

DOI: 10.5846/stxb201401130102

项小燕, 吴甘霖, 段仁燕, 闫玉梅, 张小平. 大别山五针松种内和种间竞争强度. 生态学报, 2015, 35(2): 389-395.

Xiang X Y, Wu G L, Duan R Y, Yan Y M, Zhang X P. Intraspecific and interspecific competition of *Pinus dabeshanensis*. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 389-395.

大别山五针松种内和种间竞争强度

项小燕^{1,2}, 吴甘霖², 段仁燕², 闫玉梅², 张小平^{1,3,*}

1 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000

2 安庆师范学院生命科学学院, 安庆 246001

3 安徽省重要生物资源保护与利用研究重点实验室, 芜湖 241000

摘要:通过对安徽省岳西县大别山五针松群落内的 53 株对象木及 2079 株竞争木的调查, 运用 Hegyi 单木竞争模型分析了大别山五针松的种内和种间竞争强度。结果表明, 大别山五针松的种内和种间竞争强度分别为 17.11% 和 82.89%, 说明竞争主要来自种间。大别山五针松的伴生种较多, 种内与主要伴生种间的竞争关系为短柄枹>大别山五针松种内>黄山松>满山红>茅栗>金缕梅>紫茎>四照花>灯台树>鹅耳枥。竞争强度随对象木胸径的增大而减小, 当对象木的胸径小于 25cm 时, 所受到的竞争强度较大; 当胸径在 25cm 以上时, 竞争强度变化很小, 二者符合幂函数关系 ($CI = AD^{-B}$), 所得的预测模型能很好的预测大别山五针松种内和种间竞争强度。

关键词:大别山五针松; 种内竞争; 种间竞争; 竞争指数

Intraspecific and interspecific competition of *Pinus dabeshanensis*

XIANG Xiaoyan^{1,2}, WU Ganlin², DUAN Renyan², YAN Yumei², ZHANG Xiaoping^{1,3,*}

1 College of Life Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

2 School of Life Science, Anqing Teachers College, Anqing 246001, China

3 The Key Laboratory of Conservation and Employment of Biological Resources of Anhui, Wuhu 241000, China

Abstract: In this study, we investigated the intraspecific and interspecific competition of *Pinus dabeshanensis* (*P. dabeshanensis*) in Dabieshan Mountains, Yuexi county of Anhui province, using Hegyi individual competitive indices (*CI*) model. The competition intensity was analysed from the 53 target trees and 2079 competitive trees within the *P. dabeshanensis* community. The results showed that intraspecific and interspecific competition intensity of *P. dabeshanensis* accounted for 17.11% and 82.89% in the total competition intensity, respectively, indicating a remarkable effect of the interspecific competition. The value of the main competition intensity was laid out in numerical order, *i. e.*, *Quercus serrata* > *P. dabeshanensis* > *Pinus taiwanensis* > *Rhododendron mariesii* > *Castanea seguinii* > *Hamamelis mollis* > *Stewartia sinensis* > *Dendrobenthamia hupehensis* > *Bothrocaryum controversum* > *Carpinus turczaninowii*. Notably, the competition intensity of *P. dabeshanensis* decreased inversely to diameter of the breast height (DBH), which showed a stronger competition at DBH of < 25 cm and appeared weaker at DBH over 25 cm. The relationship between the whole forest competition intensity and DBH of the target tree followed the power function ($CI = AD^{-B}$). In conclusion, this model could effectively predict the intraspecific and interspecific competition of *P. dabeshanensis*.

Key Words: *P. dabeshanensis*; intraspecific competition; interspecific competition; competition index

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201304314)

收稿日期: 2014-01-13; 网络出版日期: 2014-07-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pinghengxu@sina.com

植物体间的竞争是由于对有限资源的共同需求从而使一个个体阻碍了另一个个体的正常生长和发育,是影响种群的空间分布、动态和物种多样性的重要因素^[1-3],也是植物种内和种间的主要表现形式,并推动着群落的演替^[4],因而是生态学研究的核心内容之一^[5-6]。因此,研究植物体间的竞争有利于物种的保护及对资源的可持续利用。近些年部分学者利用各种竞争模型开展了相关研究^[7-9],包括对针阔混交林^[10-12]及一些濒危植物的竞争^[13-18]。在各模型中,由于 Hegyi 提出的单木竞争模型能较好的反应植物个体对资源的需求与占有量,因而得到了广泛应用^[19-21]。

大别山五针松(*Pinus dabeshanensis*),属松科松属,仅分布于大别山区狭小范围内,安徽省岳西县大王沟分布较为集中,其它地点呈零星分布,是松类树种地理分布的特殊现象,研究该物种对植物演化发展尤其是松科树种的起源与演化有较高的价值。实地考察发现,大别山五针松的伴生种较多,二者之间存在明显的竞争现象,且竞争强度与大别山五针松的个体大小关系密切。而目前该物种仅在无性繁殖及材质特性上有所报道^[22-23],对群落特性尤其是对种群动态产生重要影响的竞争研究尚属空白。大别山五针松的种内和种间竞争究竟有何特点,对该物种的生存产生何种影响?为此,本文以大别山五针松为对象,采用 Hegyi 的单木竞争模型,分析大别山五针松的种内和种间竞争关系,揭示其群落地位,为了解种群的发展动态提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于安徽省岳西县大王沟境内,该区位于 E115°24'—116°21', N30°44'—30°51',海拔 900—1300m。雨量丰富,年降水量 1350—1400mm 左右。年平均温度为 14—15℃,极端低温-14.2℃,无霜期 212d。土壤为山地棕壤,pH 值在 5—5.5,属北亚热带温暖湿润季风气候区,地带性植被是以黄山松为主的针阔混交林。大别山五针松自然种群主要分布在海拔 1050—1200m 范围内,以阴坡近山脊处较为集中。自然种群成年个体居多,林下幼苗少见,自然更新困难,处于濒危状态。据笔者近几年观测发现,花芽常在 3—4 月形成,5 月中下旬花粉成熟并散发,此时,雌球花张开接受传粉。球果翌年 9 月成熟,但结实率低且种子败育率高。群落内乔木层的主要优势种有短柄枹(*Quercus serrata*)、大别山五针松(*Pinus dabeshanensis*)、黄山松(*Pinus taiwanensis*)、满山红(*Rhododendron mariesii*)、茅栗(*Castanea seguinii*)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)和四照花(*Dendrobenthamia hupehensis*)等。林下灌木层主要有伞八仙(*Hydrangea umbellata*)、山榿(*Lindera reflexa*)、菝葜(*sp.*)及一些乔木层幼苗等,以映山红(*Rhododendron simsii*)、合轴荚蒾(*Viburnum sympodiale*)、蜡瓣花(*Corylopsis sinensis*)等较为多见。由于林间郁闭度高达 80%—90%,草本层种类较少,主要有宽叶苔草(*Carex siderosticta*)、求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)等。

2 研究方法

2.1 数据采集

由于大别山五针松分布稀少且在野外多呈散生状态,在前期大量野外调查基础上,2013 年 7—8 月,选择大别山五针松较集中分布且自然林木保存完好的地段作为样地,共选择样地 10 块。以样地中胸径大于 5cm 的大别山五针松为对象,共选择对象木 53 株,分别测量其胸径和高度。竞争范围参照刘方炎^[16]、李帅锋^[18]和段仁燕^[24]等方法,依据样地中林隙的半径、上层树的影响范围和样地的树高及冠幅等指标来确定,由于大别山五针松的林窗半径在 8m 左右,因此选择半径 8m 样圆内所有胸径≥5cm 的乔木为竞争木,并进行标记以免重复,测量竞争木的胸径、高度及与对象木的距离,记录竞争木的种名。

2.2 竞争指数的确定

研究者们提出了众多的单木竞争模型,其中 Hegyi 提出的单木竞争指数模型由于反映的是林木对环境质量的需求及现实生境下林木对环境资源占有量之间的关系,且野外调查相对简单易行,数据准确^[20]。因此本文采用此方法来计算竞争指数。计算公式为:

$$CI = \sum_{j=1}^N (D_j / D_i) \times \frac{1}{L_{ij}}$$

式中, CI 为竞争指数; D_j 为竞争木胸径; D_i 为对象木胸径; L_{ij} 为对象木和竞争木之间的距离; N 为竞争木的株数。 CI 值越大,对象木受到的竞争越剧烈。

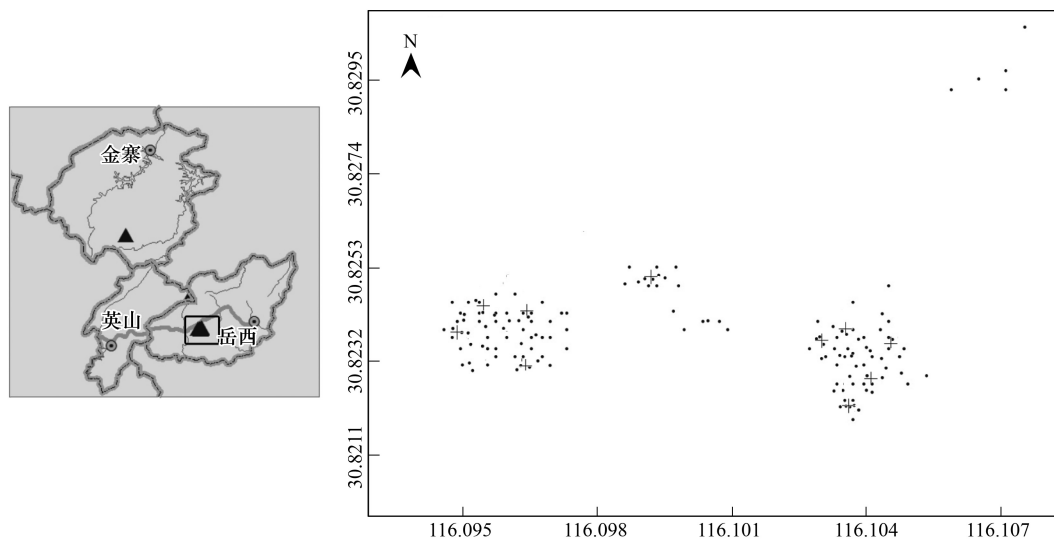


图1 大别山五针松分布点及样地(+表示样地)

Fig.1 Distribution of *P. dabeshanensis* and sampling sites (+represents the stands)

首先计算出每个竞争木对对象木的竞争指数,将 N 个单木间的竞争指数累加,即得大别山五针松种内以及种间的竞争强度。

2.3 数据处理

将对象木的胸径与竞争指数进行回归分析,所有数据在 Excel 2003 和 SPSS 13.0 中完成。

3 结果与分析

3.1 对象木与竞争木的概况

共调查对象木 53 株,最小胸径 5.2cm,最大胸径 42.6cm,平均胸径 20.64cm;竞争木最小胸径 5.0cm,最大胸径 55.0cm,平均胸径 10.49cm。对象木与竞争木的径级分布、胸径及树高等信息见表 1。从表 1 可以看出,对象木的胸径大小近似正态分布,除 15—20 cm 径级外,树高和胸径呈正相关性,原因有待进一步调查。

大别山五针松分布区独特的气候孕育了大量的野生资源,因而竞争木种类较多,在调查区域内共测得竞争木 47 种 2079 株。其中,5—15 cm 最多,占竞争木总数的 81.19%,竞争木的树高与胸径呈正相关。

表 1 对象木及竞争木的概况

Table 1 The status of objective tree and competitor

径级 Diameter Scale/ cm	对象木 Objective tree				竞争木 Competitor			
	株数 Number	百分比 Percentage/ %	平均胸径 Average of DBH/ /cm	平均树高 Average of height/ m	株数 Number	百分比 Percentage/ %	平均胸径 Average of DBH/ /cm	平均树高 Average of height/ m
5—10	8	15.10	7.55	5.26	1379	66.33	6.62	4.79
10—15	8	15.10	12.84	8.04	309	14.86	12.44	6.44
15—20	11	20.75	17.20	7.55	160	7.7	17.39	7.51
20—25	11	20.75	22.40	9.48	131	6.3	22.18	9.04
25—30	6	11.32	28.03	10.27	54	2.6	27.22	9.81
>30	9	16.98	36.33	12.02	46	2.21	36.51	9.83
合计 Total	53	100	—	—	2079	100	—	—

3.2 大别山五针松的种内和种间竞争

表 2 为大别山五针松受到的种内和种间竞争强度。种内竞争总强度为 67.374, 占总竞争强度的 17.11%, 种间竞争强度为 326.467, 占总竞争强度的 82.89%, 说明大别山五针松的竞争主要来自种间, 这与自然状态下该物种数量稀少且呈散生分布的特性相一致。大别山五针松在生长发育过程中不断与自身发生竞争, 并产生自疏现象, 竞争大小同径级大小及植株数量关系密切。中小径级的个体及数量较多的个体所受到的竞争强度较大, 随着径级的增大, 平均竞争指数呈明显减少趋势($r = -0.866, P < 0.05$)。在径级小于 25cm 时, 每个径级的种内竞争指数均大于 10(表 2), 总和可达到 64.336, 占总比例的 95.49%; 大于 25cm 时, 每个径级的种内竞争指数均小于 2, 明显小于前者($t = 3.982, P < 0.05$)。

大别山五针松的种间竞争除受竞争木大小和数量影响外, 还因竞争种类的不同而存在很大差异(表 3)。在调查中, 共测得竞争木 47 种, 竞争总指数为 393.841。但由于有些种仅 1—2 株, 因而本文将这些物种合并计算。其中, 竞争力最大的是短柄枹, 竞争指数为 97.630, 其次是大别山五针松, 竞争指数为 67.374, 竞争最小的是野鸦椿 *Euscaphis japonica*, 竞争指数仅为 0.047; 另外, 黄山松、茅栗因个体较大且数量居多对大别山五针松也产生了较大的竞争压力, 竞争指数分别为 42.609 和 25.520; 满山红和金缕梅个体虽较小但因数量较多因对大别山五针松也产生了重要影响, 竞争指数分别为 34.146 和 24.280。大别山五针松的种内及主要伴生种间的竞争顺序依次为短柄枹>大别山五针松种内>黄山松>满山红>茅栗>金缕梅>紫茎>四照花>灯台树>鹅耳枥。

表 2 大别山五针松的种内和种间竞争强度

Table 2 The intraspecific and interspecific competition intensity of *P. dabeshanensis*

径级/cm Diameter scale	种内竞争 Intraspecific competition			种间竞争 Interspecific competition		
	株数 Number	竞争指数 Competitive index (CI)	平均竞争指数 Average of CI	株数 Number	竞争指数 Competitive index (CI)	平均竞争指数 Average of CI
5—10	85	14.974	0.176	1294	142.020	0.110
10—15	78	21.937	0.281	231	50.911	0.220
15—20	33	17.198	0.521	127	35.607	0.280
20—25	29	10.227	0.353	102	45.983	0.451
25—30	3	1.917	1.121	51	27.375	0.537
>30	4	1.121	0.280	42	24.571	0.585
总计 Total	232	67.374	—	1847	326.467	—

表 3 竞争木的种类组成和竞争强度

Table 3 Species composition of competitive tree and the competition intensity

种名 Species	株数 Number	占总株数 的比例 Percentage/ %	平均胸径 Average of DBH/ cm	平均高度 Average of height/ cm	竞争指数 CI	平均竞争 指数 Average of CI	竞争指数 排名 Ranking of CI
短柄枹 <i>Quercus serrata</i>	284	13.66	17.53	7.56	97.630	0.344	1
大别山五针松 <i>Pinus dabeshanensis</i>	232	11.16	13.10	6.76	67.374	0.290	2
黄山松 <i>Pinus taiwanensis</i>	176	8.47	14.41	6.45	42.609	0.242	3
满山红 <i>Rhododendron mariesii</i>	320	15.39	6.10	3.68	34.146	0.107	4
茅栗 <i>Castanea seguinii</i>	110	5.29	15.14	6.41	25.520	0.232	5
金缕梅 <i>Hamamelis mollis</i>	219	10.53	6.52	4.80	24.280	0.111	6
紫茎 <i>Stewartia sinensis</i>	90	4.33	7.71	5.48	16.483	0.183	7
四照花 <i>Dendrobenthamia hupehensis</i>	97	4.67	9.27	5.27	11.952	0.123	8
灯台树 <i>Bothrocaryum controversum</i>	73	3.51	10.03	6.77	10.694	0.146	9
鹅耳枥 <i>Carpinus turczaninowii</i>	88	4.23	7.78	5.52	10.409	0.118	10

续表

种名 Species	株数 Number	占总株数 的比例 Percentage/ %	平均胸径 Average of DBH/ cm	平均高度 Average of height/ cm	竞争指数 CI	平均竞争 指数 Average of CI	竞争指数 排名 Ranking of CI
八角枫 <i>Alangium chinense</i>	22	1.06	11.32	5.91	6.720	0.305	11
山樱花 <i>Cerasus serrulata</i>	33	1.59	8.52	6.14	4.548	0.138	12
华山矾 <i>Symplocos chinensis</i>	39	1.87	8.00	5.33	4.450	0.114	13
五加 <i>Acanthopanax gracilistylus</i>	26	1.25	8.50	6.3	4.165	0.160	14
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	16	0.77	14.04	8.16	3.876	0.242	15
水榆花楸 <i>Sorbus alnifolia</i>	16	0.77	9.66	5.66	3.101	0.194	16
三桠乌药 <i>Lindera obtusiloba</i>	26	1.25	6.43	4.55	2.805	0.108	17
毛漆树 <i>Toxicodendron trichocarpum</i>	28	1.34	6.31	4.24	2.533	0.090	18
江浙山胡椒 <i>Lindera chienii</i>	15	0.72	10.43	5.37	2.532	0.169	19
映山红 <i>Rhododendron simsii</i>	13	0.63	6.73	4.55	1.749	0.135	20
鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	15	0.72	6.33	5.41	1.659	0.111	21
小构 <i>Broussonetia kazinoki</i>	4	0.19	6.60	6.50	1.570	0.393	22
蜡瓣花 <i>Corylopsis sinensis</i>	21	1.01	6.52	5.35	1.318	0.063	23
华千金榆 <i>Carpinus cordata</i>	8	0.38	6.68	5.35	1.311	0.164	24
中华石楠 <i>Photinia beauverdana</i>	6	0.29	8.52	7.43	1.035	0.172	25
合轴荚蒾 <i>Viburnum sympodiale</i>	12	0.58	6.61	4.14	0.929	0.077	26
大柄冬青 <i>Ilex macropoda</i>	3	0.14	23.40	5.53	0.772	0.257	27
大叶槭 <i>Acer macrophyllum</i>	10	0.48	9.28	7.97	0.763	0.076	28
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	11	0.53	7.37	5.32	0.708	0.064	29
天童锐角槭 <i>Acer acutum</i>	8	0.38	6.60	5.68	0.622	0.078	30
其它 17 种伴生种 other trees	58	2.81	7.21	5.72	5.599	0.097	—
合计 Total	2079	100	—	—	393.841	—	—

3.3 大别山五针松对象木胸径与竞争指数的关系及其预测

林木的竞争受到多种生物和非生物因素的制约。其中,生物因素中的个体胸径对竞争的影响较大,且是林分调查的基本因子。为了研究大别山五针松个体大小与竞争强度的关系,以对象木胸径为自变量,采用对数、线性、双曲线、幂函数等多种数学公式对竞争指数与对象木胸径间的关系进行回归拟合。结果表明,幂函数的相关系数均最大,因此幂函数为较优的回归模型,即:

$$CI = AD^{-B}$$

式中, CI 为竞争强度, D 为对象木胸径, A 和 B 为模型参数,显著性检验结果均达到显著水平(表 4)。对 53 株对象木的胸径与整个林分(图 2)、对象木胸径与种内(图 3)的竞争指数关系进行分析,结果发现随着对象木胸径的增大,竞争指数逐渐变小。其中,胸径小于 25cm 之前受到的竞争压力最大,25cm 之后,竞争强度变化不明显,且竞争指数较低。

表 4 竞争强度与对象木的胸径模型参数

Table 4 Model parameters of competition intensity and DBH of objective tree

项目 Item	类别 Sort			
	A	B	R ²	显著性 Significance
大别山五针松与整个林分 <i>P. dabeshanensis</i> and stand	1.796	0.842	0.498	$P < 0.01$
大别山五针松与伴生树种 <i>P. dabeshanensis</i> and other species	1.550	0.807	0.445	$P < 0.01$
大别山五针松种内 Intraspecific competition of <i>P. dabeshanensis</i>	4.737	1.066	0.508	$P < 0.01$
大别山五 大别山五针松与短柄枹 <i>P. dabeshanensis</i> and <i>Quercus serrata</i>	2.411	0.806	0.316	$P < 0.01$

因所有模型均达到显著水平,可以进行预测(表5)。结果表明,随着大别山五针松胸径的增大,竞争指数越来越小,当胸径大于25cm时,竞争指数变化不大,这与本文前面的调查结果一致(表2)。所得模型能很好预测大别山五针松的种内和种间竞争。

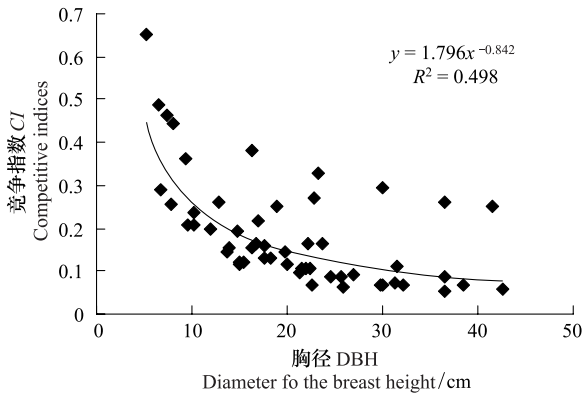


图2 大别山五针松对象木胸径与整个林分的竞争指数关系

Fig. 2 Relationship between DBH of objective tree and competition index of the stand

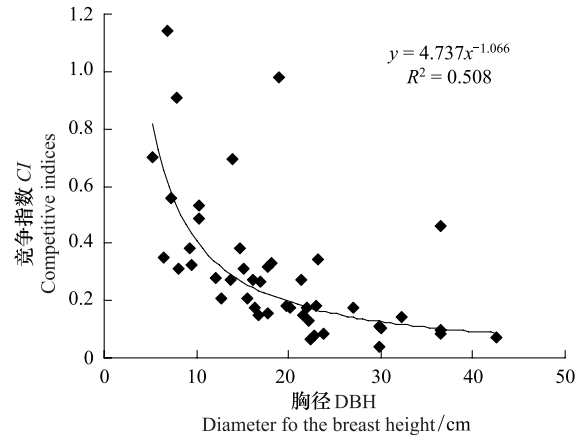


图3 大别山五针松对象木胸径与种内的竞争指数关系

Fig. 3 Relationship between DBH of objective tree and intraspecific competition

表5 大别山五针松种内种间竞争强度与对象木胸径的模型预测

Table 5 Model prediction of interspecific and intraspecific competition intensity and DBH

项目 Item	径级 Diameter scale/cm					
	5—10	10—15	15—20	20—25	25—30	30—35
大别山五针松与整个林分 <i>P. dabeshanensis</i> and stand	0.336	0.213	0.164	0.131	0.109	0.096
大别山五针松与伴生树种 <i>P. dabeshanensis</i> and other species	0.311	0.201	0.157	0.126	0.106	0.092
大别山五针松种内 Intraspecific competition of <i>P. dabeshanensis</i>	0.570	0.315	0.230	0.174	0.130	0.114
大别山五针松与短柄枹 <i>P. dabeshanensis</i> and <i>Quercus serrata</i>	0.484	0.313	0.247	0.198	0.165	0.146

4 讨论与结论

竞争是植物间为争夺地上部分和地下部分的资源和空间而相互作用的主要表现形式。Hegyi 的单木竞争指数模型反应的正是个体对资源的竞争强度,因而是研究种内和种间竞争关系常用的模型之一,本文利用该模型很好的反应了大别山五针松种内和种间的竞争强度。通过对 53 株对象木及 2079 株竞争木的研究表明,大别山五针松的种内竞争指数为 67.374,远小于种间竞争指数 393.841,这与自然状态下分布稀少的中国红豆杉^[12]、东北红豆杉^[15]、宝华玉兰^[17]和云南红豆杉^[18]的现状相似,这些濒危物种均因个体数量稀少导致竞争压力主要来自种间。

竞争受到竞争木胸径、数量及竞争种类的共同影响。物种间的竞争能力主要取决于生态习性和生态幅度,生态习性越相近、生态位重叠幅度大的物种之间竞争越剧烈,竞争力弱的个体在群落中将遵循“优胜劣汰”的规律,最终会被竞争力强的物种所取代^[25]。但竞争强度与群落的动态也紧密相关。一般而言,在群落演替的初期,群落中物种多样性较高,竞争激烈,先锋树种的竞争能力较大,随着群落的演替,先锋树种的竞争能力逐渐减小直至退出^[26-27],这点也得到了本文研究结果的证实。在调查的群落中,共有竞争木 47 种,表明与大别山五针松竞争的种类较多,其中短柄枹、黄山松、茅栗、满山红、金缕梅等是大别山五针松的主要竞争树种。短柄枹因个体数量较多、平均胸径最大在群落中占据优势,因而对大别山五针松的竞争压力最大,其次

是大别山五针松种内,满山红虽然胸径不大,但因数量最多(表3),因而在竞争中排名第四。竞争强度与对象木的胸径模型预测表明,竞争强度随胸径的增大而减弱,二者符合幂函数关系,这与李帅锋等对云南红豆杉^[18]、张莉等对青檀^[21]和马世荣等对油松^[28]的研究结果类似。当大别山五针松胸径小于25cm时,受到的竞争压力较大,当胸径大于25cm时,受到的竞争强度逐渐减小,且随着径级的进一步增大竞争强度变化不明显。这可能是因为幼龄级的大别山五针松对光、水等资源的竞争能力弱,受到伴生种尤其是短柄枹的强烈竞争。随着个体的不断生长,大别山五针松在群落中占据优势,居于乔木层上层,对资源的竞争能力不断增强,从而受到的竞争压力减弱。

大别山五针松的结实率较低且种子的败育率较高,加上动物的捕食及虫害的影响,野外少有种子萌发。荫蔽的林下环境难以成苗,因而,群落中幼树极为少见,现存种群多为成年个体,种群的龄级结构很不完整。根据大别山五针松种内和种间研究结果及天然林缺乏幼苗幼树的现状,应及时对大别山五针松的天然林采取人工抚育等措施。因大别山五针松幼苗喜光,所以应适当开辟林窗促使幼苗幼树的形成或选择适当地点移栽幼苗,以达到扩大这一种群的目的;另根据对象木胸径与竞争强度及模型预测结果,在大别山五针松胸径达到25cm之前,应采取择伐竞争力强的竞争木,如短柄枹、黄山松和满山红等,以促使其获得较大的生存空间和充足的光、温、水等资源,减少竞争木对生存空间和有限资源的占用,促使中小径级个体的正常生长,促进天然林的更新,以达到保护这一珍稀濒危物种的目的。

致谢:感谢蒲军保、周连柱、王玲俐、程雪飞、蒋阿敏、殷英等同学对野外工作的帮助。

参考文献(References):

- [1] Weiner J. Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 1990, 5(11): 360-364.
- [2] Yokozawa M, Kubota Y, Hara T. Effects of competition mode on spatial pattern dynamics in plant communities. *Ecological Modelling*, 1998, 106(1): 1-16.
- [3] Mackenzie A, Ball A, Virdee S. *Instant Notes in Ecology*. 2nd ed. UK: Bios Scientific Publishers Ltd., 1998.
- [4] 孙嘉男, 王孝安, 郭华, 王世雄. 黄土高原栎松群落优势乔木树种的竞争关系. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2162-2167.
- [5] Cortini F, Comeau P G. Evaluation of competitive effects of green alder, willow and other tall shrubs on white spruce and lodgepole pine in Northern Alberta. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(1): 82-91.
- [6] Filipescu C N, Comeau P G. Competitive interactions between aspen and white spruce vary with stand age in boreal mixedwoods. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247(1/3): 175-184.
- [7] Bella I E. A new competition model for individual trees. *Forest Science*, 1971, 17(3): 364-372.
- [8] 吴巩固, 王政权. 水曲柳落叶松人工混交林中树木个体生长的竞争效应模型. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 646-650.
- [9] Schoener T W. Field experiments on interspecific competition. *The American Naturalist*, 1983, 122(2): 240-279.
- [10] 张欣, 杨淑贞, 赵明水, 李令键, 刘亮, 陈小勇. 天目山自然保护区柳杉种群种内和种间竞争. *农村生态环境*, 2004, 20(4): 1-5.
- [11] 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.
- [12] 宋保伟, 张宗勤, 宋西德, 刘磊. 中国红豆杉种内和种间竞争关系的研究. *西北林学院学报*, 2009, 24(3): 12-16.
- [13] 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.
- [14] Dhima K V, Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dordas C A. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio. *Field Crops Research*, 2007, 100(2/3): 249-256.
- [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] 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.
- [17] 蒋国梅, 孙国, 张光富, 王剑伟. 濒危植物宝华玉兰种内与种间竞争. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 201-206.
- [18] 李帅锋, 刘万德, 苏建荣, 郎学东, 张志钧. 滇西北金沙江流域云南红豆杉群落种内与种间竞争. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 33-38.
- [19] 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. *植物研究*, 2004, 24(1): 53-58.
- [20] 张池, 黄忠良, 李炯, 史军辉, 李林. 黄果厚壳桂种内与种间竞争的数量关系. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 22-26.
- [21] 张莉, 陆畅, 李晓红, 王磊, 张小平. 皇藏峪自然保护区青檀种群年龄结构及种内、种间竞争. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2012, 30(1): 34-40.
- [22] 王传贵, 柯曙华. 大别山五针松木材结构与材性. *南京林业大学学报*, 1997, 21(3): 51-54.
- [23] 王爱华, 王传贵, 柯曙华, 李婷. 大别山五针松木材主要解剖特征及其变异研究. *安徽农业大学学报*, 2004, 31(2): 173-177.
- [24] 段仁燕, 王孝安. 植物邻体干扰的研究范畴、热点及意义. *西北植物学报*, 2004, 24(6): 1138-1144.
- [25] 孙澜, 苏智先, 张素兰, 严贤春, 邹利娟. 马尾松-川灰木人工混交林种内、种间竞争强度. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1274-1278.
- [26] 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.
- [27] Laungani R, Knops J M H. Species-driven changes in nitrogen cycling can provide a mechanism for plant invasions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(30): 12400-12405.
- [28] 马世荣, 张希彪, 郭小强, 王东. 子午岭天然油松林乔木层种内与种间竞争关系研究. *西北植物学报*, 2012, 32(9): 1882-1887.