

DOI: 10.5846/stxb201406131227

仇建习, 汤孟平, 娄明华, 沈利芬, 庞春梅, 邹亦巧. 基于 Hegyi 改进模型的毛竹林空间结构竞争动态分析. 生态学报, 2016, 36(4): - .

Qiu J X, Tang M P, Lou M H, Shen L F, Pang C M, Zou Y Q. Analysis of the spatial structure and competition with a *Phyllostachys edulis* stand based on an improved Hegyi model. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

基于 Hegyi 改进模型的毛竹林空间结构竞争动态分析

仇建习^{1,3}, 汤孟平^{1,2,*}, 娄明华¹, 沈利芬¹, 庞春梅⁴, 邹亦巧⁵

1 浙江农林大学环境与资源学院, 临安 311300

2 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300

3 莲都区林业局, 丽水 323000

4 天目山国家级自然保护区管理局, 临安 311300

5 天台县林业特产局, 台州 318000

摘要:以浙江省天目山国家级自然保护区内少受干扰的毛竹林为研究对象, 设置 100m×100m 的固定标准地, 进行连续 5 年的每竹调查, 用全站仪精确测定每竹坐标(X, Y, Z)。提出新的竞争指数——竞争势(CP)。利用 CP 对 2009–2013 年毛竹林分竞争动态进行定量分析, 并分别研究各年份毛竹林竞争强度与对象竹胸径、年龄之间的动态关系。结果表明: 毛竹大小年现象明显, 毛竹大年(2010、2012)的林分竞争强度明显大于小年(2009、2011、2013), 且大小年之间竞争强度存在显著性差异($P < 0.01$), 毛竹大年之间林分竞争强度无显著性差异($P > 0.05$), 毛竹小年(2011、2013)之间林分竞争强度无显著性差异($P > 0.05$), 2009 年毛竹林受雪灾和新竹株数影响, 与其它年份林分竞争强度存在显著性差异($P < 0.01$); 毛竹林竞争强度随对象竹径阶的增大而减小, 且服从幂函数关系; 毛竹林竞争强度随对象竹龄级的增大而增大, 且服从线性函数关系。 CP 在 Hegyi 模型的基础上, 增加考虑毛竹生理特性, 使对毛竹竞争关系的分析有了进一步拓展, 从而更加全面有效地描述毛竹林分的竞争关系, 应用 CP 分析毛竹林竞争动态规律, 可为毛竹林经营提供参考依据。

关键词: 动态; 竞争势; 年龄隔离度; 毛竹林

Analysis of the spatial structure and competition with a *Phyllostachys edulis* stand based on an improved Hegyi model

QIU Jianxi^{1,3}, TANG Mengping^{1,2,*}, LOU Minghua¹, SHEN Lifan¹, PANG Chunmei⁴, ZOU Yiqiao⁵

1 School of Environment and Resource, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Linan 311300, China

2 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Linan 311300, China

3 Liandu District Bureau of forestry, Lishui 323000, China

4 Authority in National Nature Reserve of Tianmu Mountain, Linan 311300, China

5 Tiantai County Bureau of forestry specialty, Taizhou 318000, China

Abstract: At present, many individual tree competition indices are used to measure the competitive ability of trees, and they are generally divided into distance-independent indices and distance-dependent indices depending on whether one is considering the space between trees. Distance-dependent indices are commonly used, especially the Hegyi (1974) competition index (CH). The CH was used to analyze the spatial structure of a *Phyllostachys edulis* stand studied by Tang *et al.* (2011), but we found that this CH needs to be improved. *P. edulis* is a Bambusoideae (Gramineae) species and does not have secondary cambium tissue, resulting in the termination of diameter at breast height (DBH) growth after completion

基金项目:国家自然科学基金(31170595); 十二五国家科技支撑计划(2012BAD22B0503); 浙江省重点科技创新团队(2010R50030); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(20101561); 国家林业局造林司委托项目(SFA2130218-2)

收稿日期:2014-06-13; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: goodtmp@sohu.com

of the stem growth. Unfortunately, there are different competitive intensities associated with the spatial structure of *P. edulis* stands, even in situations where the same distance exists between object and competition bamboo plants. This means they might have the same DBH, but would be considered to be of a different age. Such distinctions cannot be provided by the existing *CH*. In fact, competition within a *P. edulis* stand is affected significantly by intensity of physiological activity, which changes with variation of the metabolic turnover and aging process of an individual, or with its material growth period. Material growth periods are divided into enhancement stages, stationary stages, and declining stages, depending on different intensity of physiological activities. In the light of characteristic of *P. edulis*, considering its metabolic turnover and aging process, and adding a material growth period factor, a new competition index—competition potential (*CP*), which is based on *CH* (the Hegyi model), was proposed to analyze the spatial structure of *P. edulis* stands.

A permanent plot measuring 100 m × 100 m, including a relatively lightly disturbed *P. edulis* stand, was established in the Tianmu Mountain National Nature Reserve, Zhejiang province. There have been five annual surveys of the plot. Each bamboo tree was tallied and its coordinates (*X*, *Y*, *Z*) were measured using a total station survey device. From 2009 to 2013, we used the new competition index, *CP*, to quantitatively analyze the dynamic competition within the bamboo stand, as well as to study the dynamic relationship between intensity competition and DBH, and the dynamic relationship between intensity competition and age class. The results showed that the *P. edulis* stand has clear on-year/off-year cycles and that the competitive intensity of on-years (2010, 2012) is obviously higher than that of off-years (2009, 2011, 2013). The difference in competitive intensity within the *P. edulis* stand between on-years and off-years was significant ($P < 0.01$). The difference in competitive intensity within the *P. edulis* stand between on-years was not significant ($P > 0.05$), as was the difference in competitive intensity between off-years (2011 and 2013; $P > 0.05$). Because of a snow disaster and the emergence of a number of new shoots, the competitive intensity within the *P. edulis* stand in 2009 showed significance difference ($P < 0.01$) from other years. The competitive intensity within the *P. edulis* stand decreased with increasing objective diameter class, and the results showed that the competition had a powerful relationship with DBH. The competitive intensity within the *P. edulis* stand increased with increasing age class and also had a significantly linear correlation with DBH.

A combination of the growth characteristics and adopted physiological characteristics of *P. edulis* was used to develop an expanded analysis of competition between individuals of *P. edulis*. This allowed us to develop a more comprehensive and effective model (*CP*) to describe competition within a *P. edulis* stand. The new *CP* is therefore a feasible and reliable way to analyze competition within *P. edulis* stands and their dynamic characteristics. For these reasons, it could provide a theoretical basis for management of artificial *P. edulis* stands.

Key Words: competition; dynamic; competition potential; age mingling; *Phyllostachys edulis* stand

在有限资源空间里,竞争无处不在。树木竞争意味着资源不足以供给 2 株及以上树木的最佳生长能力^[1]。学者们已提出多种衡量树木竞争能力大小的单木竞争指数^[2-9]。根据是否考虑距离因素,可分为 2 类:距离无关(distance-independent)竞争指数和距离相关(distance-dependent)竞争指数^[1,10]。距离无关竞争指数未考虑空间位置因素^[11-12]。通常用与距离有关的竞争指数定量描述树木竞争状况^[13]。竞争指数的选取应兼顾两个方面即理论上的合理性和实际中的可操作性^[14]。Hegyi 竞争指数^[4](以下简称 Hegyi 指数,用 *CH* 表示)容易测定、计算简单,是最常用的竞争指数^[15-16]。

汤孟平等^[16]已将 Hegyi 指数引入毛竹林的空间结构研究,但该指数的应用有待改进。采用 Hegyi 指数计算乔木林分竞争时,林木胸径作为反映林木竞争能力的主要参数,可以直接反映了林木竞争能力随年龄的动态变化。但是,毛竹(*Phyllostachys edulis*)属于禾本科竹亚科竹种,无次生形成层组织,胸径在毛竹秆形生长结束后停止增长。因此,毛竹的胸径是一个相对静态的结构因子,不能反映毛竹竞争能力的动态变化。为了说

明运用 Hegyi 指数分析毛竹林竞争的不足,建立 2 个典型的对象竹与其 4 株最近相邻竹的具有相同胸径和相等距离,但年龄不同的空间结构单元,使用 Hegyi 指数分别计算 2 个不同年龄结构下空间结构单元中对象竹的竞争强度。图 1 中,每个空间结构单元中间 1 株表示对象竹,周围 4 株表示竞争竹,不同的形状表示不同年龄毛竹,圆表示 9 年生毛竹,五边形表示 6 年生毛竹。假定毛竹的胸径均为 10cm,对象竹与竞争竹之间的距离均为 1m。采用 Hegyi 指数计算图 1 中 2 个不同年龄结构下空间结构单元的对象竹竞争强度为 $CH_A = CH_B = 4$,即对象竹所受的竞争压力相同。说明 Hegyi 指数不能区分在对象竹与竞争竹的距离相等和胸径相同的条件下,不同年龄结构下空间结构单元之间的竞争差异。因此,直接引用 Hegyi 指数分析毛竹竞争关系是不全面的,应对其进行改进。

事实上,毛竹年龄作为毛竹林的主要结构因子,是反映毛竹自身生理活动强度动态变化的重要指标,是影响毛竹竞争能力变化的重要因素。毛竹从出笋成竹、成长、壮大、衰落和死亡,各个时期的毛竹生理活动强度存在较大差异^[17],即吸收矿质元素和水分、制造和积累有机物质等生理活动的能力有强弱之分。依据不同年龄毛竹生理活动强度不同的特点,可将毛竹的材质生长周期分为 3 个阶段,即增进期、稳定期和下降期。3 个阶段的年龄范围分别为:2—5 年为增进期,6—8 年为稳定期,9 年以上为下降期^[17]。由于毛竹秆形生长结束即进入材质生长期,因此 1 年生也属于增进期。本文采用以上结论。

本研究在 Hegyi 指数基础上,根据毛竹的生物学特性,从毛竹的生长过程和机理角度来分析毛竹间的竞争关系,改进 Hegyi 指数,提出增加毛竹年龄的竞争分析指数——竞争势 (competition potential, CP),为毛竹林空间结构竞争分析提供了新的分析指标。

1 研究区概况

浙江天目山国家级自然保护区位于东经 119°23′47″—119°28′27″,北纬 30°18′30″—30°24′55″。地处东海之滨,浙江省西北部杭州市临安市境内的西天目山(图 2),距杭州市区 94km。保护区位于中亚热带北缘至北亚热带过渡地带,受海洋暖湿气候影响较深,雨量充沛,年平均相对湿度 71%—76%,年平均降水量 1390—1870mm,年平均气温 8.8—14.8℃,≥10℃年积温 2500—5100℃。植被垂直分布明显,自山麓到山顶垂直带谱为:海拔 870m 以下为常绿阔叶林;870—1100m 为常绿、落叶阔叶混交林;1100—1380m 为落叶阔叶林;1380—1506m 为落叶矮林。近自然毛竹林主要分布于海拔 350—900m,其林下植被稀少,主要有茶 (*Camellia sinensis*)、微毛柃 (*Eurya hebeclados*)、豹皮樟 (*Litsea coreana* var. *sinensis*)、毛花连蕊茶 (*Camellia fraterna*)、细叶青冈 (*Cyclobalanopsis gracilis*)、小叶青冈 (*Cyclobalanopsis myrsinifolia*)、马银花 (*Rhododendron ovatum*) 和短尾柯 (*Lithocarpus brevipendulus*) 等。

2 研究方法

2.1 样地调查

2009 年 7 月,在浙江省天目山国家级自然保护区中的禁伐区内选择少受干扰的毛竹纯林(无采伐、垦翻、

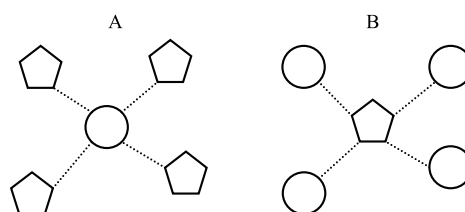


图 1 2 个不同的空间结构单元

Fig. 1 Two different spatial structure units



图 2 地理位置

Fig. 2 Location

施肥等经营活动),设置 1 个 100m×100m 的固定样地,样地中心海拔 840m,主坡向为南偏东 30°。利用南方全站仪 NTS355,将样地划分 100 个 10m×10m 的网格单元,在每个网格单元内,对所有毛竹用钢围尺测胸径和竹秆皮色法识别年龄,利用南方全站仪 NTS355 测定每竹的 3 维坐标(X, Y, Z)。以后每年进行 1 次复查,复查老竹的状态,并对新竹进行每竹调查及测定 3 维坐标。至 2013 年,已连续调查 5 次。

2.2 边缘校正

Stage and Ledermann^[11]和 Ledermann^[12]认为距离有关竞争指数不包括样地边缘木,因此必须进行边缘校正。采用距离缓冲区法进行校正,就是在原样地四条边界线的内侧设置带状缓冲区,中间核心区的林木均作为对象木参与林分信息的计算^[18]。本文设定缓冲区宽度为 5m,90m×90m 为中间核心区。

2.3 Hegyi 指数的改进

竞争势(CP)是在 Hegyi 指数(CH)基础上,增加考虑毛竹材质生长周期中各个阶段不同的生理活动强度。实际上,竞争势反映了对象竹所承受来自竞争竹的竞争压力。对某一对象竹而言,对象竹的材质生长期越晚,其取值越小,生理活动能力越弱,或对象竹的胸径越小,均导致竞争势越大,来自周围竞争竹的竞争压力越大,在竞争中越处于不利地位。计算公式如下:

$$CP_i = \sum_{j=1}^n \frac{a_j \cdot d_j}{a_i \cdot d_i \cdot L_{ij}} \quad (1)$$

$$CP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CP_i \quad (2)$$

式中: d_j 为竞争竹 j 胸径; d_i 为对象竹 i 胸径; L_{ij} 为对象竹与竞争竹之间的距离; n 为空间结构单元中竞争竹的株数; N 为样地内对象竹的株数; a_i 为对象竹的材质生长期,增进期 $a_i=3$,稳定期 $a_i=2$,下降期 $a_i=1$; a_j 为竞争竹的材质生长期,取值同对象竹; CP_i 为对象竹 i 的竞争势; CP 为林分竞争势。

竞争势可定义为立竹竞争强度与对象竹所对应材质生长期及胸径成反比,与竞争竹所对应材质生长期以及胸径成正比,且随对象竹与竞争竹之间距离增大而减小。利用公式(1)分析图 1 中 2 个不同的空间结构单元竞争强度,得 $CP_A=8$, $CP_B=2$,而 $CH_A=4$, $CH_B=4$,说明与 Hegyi 指数相比,竞争势可以有效区分不同年龄结构空间结构单元的竞争差异。

合理的空间结构单元有助于深入分析毛竹林空间结构动态。惠刚盈等^[19]指出由对象木与其 4 株最近相邻木可以构成最佳空间结构单元(简称“1+4”结构),汤孟平等^[20]认为对象竹周围有 4 株最近邻竹时,最有可能获得高产。因此,本文采用“1+4”结构即空间结构单元中最近邻竹株数即竞争竹株数 $n=4$ 。

3 结果与分析

3.1 毛竹林分生长因子动态变化

2009—2013 年毛竹主要生长因子动态变化表见 1。可见,毛竹林大小年现象较明显,毛竹大年(2010、2012)新竹株数远高于小年(2009、2011、2013)。2009 年,毛竹的总株数、断面积、平均胸径均最低,这是因为除 2009 年是毛竹小年的内在因素以外,2008 年雪灾造成大量毛竹死亡的环境因素^[21],综合导致 2009 年毛竹林分主要生长因子普遍较低。2010 年的新竹株数、总株数和断面积均为最高。毛竹年龄划分为龄级,即 1 周年毛竹为 1 龄级,2—3 年毛竹为 2 龄级,4—5 年毛竹为 3 龄级,以此类推。由表 2 可知,毛竹各龄级所占比例随年份发生动态变化。2009—2010 年毛竹林包含 8 个龄级,2011—2012 年为 9 个龄级,2013 年则为 10 个龄级,其中 2009—2011 年有 4 个龄级毛竹所占比例大于 10%,2012—2013 年则有 5 个龄级毛竹所占比例大于 10%,说明毛竹林龄级趋于多样化,龄级比例趋于均匀化。2009—2012 年中存在 9 龄级或 10 龄级毛竹比例为 0 的现象,原因可能在于老龄竹生活力较差、力学强度较低,雪灾进一步加剧了老龄竹的死亡。

表 1 2009—2013 年毛竹林分主要生长因子

Table 1 Main growth factors of bamboo stand from 2009 to 2013

年份 Year	新竹株数 New growth number	总株数 All number	断面积 Basal area/(m ² /hm ²)	胸径 Diameter at breast height/cm	
				均值 Mean value	标准差 Standard Deviation
2009	44	5488	51.484	10.8	1.58
2010	1304	6561	63.325	11.0	1.61
2011	4	5981	58.604	11.1	1.57
2012	763	6094	60.926	11.2	1.57
2013	4	5757	57.984	11.2	1.55

表 2 2009—2013 年毛竹各龄级分布概况

Table 2 The distribution of age class of bamboo stand from 2009 to 2013

年份 Year	龄级 Age class									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2009	0.8%	11.1%	14.4%	30.5%	3.6%	6.9%	32.5%	0.2%	0	0
2010	19.9%	9.6%	11.9%	24.2%	3.0%	5.6%	25.6%	0.2%	0	0
2011	0.1%	21.4%	9.5%	12.4%	24.3%	3.0%	5.6%	23.5%	0.2%	0
2012	12.5%	19.7%	9.5%	11.6%	20.6%	2.7%	4.9%	18.4%	0.1%	0
2013	0.1%	13.1%	20.6%	9.4%	11.8%	20.2%	2.6%	4.6%	17.5%	0.1%

3.2 林分竞争动态

利用竞争势(*CP*)分析 2009—2013 年 5 个调查年度的竹林竞争动态,并用 C#程序进行编程计算,绘制得到的毛竹林竞争强度随年份的动态变化图(图 3)。可见毛竹大年(2010、2012)的林分竞争强度明显大于小年(2009、2011、2013)。采用单因素方差分析方法检验(One-way ANOVA)各年份林分竞争强度的差异,结果表明,毛竹大年与小年之间的林分竞争强度存在极显著性差异($P<0.01$),毛竹大年之间林分竞争强度相差不大,方差检验结果表现为无显著性差异($P>0.05$),毛竹小年中 2011 与 2013 年的林分竞争强度同样无显著性差异($P>0.05$),但是,2009 年与其它年份的林分竞争强度均存在极显著性差异($P<0.01$)。该结果的原因在于,2008 年雪灾造成大量毛竹死亡,直接导致林分的竞争强度降低,且 2009 年是毛竹小年,对林分竞争强度的增强影响不大。因此,新竹和自然灾害(如雪灾)是导致毛竹林竞争强度变化的主要原因。

3.3 林分不同径阶、龄级竞争动态

对象竹个体的大小和年龄能反映其竞争能力^[17]。对象竹胸径按 2cm 径阶整化,年龄按龄级划分,分别绘制 2009—2013 年 5 个调查年度对象竹竞争强度与其对应径阶和对应龄级的关系图(图 4、图 5)。各年份毛竹林分竞争强度均呈现随对象竹径阶的增大而呈现逐渐减小的趋势,且各年份对象竹的竞争强度与径阶均服从幂函数关系,这个结果与采用 Hegyi 指数计算得到的乔木林竞争强度与胸径的关系基本一致^[22-24]。不同年份对象竹竞争强度与径阶之间的拟合决定系数 R^2 的值不同。4 径阶毛竹常年处于竞争强度较大的状态,主要原因在于其杆形弱小,受到周围竞争竹的竞争压力较大,在营养空间的竞争中处于绝对劣势。因此可根据这一特性,在竹林抚育过程中,对 4 径阶毛竹进行采伐,调节和改善立竹之间的竞争关系。

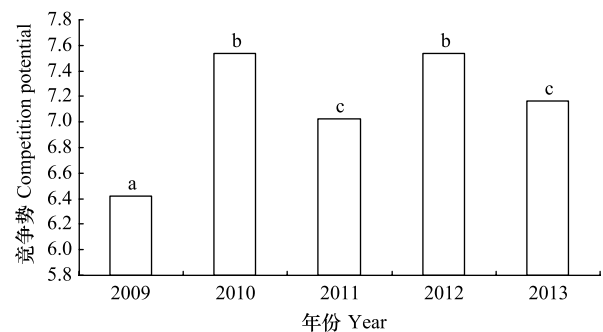


图 3 毛竹林竞争动态变化

Fig. 3 Dynamic of competition of bamboo stand

各年份不同小写字母表示存在极显著性差异($P<0.01$)

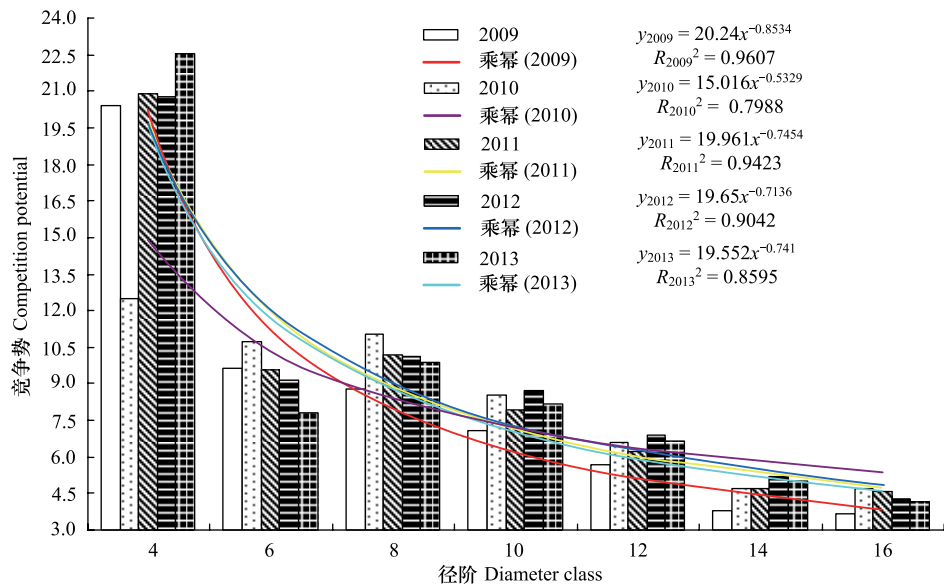


图4 2009—2013年毛竹林分各径阶的竞争势

Fig. 4 The competition potential of each diameter class of bamboo stand from 2009 to 2013

各年份毛竹林分竞争强度与对象竹龄级的关系呈现随龄级的增大而逐渐增大的趋势,且各年份对象竹的竞争强度与龄级均服从线性函数关系,各年份竞争强度与龄级之间的拟合决定系数 R^2 的值不同。5 龄级对象竹竞争强度随年份大致呈现逐渐下降的趋势,到 2013 年基本降低至各龄级对象竹竞争强度的平均水平,而 5 龄级以上对象竹的竞争强度常年处于较高状态,说明 5 龄级竹以上对象竹始终受周围相邻竹的竞争压力较大,在竞争中处于极度不利地位。这一结果可为毛竹林空间结构优化调控中将 5 龄级以上毛竹全部采伐的择伐方式提供参考依据^[25]。

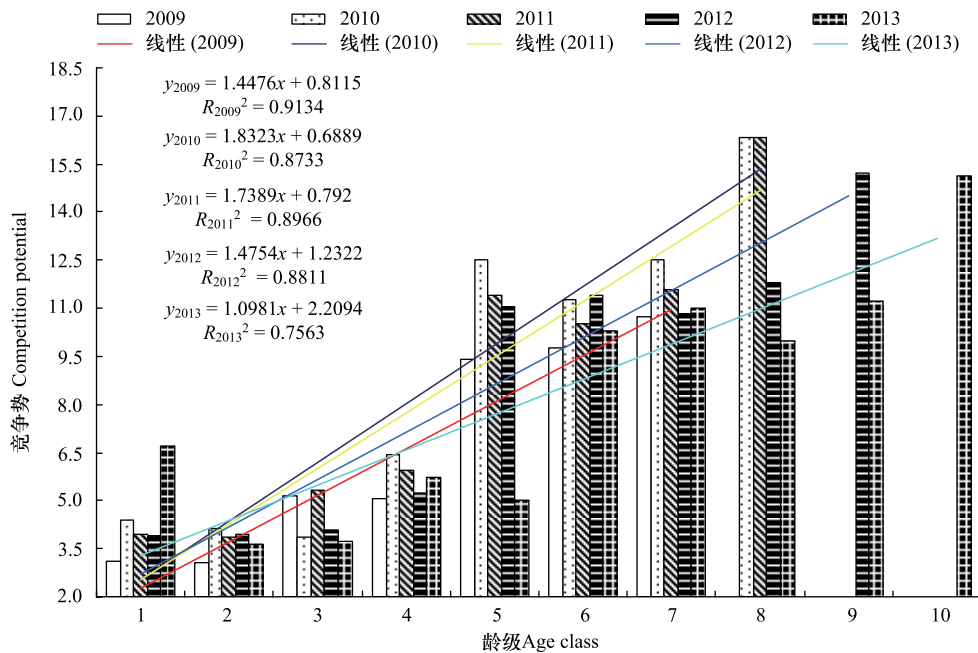


图5 2009—2013年毛竹林各龄级的竞争势

Fig. 5 The competition potential of each age class of bamboo stand from 2009 to 2013

4 结论与讨论

(1)毛竹大小年现象明显,毛竹大年新竹所占比例明显高于毛竹小年。2012—2013 年毛竹龄级数多于 2009—2011 年,且各龄级株数比例更加均匀。

(2)毛竹林竞争强度随年份发生动态变化,呈现出毛竹小年向大年过渡年份林分竞争强度增加,大年向小年过渡年份林分竞争强度减小的现象。毛竹小年的林分竞争强度明显弱于大年,大小年之间林分竞争强度存在极显著性差异($P < 0.01$)。毛竹大年之间的林分竞争强度无显著性差异($P > 0.05$),小年 2011 和 2013 之间的林分竞争强度无显著性差异($P > 0.05$),但 2009 年与其它年份的林分竞争强度均存在极显著性差异($P < 0.01$)。新竹株数和自然灾害是导致毛竹林分竞争强度变化的主要原因。

(3)采用竞争势计算得到的毛竹林竞争强度,可以有效全面地反映毛竹林竞争强度与立竹胸径及立竹年龄的密切关系。各年份毛竹林竞争强度均随着对象竹径阶的增大而减小,两者之间服从幂函数关系,这与学者们在研究乔木竞争时采用 Hegyi 指数得到的结论相同^[22-24]。各年份毛竹林竞争强度均随着年龄的增加而增加,两者之间服从线性关系。上述结论均符合竞争势所描述的对象竹竞争强度与对象竹径阶成反比,与对象竹年龄呈正比的特性,进而说明立竹胸径越大,并且年龄越小,在林分中所处的竞争位置越有利。

毛竹不同于树木,它是克隆植物,地上分离的竹子在地下是通过竹鞭相连的,而且相连的竹子间具有资源共享作用。因此,相邻竹子之间不仅有竞争关系,还有相互的生理整合影响。这两方面作用的结果可以通过毛竹个体的大小差异和生长状况反映。Hegyi 指数是一种简便易测的指标,它仅考虑了个体大小和立竹之间的距离,同时还从毛竹生长机理角度出发,根据不同年龄阶段毛竹生理活动强度的不同,增加了材质生长期因子,更深层次地反映立竹之间的竞争关系,是分析毛竹林竞争关系的较理想指标,可为毛竹林经营过程中优化调控竹林竞争关系提供一定的理论指导。

毛竹的生长包括竹笋地下生长、笋-幼竹生长和成竹生长三个阶段^[17,26],本文仅分析了毛竹林成竹生长阶段的竞争及其动态特征,关于地下生长阶段和笋-幼竹生长阶段的竞争及其动态有待深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Rivas J J C, González J G A, Aguirre O, Hernández F J. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico). *European Journal of Forest Research*, 2005, 124(2): 133-142.
- [2] Bella I E. A new competition model for individual trees. *Forest Science*, 1971, 17(3): 364-372.
- [3] Hegyi F. A simulation model for managing jack pine stands // Fries J. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974: 74-90.
- [4] Alemdag I S. Evaluation of Some Competition Indexes for the Prediction of Diameter Increment in Planted White Spruce. Ottawa: Forest Management Institute, 1978.
- [5] Wykoff W R, Crookston N L, Stage A R. User's Guide to the Stand Prognosis Model. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982.
- [6] Holmes M J, Reed D D. Competition indices for mixed species northern hardwoods. *Forest Science*, 1991, 37(5): 1338-1349.
- [7] Reineke L H. Perfecting a stand density index for even-aged forest. *Journal Agricultural Research*, 1993, 46(7): 627-638.
- [8] Rouvinen S, Kuuluvainen T. Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27(6): 890-902.
- [9] Schröder J, von Gadow K. Testing a new competition index for Maritime pine in northwestern Spain. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(2): 280-283.
- [10] Contreras M A, Affleck D, Chung W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(11): 1939-1949.
- [11] Stage A R, Ledermann T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(4): 890-898.
- [12] Ledermann T. Evaluating the performance of semi-distance-independent competition indices in predicting the basal area growth of individual trees.

Canadian Journal of Forest Research, 2010, 40(4): 796-805.

- [13] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势. 林业科学, 2010, 46(1): 117-122.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 汤孟平. 森林空间经营理论与实践. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [17] 江泽慧. 世界竹藤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [18] 周红敏, 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波. 林分空间结构分析中样地边界木的处理方法. 林业科学, 2009, 45(2): 1-5.
- [19] 惠刚盈, Gadow K V. 森林空间结构量化分析方法. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [20] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 邓英英, 赵明水. 天目山近自然毛竹林空间结构与生物量的关系. 林业科学, 2011, 47(8): 1-6.
- [21] 尹新华, 翁益明, 董云富, 傅红梅, 吴礼栋. 毛竹受雨雪冰冻危害的受损特点. 浙江林学院学报, 2008, 25(6): 823-827.
- [22] 邹春静, 徐文铎. 沙地云杉种内、种间竞争的研究. 植物生态学报, 1998, 22(3): 269-274.
- [23] 段仁燕, 王孝安. 太白红杉种内和种间竞争研究. 植物生态学报, 2005, 29(2): 242-250.
- [24] 史宇, 余新晓, 岳永杰, 王小平, 秦永胜, 陈俊崎. 北京山区天然侧柏林种内竞争研究. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 36-40.
- [25] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 娄明华, 仇建习, 庞春梅, 赵明水. 毛竹林空间结构优化调控模型. 林业科学, 2013, 49(1): 120-125.
- [26] 何奇江. 毛竹三笋栽培新技术. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2010.