

不同林龄、径级杉木人工林种内竞争规律

巢林¹, 洪滔^{1,2}, 李键^{1,2}, 陈灿^{1,2}, 洪伟^{1,2}, 吴承祯^{1,2,3}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 武夷学院 生态与环境学院, 福建 武夷山 354300)

摘要: 根据野外调查数据, 提出了不同林龄和径级与竞争强度之间差异性的假设, 运用 Hegyi 与距离有关的竞争指数模型进行分析, 并探讨林龄及径级与竞争强度之间的关系。结果表明: 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林种内平均竞争强度随着林龄的增加而逐渐减小, 在 10~25 a, 平均竞争强度减小趋势较为明显, 林龄大于 25 a 时, 平均竞争强度下降趋势平缓; 随着对象木径级的增加, 平均竞争强度不断降低, 当杉木径级在 20 cm 以内时, 竞争强度变化显著, 径级为 20 cm 以上时, 竞争强度变化很小; 平均竞争强度随林龄和径级增加而呈现的变化均可用指数函数表征 $I_C = ae^{-bx}$; 竞争强度与对象木胸径服从幂函数关系 $I_C = 73.761 3 D^{-0.978 3}$; 方差分析显示, 林龄和径级对平均竞争强度有极显著影响 ($P < 0.01$)。杉木人工林种内竞争强度与林龄和径级之间存在密切关系, 为科学有效地开展杉木人工林的经营和管理提供重要依据。图 3 表 2 参 36

关键词: 森林生态学; 杉木人工林; 林龄; 种内竞争; 竞争强度; 竞争指数

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2015)03-0353-08

Intraspecific competition in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different age and diameter classes

CHAO Lin¹, HONG Tao^{1,2}, LI Jian^{1,2}, CHEN Can^{1,2}, HONG Wei^{1,2}, WU Chengzhen^{1,2,3}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Fujian Forest Ecological System Process and Management, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. College of Ecology Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, Fujian, China)

Abstract: To test the hypothesis that stand age and diameter class in a *Cunninghamia lanceolata* plantation affected competition intensity, Hegyi's distance-dependent competition index model and analysis of variance (ANOVA) were used in the analysis for and discussion of the relationship between stand age, diameter class, and competition intensity. Results of the ANOVA demonstrated a highly significant effect ($P < 0.01$) of both stand age and diameter class on competition intensity. The average intraspecific competition intensity between 10 and 25 years decreased with increasing stand age, and after 25 years continued to decrease but at a decreasing rate. With an increase in diameter class from 0–20 cm, the average intraspecific competition intensity also decreased, but it exhibited little variation when larger than 20 cm. The exponential function $I_C = ae^{-bx}$ could be used to represent changes in competition intensity for stand age and diameter class with $I_C = 73.761 3 D^{-0.978 3}$. Thus, competition intensity was closely related to stand age and diameter class providing an important basis for scientifically and effectively carrying out the management of *Cunninghamia lanceolata* plantations. [Ch, 3 fig, 2 tab, 36 ref.]

收稿日期: 2014-09-27; 修回日期: 2014-11-21

基金项目: 福建省科技重大专项(2012NZ0001)

作者简介: 巢林, 从事数量森林经理研究。E-mail: fjchaolin@126.com。通信作者: 吴承祯, 教授, 博士, 从事森林经营学、森林生态学等研究。E-mail: fjwcz@126.com

Key words: forest ecology; *Cunninghamia lanceolata* plantation; stand age; intraspecific competition; competition intensity; competitive index

林木生长受周围诸多生物和非生物因素的制约^[1], 其中, 竞争是影响林木生长、林分结构及动态的重要因素^[2-3], 在物种的进化及形成、群落的演替过程中扮演着重要角色^[4], 也是生态学和森林培育学研究的核心问题之一^[5-7]。竞争是指生存于同一生境中的同种或不同种的2个或更多的有机体为争夺满足自身发展所必需的环境资源或能量而发生的相互关系^[8]。竞争是森林生态系统中普遍存在的现象^[9-10], 主要发生在邻近的林木之间, 包括地上部分对光资源和地下部分对土壤资源的竞争^[2,5-6,11]。林木间的竞争导致邻近个体损耗, 干扰邻体对有限的光、水和营养等资源的获得^[12], 不断扩大自身的生长空间, 增加对有限资源和空间的利用效率, 同时也加强了对邻体的影响范围和程度^[13-14]。竞争指数表征植物基株被剥夺资源利用权力的大小^[9], 在形式上是对林木个体生长与生存空间竞争关系的数学描述, 但其实质则反映了林木生长对环境资源的需求与现实生境下林木对环境资源占有量这一矛盾^[8,15]。竞争指数的应用已经成为世界各地森林经营管理的一个重要组成部分^[16]。因此, 开展有关林木间竞争规律的研究是进行森林生态系统经营与管理的基础, 对于了解群落的结构与功能, 预测群落的发展动态, 采取必要的人为干扰措施以促进森林生态系统结构与功能的完善等, 都具有十分重要的理论意义与实践价值^[6,17]。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国南方重要的用材林树种^[18-19], 具有很好的经济、生态和社会效益, 是其产区人民经济收入的重要来源和生态保障^[20]。由于杉木自肥能力差, 不合理的栽培模式等导致杉木人工林地力衰退, 这在一定程度已经成为制约这些地区林业可持续发展的重要因素^[21]。因此, 进行杉木人工林林木间竞争规律的研究显得尤为重要。目前, 对杉木人工林种内和种间竞争的研究较少, 且主要集中在以杉木为优势种混交林的竞争研究^[5-6], 而对不同林龄、径级杉木纯林竞争规律的研究尚未见报道。福建省将乐县是中亚热带杉木人工林分布的中心区域, 采用时空互换法, 以不同年龄的杉木人工林替代其演替进程, 对不同生长发育阶段的杉木人工林种内竞争规律进行研究, 定量分析了杉木种内的竞争指数和竞争强度, 旨在更准确地描述和揭示杉木人工林竞争格局和发展态势, 以期推断和预测林分竞争状态、保护林下生物多样性、提高林地生产力、制定科学的营林措施以及杉木人工林持续经营等提供科学依据。

1 研究区概况

研究区域位于福建省西北部将乐县, 地理坐标为 26°26'~27°04'N, 117°05'~117°40'E, 地处武夷山脉东南麓, 扼闽江支流金溪中下游, 境内地形复杂多样, 以低山和丘陵为主。属于中亚热带季风气候, 年平均气温为 18.7 °C, ≥ 10 °C 的年活动积温为 5 500~6 800 °C, 年平均日照时数为 1 730 h; 年平均降水量为 1 698.2 mm, 无霜期 295 d, 年平均相对湿度 82%, 主导风向为东南风。土壤具有典型的中亚热带地带性土壤特征, 山地土壤分布具有垂直地带性, 随着海拔的升高土壤类型分布依次是: 红壤—黄红壤—黄壤—山地草甸土。土壤类型分为 6 个土类 15 个亚类 44 个土属, 以酸性花岗岩发育的红壤为主, 黄壤为次, 土壤腐殖质层为 15~30 cm, 土层大多 1 m 以上, 有机质质量分数为 3.5%~4.4%。地带性植被属中国东部湿润森林区亚热带常绿阔叶林, 植物种类丰富, 植被群落有: 人工林杉木-芒萁 *Dicranopteris dichotoma* 群落、人工林杉木-五节芒 *Miscanthus floridulus* + 蕨类 *Pteridium aquilinum* 群落、人工林马尾松 *Pinus massoniana*-芒萁群落; 天然林丝栗栲 *Castanopsis fargesii* + 木荷 *Schima superba*-槲木 *Loropetalum chinense* + 黄瑞木 *Adinandra millettii*-五节芒 + 蕨类、天然林米楮 *Castanopsis carlesii* + 马尾松-乌饭 *Vaccinium mandarinorum* + 杜鹃 *Rhododendro simsii* -五节芒群落; 无林地以槲木 + 黄瑞木-芒萁群落为主。

2 材料和方法

2.1 样地设置与调查

在野外踏查基础上, 于 2014 年 6 月在将乐县福建金森林业股份有限公司邓坊林区典型地段, 选定森林经营类型一致、立地条件相近, 林龄分别为 10, 15, 20, 25, 30 和 40 年生的杉木人工林。各个年

龄林分面积为 1.7~19.8 hm² 不等, 在各不同林龄的人工林内分别设置 20 m × 30 m 的样地 3 个, 于不同年龄林分各随机选取 50 株杉木为对象木, 测量对象木的胸径、高度、枝下高和冠幅并编号, 以该对象木为中心, 测量半径为 6 m 以内的所有竞争木杉木的胸径、高度、枝下高、冠幅以及与对象木之间的距离, 并测定研究样地的海拔、坡度、坡向等地形因子, 各样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Features of sample plots

林龄/a	海拔/m	纬度(N)	经度(E)	坡度/(°)	坡向	郁闭度	林分密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	平均树高/m
10	213	26°48'26"	117°32'27"	28	NE	0.4	2 699	6.1	8.7
15	214	26°48'50"	117°31'29"	32	NE	0.6	2 549	12.0	9.0
20	211	26°48'16"	117°32'14"	32	N	0.8	2 759	12.4	11.1
25	263	26°41'02"	117°30'15"	35	SE	0.9	2 789	14.9	13.2
30	290	26°41'03"	117°30'24"	29	N	0.7	2 309	16.3	14.4
40	215	26°47'04"	117°32'18"	28	SE	0.8	2 249	19.6	16.0

2.2 数据分析

采用 Hegyi 的与距离有关的竞争指数模型来研究不同林龄杉木人工林种内竞争指数的大小^[5,7,15,22-26], 其指数为: $I_G = \sum_j^N \left[\frac{D_{BHj}}{d_{ij}} \right]$; $I_C = \sum I_G$ 。其中: I_G 为第 i 株对象木的竞争指数; D_{BH} 和 D_{BHj} 分别为对象木 i 和竞争木 j 的胸径(cm); d_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 之间的距离(m); N 为第 i 株对象木周围的竞争木株数; I_C 为种群竞争指数, 其值越大, 表明竞争越激烈。运用简单方差分析方法, 比较不同林龄和径级杉木人工林种内竞争强度的差异, 通过最小显著差法(LSD)检验比较杉木人工林种内竞争强度在不同林龄和径级之间的差异($\alpha = 0.05$)。采用回归分析方法研究林龄和径级与竞争强度的关系。所有数据采用 SPSS 19.0 for Windows 软件完成, 图表用 Sigmaplot 12.5 绘制。

3 结果与分析

3.1 对象木和竞争木的胸径分布特征

6 个不同林龄杉木人工林林分共调查杉木对象木 300 株, 最小胸径为 3.6 cm, 最大胸径为 29.8 cm, 平均胸径为(15.31±0.37) cm。竞争木共有 1 918 株, 最小胸径为 2.8 cm, 最大胸径为 29.6 cm, 平均胸径为(14.1±1.17) cm。以 5 cm 为径阶距对不同林龄杉木人工林林分内的对象木和竞争木进行统计, 统计结果见表 2。从对象木的径级分布来看, 10~15 cm 的杉木对象木株数最多, 占总株数的 34.00%; 其次是 15~20 cm 和 5~10 cm 径级的株数, 分别占总株数的 25.67%和 18.67%; 0~5, 20~25 和 25~30 cm 径级分别占总株数的 5.00%, 12.67%和 4.00%。从竞争木的径级分布看, 也是 10~15 cm 的杉木竞争木株数最多, 占总株数的 31.07%; 其次是 15~20 cm 和 5~10 cm 径级的株数, 分别占总株数的 28.78%和 20.80%; 0~5, 20~25 和 25~30 cm 径级分别占总株数的 6.78%, 9.07%和 3.49%。对象木和竞争木的胸径分布均显示出中间多两头少的分布特征。

3.2 不同林龄杉木人工林种内竞争强度

研究发现: 随着林龄的增加, 杉木人工林种内竞争强度不断减小(图 1)。平均竞争指数由 10 年生的 12.18 下降至 40 年生的 3.54, 其中, 在 10~25 年生, 杉木种内平均竞争指数随林龄的增加下降趋势较为明显, 但在 25~40 年生, 其下降趋势较为平缓, 即在 25 年生时形成 1 个“拐点”。杉木人工林种内竞争强度大小随林龄呈现的变化可用指数函数表征, $I_C = 19.398 4e^{-0.045 \ln t}$ ($R^2 = 0.962 7$, $P < 0.001$)。因此, 可以用指数函数方程模型对杉木人工林的竞争强度进行预测。用指数函数预测不同林龄竞争指数预测值见图 1。方差分析表明: 林龄对杉木人工林种内竞争强度有极显著影响($P < 0.01$), 但 25 年生和 30 年生 2 个发育阶段竞争强度差异不显著($P > 0.05$)。

3.3 不同径级杉木人工林种内竞争强度

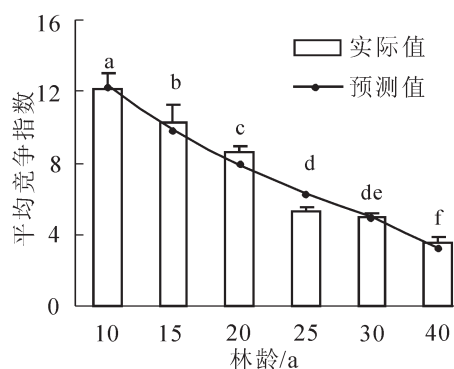
杉木在生长过程中, 不断与邻体发生竞争关系, 并因此产生自然稀疏现象。然而杉木种内竞争强度随对象木径级的变化呈现较大差异(图 2)。

表2 对象木与竞争木的胸径分布

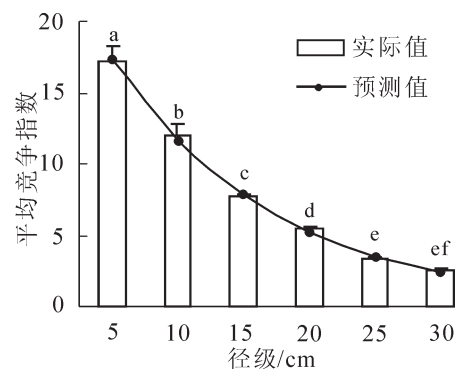
Table 2 Diameter at breast height (DBH) distribution of the subject and competitor trees

林龄/a	径级/cm	对象木			竞争木		
		株数	占总株数百分比/%	平均胸径/cm	株数	占总株数百分比/%	平均胸径/cm
10	0~5	12	24	4.2±0.56	105	28.77	3.7±0.89
	5~10	21	42	7.2±1.53	150	41.10	7.0±1.32
	10~15	17	34	11.7±1.65	110	30.14	11.9±1.58
15	5~10	12	24	8.2±0.98	80	23.19	8.4±1.21
	10~15	28	56	12.3±1.12	190	55.07	12.0±1.33
	15~20	10	20	16.3±0.79	75	21.74	16.3±1.04
20	5~10	6	12	9.3±0.56	64	19.75	8.5±1.36
	10~15	27	54	12.4±1.19	152	46.91	12.2±1.33
	15~20	17	34	17.0±1.69	100	30.86	17.1±1.49
	20~25	-	-	-	8	2.47	20.45±0.05
25	5~10	7	14	8.6±0.91	45	13.64	8.9±0.85
	10~15	14	28	13.1±1.13	85	25.76	12.8±1.08
	15~20	21	42	16.57±1.44	175	53.03	17.35±1.38
	20~25	8	16	21.2±0.67	25	7.58	21.5±0.55
30	5~10	6	12	7.8±1.70	35	10.64	7.6±1.70
	10~15	14	28	12.4±1.35	49	14.89	11.9±1.38
	15~20	19	38	17.6±1.18	112	34.04	16.9±1.44
	20~25	7	14	21.8±0.90	91	27.66	22.4±0.94
	25~30	4	8	26.0±1.07	42	12.77	26.5±1.03
40	0~5	3	6	4.3±0.47	25	11.11	4.54±0.44
	5~10	4	8	7.1±2.42	25	11.11	6.8±1.98
	10~15	2	4	11.5±0.28	10	4.44	11.5±0.28
	15~20	10	20	17.9±1.54	90	40.00	17.5±1.62
	20~25	23	46	21.3±0.76	50	22.22	21.45±0.89
	25~30	8	16	27.6±2.24	25	11.11	27.4±2.17

从图2可以看出：杉木种内竞争强度随径级的增加而减小，这符合林木生长的规律。其中，径级在



不同字母表示林龄间的差异显著 ($P < 0.05$)。



不同字母表示径级间的差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 不同林龄杉木人工林种内竞争强度(平均值±标准误差)

Figure 1 Competition intensity of *Cunninghamia lanceolata* plantation in different forest age (mean ± S_E)

图2 不同径级杉木种内竞争强度(平均值±标准误差)

Figure 2 Competition intensity of *Cunninghamia lanceolata* plantation with different diameter class (mean ± S_E)

20 cm 以内时, 杉木种内平均竞争指数随径级的增加下降趋势较为明显, 但当径级大于 20 cm 时, 其下降趋势较为平缓。对杉木竞争强度与对象木径级间的相互关系采用不同数学模型进行回归分析, 通过对实验数据的模拟, 选择最优曲线模型, 平均竞争强度随对象木径级的增加而呈现变化可以用指数函数表征 $I_C=25.904 2e^{-0.0797x}$ ($R^2=0.998 0$, $P<0.001$)。显著性检验, 模型达极显著水平。因此, 可用指数函数对杉木的竞争强度进行预测, 预测值与实际值见图 2。

方差分析表明: 径级对杉木人工林种内竞争强度有极显著影响 ($P<0.01$), 但在径级 20~25 cm 和 25~30 cm 间差异不显著 ($P>0.05$)。因为在杉木人工林中, 在生长发育初期, 杉木个体小, 数量多, 个体间为争夺生存资源而发生激烈竞争; 随着个体的发育, 林木胸径、株高、冠幅和根系不断增大与伸展, 所占空间范围不断扩张, 因自疏作用而加大植株间距, 因此对光、热、水、土壤等生态因子及资源的竞争强度降低。

3.4 杉木人工林种内竞争强度与对象木胸径的关系

林木的竞争能力受植株个体大小、生长速度、所处发育阶段、林分密度等多种生物因素和非生物因素的制约, 其中对象木个体胸径的大小对竞争能力影响很大^[7,9-10,17,25]。以竞争指数为因变量, 以对象木胸径为自变量, 采用多种数学模型对竞争指数与对象木胸径之间的关系进行回归拟合, 通过模拟结果的比较, 发现竞争强度与对象木胸径紧密地服从幂函数关系(图 3), 即: $I_C=aD^b$ 。其中: I_C 为竞争指数, D 为对象木胸径, a 和 b 为模型参数。通过对实验数据的模拟, 得到相应方程: $I_C=73.761 3D^{-0.978 3}$ ($R^2=0.920 2$, $P<0.001$, $N=300$), 显著性检验结果表明均达到极显著水平, 可以预测其种内竞争强度。

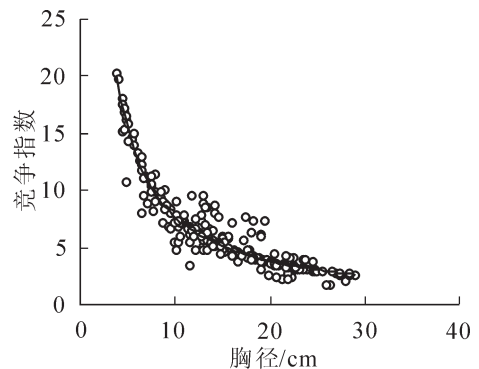


图 3 杉木竞争强度与对象木胸径的关系
Figure 3 Relationship between competition intensity and DBH of the subject tree

4 结论与讨论

竞争是生物学中的一个重要因子, 在很多方面针对不同的目的已经做了大量研究, 但对于竞争的定义、实验设计、分析方法、实验结果的解释等方面仍然存在着争议^[26]。竞争的特征可以从竞争的重要性、强度、效果、响应和结果等不同角度加以研究评述^[27-28]。竞争结果的解释关键取决于测量的方法选取^[29]。本研究选择 Hegyi 提出的与距离有关的竞争指数, 虽然简单可行, 但只考虑了林木胸径大小、对象木与竞争木之间的距离, 没有考虑树冠面积、树冠重叠面积等因素。此外, 本研究将对象木竞争范围确定为以 6 m 为半径的样圆, 存在一定的不足, 不同林龄杉木人工林对象木竞争范围应该有所差异。Lee 等^[30]提出: 竞争区域动态半径, Lorimer^[31]建议将平均树冠半径的 3.5 倍作为竞争半径, 国内专家和学者采用逐步扩大范围法^[9,13]、根据林窗半径、树冠大小及竞争强度变化率^[7,14]、树冠接触和遮光状况^[10]、光生态场理论^[27]等确定竞争范围。

随着林龄的增加, 杉木人工林种内竞争强度不断减弱。其过程可分为 2 个阶段: 在林龄小于 25 年生时, 竞争强度大, 随着林龄的减小, 竞争强度变化显著; 当林龄大于 25 年生时, 竞争强度变化小, 趋于稳定。植物的竞争能力是植物综合能力的反映^[9], 它主要取决于种的生态习性、生态幅及生态位。生态习性相近的种, 相互之间竞争激烈^[23]。杉木为纯林, 在其生长过程中, 林木的竞争强度受林分密度和大小等级的影响更为显著。因此, 通过抚育间伐措施对杉木的生长进行干预, 应该注意杉木竞争规律, 在林龄小于 25 年生以内时, 进行必要的人工抚育和管理, 将有利于杉木个体的生长发育, 从而可以科学、有效地开展杉木人工林的经营和管理。

杉木种内竞争强度随对象木径级的增加而逐渐减小。在胸径 < 20 cm 时, 所承受的竞争强度较大, 随着径级的减小, 竞争强度增加; 当胸径 ≥ 20 cm 时, 竞争强度变化不大, 并维持在较低的平稳水平, 竞争作用不显著。这表明随着杉木个体的生长, 为获得各自生存所必需的营养空间, 通过自疏作用增加相互之间的距离, 各自占据自己的生态位, 竞争关系逐渐减弱, 降低竞争强度来平衡资源分配, 以加速杉木生长, 使群落、生态系统趋于稳定和平衡。封磊等^[5]对杉木-拟赤杨 *Alniphyllum fortunei* 人工混交林

竞争强度进行研究, 研究结果显示: 杉木种内竞争强度在对象木胸径大于 21 cm 以后, 竞争强度变化很小; 林晗等^[32]研究杉木-千年桐 *Aleurites montana* 混交林竞争关系, 研究发现杉木对象木胸径达 25 cm 以后, 杉木种内竞争强度变化较为平缓。此外, 前人对青海云杉 *Picea crassifolia*^[9], 云南红豆杉 *Taxus yunnanensis*^[10], 天然樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 林^[13], 油松 *Pinus tabulaeformis* 天然次生林^[15], 沙地云杉 *Picea mongolica*^[23], 枫香 *Liquidambar formosana*^[24], 巴山冷杉 *Abies fargesii*^[25], 红松 *Pinus koraiensis*^[33], 朴树 *Celtis sinensis* 林^[34] 等种内竞争研究结果表明, 种群对象木胸径分别达到 25, 25, 30, 25, 40, 20, 25, 30, 20 cm 时, 种内竞争强度变化较小, 趋于稳定, 维持在较低水平; 殷东升等^[17]研究色木槭 *Acer mono* 种内竞争时发现, 其种内竞争强度先随对象木径级增加而增大, 当对象木胸径大于 30 cm 以后, 竞争强度逐渐降低。本研究与前人研究成果进行比较, 具有相似性, 但也存在一定的差异性, 这主要是由于本研究的是杉木纯林, 与杉木混交林竞争规律有所不同。此外, 对于对象木胸径大于多少时, 种内竞争强度趋于平缓, 这不仅与树种自身的生物学特性相关, 还与研究区域、物种组成、竞争指数的选取等有关。从竞争关系出发, 在杉木人工林的经营和管理过程中应采取必要的干扰措施, 加强人为对中小径级林木的干预, 即在杉木胸径达到 20 cm 之前进行适度的抚育间伐, 以减轻植株间竞争消耗, 减小杉木种内竞争强度, 加速杉木个体的生长, 提高杉木人工林的生产力, 促进杉木人工林的可持续经营及生态系统的稳定。

通过对杉木竞争指数与对象木胸径大小进行回归分析, 发现对象木胸径与竞争指数严格地服从幂函数关系, 且幂值为负数, 表明对象木胸径大小与竞争指数呈负相关关系, 即对象木个体越大, 其周围生长的林木就少, 竞争木对对象木的竞争能力就弱。这与喻泓等^[14]对内蒙古呼伦贝尔沙地不同樟子松林竞争强度的比较研究, 张池等^[7]对鼎湖山季风常绿阔叶林建群种黄果厚壳桂 *Cryptocarya concinna* 种内与种间竞争的数量关系研究、柴宗政等^[15]对秦岭西段油松天然次生林种群竞争关系研究、毛磊等^[13]对红花尔基自然保护区天然樟子松林种内种间竞争分析及王林林等^[34]对南京朴树林竞争强度及其群落稳定性研究的结果一致, 说明竞争强度与对象木胸径之间多近似服从幂函数关系, 但是竞争强度与对象木胸径大小之间也有可能呈非幂函数关系。张琼等^[35]对长袍铁杉 *Tsuga longibracteata* 种内和种间竞争关系的研究中发现, 竞争强度与对象木胸径服从双曲线回归关系; 殷东升等^[17]对色木槭种群竞争关系进行研究, 研究结果显示: 竞争强度与对象木胸径符合指数函数关系。因此, 竞争强度与对象木胸径大小之间多呈负相关关系, 竞争强度随着对象木胸径的增大而减小, 这与林木生长的自然规律相符合。

林木个体间的竞争随时间和空间变化, 林木间的竞争作用实质上是空间作用, 包括地上部分和地下部分^[2,5-6]。Lars 等^[36]采用文献计量学的方法, 回顾了根系和林冠竞争对草本植物生物量的影响研究, 指出根系、林冠和总的竞争作用之间呈显著相关。一般来说, 根系竞争比林冠竞争对植物的影响更大, 尤其在较小的竞争者之间、贫瘠的生境中、竞争者是野生种而不是驯化种等。与草本植物相比, 对林木地下和地上竞争进行区别研究难度很大, 因为根系分布的深度、宽度及重叠度等因素在现实林分中很难测定, 所以如何了解不同林龄杉木人工林根系和林冠竞争之间的大小和比例, 还有待于进一步研究。

5 参考文献

- [1] PEDERSEN R Ø, BOLLANDSÁS O M, GOBAKKEN T, et al. Deriving individual tree competition indices from airborne laser scanning[J]. *For Ecol Manage*, 2012, **280**(5): 150 - 165.
- [2] 王政权, 吴巩固, 王军邦. 利用竞争指数评价水曲柳落叶松种内种间空间竞争关系[J]. *应用生态学报*, 2000, **11**(5): 641 - 645.
WANG Zhengquan, WU Gongsheng, WANG Junbang. Application of competition index in assessing intraspecific and interspecific spatial relations between manchurian ash and dahurian larch [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2000, **11**(5): 641 - 645.
- [3] ANNING A K, McCARTHY B C. Competition, size and age affect tree growth response to fuel reduction treatments in mixed-oak forests of Ohio [J]. *For Ecol Manage*, 2013, **307**(7): 74 - 83.
- [4] SABATIA C O, BURKHART H E. Competition among loblolly pine trees: does genetic variability of the trees in a stand matter? [J]. *For Ecol Manage*, 2012, **263**(9): 122 - 130.
- [5] 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): 46 – 50.
- FENG Lei, HONG Wei, WU Chengzhen, *et al.* Intraspecific and interspecific competition intensity in mixed forest plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Alniphyllum fortunei* [J]. *J Tropi Subtropi Bot*, 2004, **12**(1): 46 – 50.
- [6] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 等. 杉木-观光木人工混交林竞争及邻体干扰指数研究[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13**(2): 196 – 199.
- FENG Lei, HONG Wei, WU Chengzhen, *et al.* Competition and neighborhood interference index of *Cunninghamia lanceolata* plantation mixed with *Tsoongiodendron odrum* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13**(2): 196 – 199.
- [7] 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 Chi, HUANG Zhongliang, LI Jiong, *et al.* Quantitative relationships of intra-and interspecific competition in *Cryptocarya concinna* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17**(1): 22 – 26.
- [8] 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 Gangying, HU Yanbo, ZHAO Zhonghua, *et al.* A forest competition index based on intersection angle [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(6): 68 – 73.
- [9] 张学龙, 马钰, 赵维俊, 等. 祁连山青海云杉种群种内竞争分析[J]. 干旱区研究, 2013, **30**(2): 242 – 247.
- ZHANG Xuelong, MA Yu, ZHAO Weijun, *et al.* On the intraspecific competition of *Picea crassifolia* population in the Qilian Mountains [J]. *Arid Zone Res*, 2013, **30**(2): 242 – 247.
- [10] 李帅锋, 刘万德, 苏建荣, 等. 滇西北金沙江流域云南红豆杉群落种内与种间竞争[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(1): 33 – 38.
- LI Shuaifeng, LIU Wandu, SU Jianrong, *et al.* Intra-and interspecific competitions of *Taxus yunnanensis* population in Jingsha River Basin of northwest Yunnan Province, southwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(1): 33 – 38.
- [11] 洪伟, 吴承祯, 蓝斌. 邻体干扰指数通用模型及其应用[J]. 植物生态学报, 1997, **21**(2): 149 – 154.
- HONG Wei, WU Chengzhen, LAN Bin. A general model for neighborhood interference index and its application [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1997, **21**(2): 149 – 154.
- [12] CONTRERAS M A, AFFILECK D, CHUNG W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **262**(11): 1939 – 1949.
- [13] 毛磊, 杨丹青, 王冬梅, 等. 红花尔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 Lei, YANG Danqing, WANG Dongmei, *et al.* Analyses of intraspecific and interspecific competition of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest in Honghuaerji Nature Reserve of Inner Mongolia [J]. *J Plant Resour Environ*, 2008, **17**(2): 9 – 14.
- [14] 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 Hong, YANG Xiaohui, CI Longjun, *et al.* Competition intensity of Mongolian pine forest in Hulun Buir sand region of Inner Mongolia, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20**(2): 250 – 255.
- [15] 柴宗政, 王得祥, 张丽楠, 等. 秦岭西段油松天然次生林种群竞争关系研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(12): 57 – 63.
- CHAI Zongzheng, WANG Dexiang, ZHANG Linan, *et al.* Intraspecific and interspecific competition of *Pinus tabulaeformis* natural secondary forest in west section of Qinling Mountain [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2012, **40**(12): 57 – 63.
- [16] PEDERSEN R Ø, NAESSETE E, BOLLANDSÁS O M, *et al.* On the evaluation of competition indices-the problem of overlapping samples [J]. *For Ecol Manage*, 2013, **310**(7): 120 – 133.
- [17] 殷东生, 葛文志, 张林海, 等. 色木槭天然次生林种群竞争关系研究[J]. 植物研究, 2012, **32**(1): 105 – 109.
- YIN Dongsheng, GE Wenzhi, ZHANG Fenghai, *et al.* Competition relationship of populations of natural secondary *Acer mono* forest [J]. *Bull Bot Res*, 2012, **32**(1): 105 – 109.
- [18] 吴承祯, 洪伟. 杉木数量经营学引论[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [19] 巢林, 洪滔, 林卓, 等. 中亚热带杉阔混交林直径分布研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(9): 31 – 37.
- CHAO Lin, HONG Tao, LIN Zhuo, *et al.* Study on diameter distribution of Chinese fir and broad-leaved forest in mid-subtropical [J]. *J Cent South Univ For & Technol*, 2014, **34**(9): 31 – 37.

- [20] 王兵, 马向前, 郭浩, 等. 中国杉木林的生态系统服务价值评估[J]. 林业科学, 2009, **45**(4): 124 – 130.
WANG Bing, MA Xiangqian, GUO Hao, *et al.* Evaluation of the Chinese fir forest ecosystem services value [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(4): 124 – 130.
- [21] 陈龙池, 汪思龙, 陈楚莹. 杉木人工林衰退机理探讨[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(10): 1953 – 1957.
CHEN Longchi, WANG Silong, CHEN Chuying. Degradation mechanism of Chinese fir plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15**(10): 1953 – 1957.
- [22] HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands [J]. *Growth Mod Tree Stand Simul*, 1974, **30**: 74 – 90.
- [23] 邹春静, 徐文铎. 沙地云杉种内、种间竞争的研究[J]. 植物生态学报, 1998, **22**(3): 269 – 274.
ZOU Chunjing, XU Wenduo. Study on intraspecific and interspecific competition of *Picea mongolica* [J]. *Acta Phytocol Sin*, 1998, **22**(3): 269 – 274.
- [24] 骆文建, 韦新良, 汤孟平, 等. 天目山枫香种内与种间竞争的数量研究[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(5): 641 – 646.
LUO Wenjian, WEI Xinliang, TANG Mengping, *et al.* Intraspecific and interspecific competition in *Liquidambar formosana* on Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29**(5): 641 – 646.
- [25] 段仁燕, 王孝安, 黄敏毅, 等. 秦岭太白山巴山冷杉种内和种间竞争特性的研究[J]. 武汉植物学研究, 2007, **25**(6): 581 – 585.
DUAN Renyan, WANG Xiaolan, HUANG Minyi, *et al.* Study on interspecific and interspecific competition in *Abies fargesii* on Taibai Mountain [J]. *J Wuhan Bot Res*, 2007, **25**(6): 581 – 585.
- [26] WEIGELT A, JOLLIFFE P. Indices of plant competition [J]. *J Ecol*, 2003, **91**(5): 707 – 720.
- [27] GIBSON D, CONNOLLY J, HARTNETT D, *et al.* Designs for greenhouse studies of interactions between plants[J]. *J Ecol*, 1999, **87**(1): 1 – 16.
- [28] CONNOLLY J, WAYNE P, BAZZAZ F A. Interspecific competition in plants: how well do current methods answer fundamental questions? [J]. *Am Natur*, 2001, **157**(2): 107 – 125.
- [29] FRECKLETON R P, WATKINSON A R. The mis-measurement of plant competition [J]. *Funct Ecol*, 1999, **13**(2): 285 – 287.
- [30] LEE W K, GADOW K V. Iterative bestimmung der Konkurrenzbaume in *Pinus densiflora* beständen [J]. *Allg Forst Jagd Zeit*, 1997, **168**(3/4): 41 – 44.
- [31] LORIMER C G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands [J]. *For Ecol Manage*, 1983, **6**(4): 343 – 360.
- [32] 林晗, 吴承祯, 陈辉, 等. 千年桐人工混交林种内种间竞争关系分析[J]. 福建林学院学报, 2014, **34**(4): 316 – 321.
LIN Han, WU Chengzhen, CHEN Hui, *et al.* Intraspecific and interspecific competition in the mixed stands of *Cunninghamia lanceolata* and *Aleurites montana* [J]. *J Fujian Coll For*, 2014, **34**(4): 316 – 321.
- [33] 陶岩, 殷秀琴, 田育红, 等. 长白山红松针阔混交林种内、种间竞争关系研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2011, **47**(4): 428 – 431.
TAO Yan, YIN Xiuqin, TIAN Yushong, *et al.* Study on intraspecific and interspecific competition of *Pinus koraiensis* broadleaf mixed forest Changbai Mountain [J]. *J Beijing Norm Univ Nat Sci*, 2011, **47**(4): 428 – 431.
- [34] 王林林, 唐坚强, 张光富, 等. 南京朴树林竞争强度及其群落稳定性[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(6): 654 – 660.
WANG Linlin, TANG Jianqian, ZHANG Guangfu, *et al.* Competition intensity and community stability of *Celtis sinensis* forest in Nanjing [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2012, **28**(6): 654 – 660.
- [35] 张琼, 洪伟, 吴承祯, 等. 长苞铁杉天然林群落种内及种间竞争关系研究[J]. 广西植物, 2005, **25**(1): 14 – 17.
ZHANG Qiong, HONG Wei, WU Chengzhen, *et al.* Studies on intraspecific and interspecific competition in natural communities of *Tsuga longibracteata* [J]. *Guihaia*, 2005, **25**(1): 14 – 17.
- [36] KIÆR L P, WEISBACH A N, WEINER J. Root and shoot competition: a meta-analysis [J]. *J Ecol*, 2013, **101**(5): 1298 – 1312.