jin Z X, Zhang W B. The quantitative relation of intraspecific and interspecific competition in endangered plant *Heptacodium miconioides* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2004, 24(1): 53-58. (in Chinese)
- [3] 金则新, 朱小燕, 林恒琴. 浙江天台山甜槠种内与种间竞争研究 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 22-25.
Jin Z X, Zhu X Y, Lin H Q. Intraspecific and interspecific competition in *Castanopsis eyrei* in Tiantai Mountain of Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(2): 22-25. (in Chinese)
- [4] 李先琨, 苏宗明, 欧祖兰, 等. 元宝山冷杉群落种内与种间竞争的数量关系 [J]. 植物资源与环境学报, 2002, 11(1): 20-24.
Li X K, Su Z M, Ou Z L, et al. On intraspecific and interspecific competition among *Abies yuanbaoshanensis* community [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2002, 11(1): 20-24. (in Chinese)
- [5] 张 谧, 韩 烁, 李钧涛, 等. 雾灵山自然保护区油松、白桦及山杨天然林竞争关系研究 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 184-186.
Zhang M, Han S, Li J T, et al. Study on competition relationship on *Pinus tabulaeformis*, *Betula platyphylla* and *Populus davidiana* natural forest in Wuling Mountain Nature Reserve [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2007, 43(2): 184-186. (in Chinese)
- [6] 江 挺, 汤孟平. 天目山常绿阔叶林优势种群竞争的数量关系 [J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(4): 444-450.
Jiang T, Tang M P. Quantitative relationships with competition of dominant tree populations in an evergreen broad-leaved forest on mount Tianmu [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(4): 444-450. (in Chinese)
- [7] 韩 路, 王海珍, 周正立, 等. 塔里木河流域灰叶胡杨种内竞争研究 [J]. 塔里木大学学报, 2006, 18(2): 1-4.
Han L, Wang H Z, Zhou Z L, et al. Study on intraspecific competition in *Populus pruinosa* schrenk forest in Tarim River Basin [J]. Journal of Tarim University, 2006, 18(2): 1-4. (in Chinese)
- [8] 何跃军, 刘济明, 钟章成, 等. 桫欏群落的种内种间竞争研究 [J]. 西南农业大学学报, 2004, 26(5): 589-593.
He Y J, Liu J M, Zhong Z C, et al. Intraspecific and interspecific competition in *Alsophila spinulosa* community [J]. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science, 2004, 26(5): 589-593. (in Chinese)
- [9] 封 磊, 洪 伟, 吴承祯, 等. 杉木-观光木人工混交林种内和种间竞争研究 [J]. 西北植物学报, 2008, 28(1): 141-146.
Feng L, Hong W, Wu C Z, et al. Intraspecific and interspecific competition in *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum* mixed artificial forest [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 28(1): 141-146. (in Chinese)
- [10] 詹步清. 乳源木莲混交林种内及种间竞争研究 [J]. 福建林学院学报, 2002, 22(3): 274-277.
Zhan B Q. Study on the inner-species competition and inter-species competition in mixed forest of *Manglietia yuyuanensis* [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2002, 22(3): 274-277. (in Chinese)
- [11] 林勇明, 崔 鹏, 葛永刚, 等. 泥石流频发区人工恢复新银合欢林种内竞争: 以云南东川蒋家沟流域为例 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 13-17.
Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. Intraspecific competition of *Leucaena leucocephala* plantation in the area of high frequency debris flow: Taking the Jiangjiagou Gully as an example [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(3): 13-17. (in Chinese)
- [12] 喻 泓, 杨晓晖, 慈龙骏. 内蒙古呼伦贝尔沙地不同樟子松林竞争强度的比较 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 250-255.
Yu H, Yang X H, Ci L J, et al. Competition intensity of *Mongolian* pine forests in Huun Buir sand region of Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 250-255. (in Chinese)
- [13] 张小翠, 满自红, 张育德, 等. 连城国家级自然保护区青杆种内种间竞争关系研究 [J]. 生态科学, 2008, 27(4): 197-201.
Zhang X C, Man Z H, Zhang Y D, et al. Study on intraspecific and interspecific competition of *Picea wilsonii* in Liancheng National Nature Reserve [J]. Ecological Science, 2008, 27(4): 197-201. (in Chinese)
- [14] 邹春静, 韩士杰, 张军辉. 阔叶红松林树种间竞争关系及其营林意义 [J]. 生态学杂志, 2001, 20(4): 35-38.
Zou C J, Han S J, Zhang J H. Competition relationship among tree species broad-leaved korean pine mixed forest and its significance for managing the forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(4): 35-38. (in Chinese)
- [15] 方 坚, 王孝安, 郭 华, 等. 黄土高原马栏林区辽东栎林种内、种间竞争研究 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 334-339.
Fang J, Wang X A, Guo H, et al. Intraspecific and interspecific competition of *Quercus liaotungensis* in Malan forest region of Loess Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(2): 334-339. (in Chinese)
- [16] 张 池, 黄忠良, 李 炯, 等. 黄果厚壳桂种内与种间竞争的数量关系 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 22-26.
Zhang C, Huang Z L, Li J, et al. Quantitative relationships of intra-and interspecific competition in *Cryptocarya concinna* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(1): 22-26.

- (in Chinese)
- [17] 康华靖,陈子林,刘 鹏,等. 大盘山香果树 (*Emmenopterys henryi*) 种内及其与常见伴生种之间的竞争关系 [J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3456-3463.
- Kang H J, Chen Z L, Liu P, et al. Intra-specific competition of *Emmenopterys henryi* and its accompanying species in the Dapanshan National Nature Reserve of Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3456-3463. (in Chinese)
- [18] Biging G S, Dobbertin M. Evaluation of competition indices in individual tree growth models [J]. Forest Science, 1995, 41(2): 360-377.
- [19] Gea-Izquierdo G, Canellas I. Analysis of Holm oak intraspecific competition using gamma regression [J]. Forest Science, 2009, 55(4): 310-322.
- [20] 关毓秀, 张守攻. 竞争指标的分类与评价 [J]. 北京林业大学学报, 1992, 14(4): 1-8.
- Guan Y X, Zhang S G. A classification and comparison of competition indices [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1992, 14(4): 1-8. (in Chinese)
- [21] 黄家荣. 马尾松人工林单木竞争指标及生长模型研究 [J]. 林业科技, 2001, 26(3): 1-4.
- Huang J R. Study on competition index and growing models of individual tree in *Pinus massoniana* plantations [J]. Forestry Science & Technology, 2001, 26(3): 1-4. (in Chinese)
- [22] Nienaber G W. Stand and tree dynamics in uneven-aged interior Douglas-fir stands [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1999.
- [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 M P, Chen 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)
- [24] 侯向阳, 韩进轩, 阳含熙. 长白山红松阔叶林林冠木竞争生长及林冠空隙动态研究 [J]. 生态学报, 2000, 20(1): 68-72.
- Hou X Y, Han J X, Yang H X. The growth of canopy trees and gap dynamics of the Korean-pine forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 68-72. (in Chinese)
- [25] Hanus M L. Modelling light competition of forests of western Oregon [D]. Oregon: Oregon State University, 2003.
- [26] Papaik M J. Modeling disturbance and competition in temperate forests of northeastern North America [D]. Boston: University of Massachusetts Amherst, 2005.
- [27] Shi H. Local analysis and modeling of tree competition and growth [D]. New York: State University of New York College of Environmental Science and Forestry, 2003.
- [28] Kassim A R. Growing stock assessment and growth prediction system for managed hill dipterocarp forest of peninsular Malaysia [D]. Oregon: Oregon State University, 2002.
- [29] Shi H, Zhang L J. Local analysis of tree competition and growth [J]. Forest Science, 2003, 49(6): 938-955.
- [30] 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 [J]. 生态科学, 2006, 25(5): 385-389.
- Ma L Y, Wang X Q. Growth space competition index (GSCI) and application in the individual intraspecific competition of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* forests [J]. Ecologic Science, 2006, 25(5): 385-389. (in Chinese)
- [31] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands [M]//Fries J. Growth models for tree and stand simulation. Stockholm, Sweden: Royal College of Forestry, 1974: 74-90.
- [32] 李 尤, 苏智先, 张素兰, 等. 珙桐群落种内与种间竞争研究 [J]. 云南植物研究, 2006, 28(6): 625-630.
- Li Y, Su Z X, Zhang S L, et al. Intraspecific and interspecific competition in *Davidia involucrata* (*Davidiaceae*) community [J]. Acta Botanica Yunnanica, 2006, 28(6): 625-630. (in Chinese)
- [33] 毛 磊, 杨丹青, 王冬梅, 等. 红花岗基自然保护区天然樟子松林种内种间竞争分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(2): 9-14.
- Mao L, Yang D Q, Wang D M, et al. Analyses of intraspecific and interspecific competition of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest in Honghuaerji Nature Reserve of Inner Mongolia [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2008, 17(2): 9-14. (in Chinese)
- [34] 谢春平, 伊贤贵, 王贤荣. 福建武夷山野生早樱群落优势种群种间竞争 [J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(6): 718-722.
- Xie C P, Yi X G, Wang X R. Interspecies competition among dominant populations of *Cerasus subhirtella* var. *ascendens* community in Mount Wuyi of Fujian [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(6): 718-722. (in Chinese)
- [35] 胡 刚, 梁士楚, 张忠华, 等. 桂林岩溶石山青冈栎种内与种间竞争的数量关系 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 32-36.
- Hu G, Liang S C, Zhang Z H, et al. Quantitative relationships of intraspecific and interspecific competition in *Cyclobalanopsis glauca* in Karst Hills in Guilin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(5): 32-36. (in Chinese)
- [36] 封 磊, 洪 伟, 吴承祯, 等. 杉木-拟赤杨人工混交林种内、种间竞争强度研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(1): 371-373.
- Feng L, Hong W, Wu C Z, et al. Intraspecific and interspecific competition in *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum* mixed artificial forest [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2004, 12(1): 371-373. (in Chinese)
- [37] 段仁燕, 王孝安. 太白红杉种内和种间竞争研究 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 242-250.
- Duan R Y, Wang X A. Intraspecific and interspecific competition in *Larix chinensis* [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(2): 242-250. (in Chinese)
- [38] 廖宝文, 李 玫, 郑松发, 等. 外来种无瓣海桑种内、种间竞争关系研究 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(4): 418-422.
- Liao B W, Li M, Zheng S F, et al. Study on intraspecific and interspecific competition in exotic species *Sonneratia apetala* [J]. Forest Research, 2003, 16(4): 418-422. (in Chinese)