

杉木 - 闽楠混交林林分结构与生产力功能耦合关系研究

王奕茹, 李际平, 曹小玉, 李琪媛

(中南林业科技大学 林学院, 长沙 410004)

摘要:为了研究林分结构与生产力功能之间的关系, 探讨确定杉木 - 闽楠混交林的合理林分结构, 为维持群落结构稳定和提高林木生产力提供依据。以湖南省永州市金洞林场杉木 - 闽楠混交林为研究对象, 利用获取的调查数据, 运用主成分分析方法, 分析平均胸径、平均高、郁闭度、混交度等林分结构因子与生产力功能间的耦合作用。建立林分结构与功能的耦合关系模型, 对林分结构和生产力功能进行分析, 结果表明, 林分结构因子与生产力功能密切相关。生产力综合评价指数较高的林分具有的特征为: 中等密度 (1 500 株/hm²)、郁闭度为 0.7 左右、林层结构为复层林。这种结构特征有利于保持较好的生产力功能, 是金洞林场杉木 - 闽楠混交林的最佳林分结构。

关键词:杉木 - 闽楠混交林; 林分结构; 生产力功能; 主成分分析; 耦合

中图分类号:S791.27; S718.54 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-6622(2019)02-0054-06

DOI:10.13466/j.cnki.lyzygl.2019.02.008

Study on the Coupling Relation between Stand Structure and Productivity Function of Chinese Fir and *Phoebe bournei* Mixed Forest

WANG Yiru, LI Jiping, CAO Xiaoyu, LI Qiyuan

(College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: This paper aims to study the relationship between stand structure and productivity function, determine the rational stand structure of Chinese fir and *Phoebe bournei* mixed forest, and to provide the basis for maintaining the stability of community structure and improving forest productivity. With the mixed forest of Chinese fir and *Phoebe bournei* in Jindong Forestry Farm of Yongzhou City, Hunan Province as the research object, the coupling effects between stand structural factors such as average DBH, average height, canopy closure and mingling intensity and productivity function were analyzed by using the survey data and principal component analysis method. The coupling relationship model of stand structure and function was established, and the structure and productivity function of stand were analyzed. The results showed that the stand structure factors were closely related to productivity function. The stand with high productivity comprehensive evaluation index has the following structural characteristics: medium density (1 500 trees/hm²), canopy closure of about 0.7, and multi-layer forest structure which is conducive to maintaining better productivity function and is the best stand structure of Chinese fir-*Phoebe bournei* mixed forest in Jindong Forest Farm.

Key words: Chinese fir and *Phoebe bournei* mixed forest, stand structure, productivity function, principal component analysis, coupling

收稿日期: 2019-01-19; 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 全国森林经营科技支撑科研专项(169201531-6); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B449);

中南林业科技大学研究生科技创新基金资助项目(20183004)

作者简介: 王奕茹(1994-), 女, 辽宁凤城人, 在读硕士, 主要从事森林经理学方面的研究。Email: 1071065226@qq.com

通讯作者: 李际平(1957-), 男, 湖南醴陵人, 教授, 博导, 主要从事林业系统工程方面的研究。

Email: lijiping@vip.163.com

耦合是近年来应用频率较高的专业术语之一,已逐渐应用于农业、生物学、生态学和地理学的研究。将耦合引入到林业研究领域具有重要的创新意义,它强调了因素之间深层次的关系^[1],为揭示森林系统的协同作用和制约关系提供了理论依据。

森林具有复杂的结构和功能,森林功能的发挥很大程度上取决于森林的结构是否合理。林分结构是林木个体生长发育空间的决定性因素,直接影响林分稳定性、林木质量、健康状况及林分生产力功能,是森林经营过程中最可能调节的因素^[2],因此,优化林分结构是培育多功能森林的重要途径^[3]。合理的林分结构,既有利于林木个体获取充分的生长发育条件,又能实现土地和空间的最大限度利用,还具有培育优良干形、提高产量和提升木材品质等重要意义。

目前,国内很多学者对林分结构与功能的耦合关系进行了研究,但多数是对林分非空间结构或空间结构与功能进行研究^[4],综合分析林分空间结构和非空间结构与林分功能之间的耦合关系的研究鲜见报道。对于林分结构与水源涵养功能^[5-7]、固碳功能^[8]、土壤养分^[9-10]等耦合关系的研究较多,但尚未对林分结构和生产力功能的耦合关系进行研究。

闽楠(*Phoebe Bournei*),又称桢楠,樟科常绿树种,是国家二级重点保护植物^[11],是我国珍贵用材与优质观赏树种。由于其经济价值高,使用广泛,天然林受到严重的破坏,因而,对闽楠人工林的研究尤其重要。目前,关于楠木人工林的研究很少,就楠木林分结构与功能方面的研究更为不足,尤其缺乏相关的实地调查研究。因此,本研究以杉木-闽楠人工混交林为研究对象,通过主成分分析法研究林分结构与生产力功能之间的关系,建立耦合关系模型,通过对杉木-闽楠混交林林分结构特征与生产力功能进行分析,以期为杉木-闽楠混交林可持续经营及合理经营密度提供参考。

1 研究区概况

湖南省永州市金洞林场位于祁阳县南面,位于湘江流域上游,地理坐标为北纬 $26^{\circ}2'10'' \sim 26^{\circ}21'$

$37''$,东经 $110^{\circ}53'43'' \sim 112^{\circ}13'37''$ 。境内山体密集、坡度陡峭,平均坡度 34° ,最高海拔 $1\,435\text{m}$,最低海拔 108m 。林场内土壤主要为黄红壤和黄壤,土层厚度一般在 60cm 以上^[12],石块沙砾含量大致在 $20\% \sim 30\%$ 之间,平均土壤有机物含量在 2% 以上。属中亚热带的东南季风湿润气候区,年平均气温为 18°C ,相对湿度 $75\% \sim 82\%$,全年无霜期 $265 \sim 349\text{d}$,植被大概有 $281 \sim 301\text{d}$ 生长期, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为 $4\,705 \sim 5\,725^{\circ}\text{C}$ ^[13]。

该林场内的物种多样,共有植物资源 135 科 972 种。至今保存的木本植物有 794 种,分为 90 科 290 属。根据调查,现有高等植物 200 多科, $1\,500$ 余种。其中有木本植物 98 科 654 种。目前尚存的国家重点保护 I 级植物有银杏(*Ginkgo biloba*)、南方红豆杉(*Taxus chinensis*)等,国家 II 级保护植物有樟树(*Cinnamomum bodinieri*)、黄杉(*Pseudotsuga sinensis*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、闽楠、杜仲(*Eucommia ulmoides*)等。该地有陆生脊椎动物 190 余种,其中属于国家重点保护动物的有 31 种,例如林麝(*Moschus berezovskii*)、白颈长尾雉(*Syrnaticus ellioti*)、云豹(*Neofelis nebulosa*)等。

2 材料与方法

2.1 样地设置与调查

在研究区内选择立地条件基本一致、林相整齐、具有代表性的杉木-闽楠混交林,共设置 9 块大小为 $20\text{m} \times 30\text{m}$ 的标准地,用相邻网格法,将每块标准地划分为 6 个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的小样格。样地基本调查因子包括海拔、坡度、坡位、坡向、土壤类型、土层厚度,林木的 X, Y 坐标、乔木树种组成、年龄、株数、胸径、树高、冠幅、郁闭度、枝下高等因子(表1)。

2.2 研究方法

2.2.1 耦合关系因子的确定

选取林分混交度、角尺度、大小比数作为林分空间结构指标^[14],选取平均胸径、平均高、枝下高、郁闭度、林分密度指数、树种组成作为林分非空间结构指标。所选两类指标代表林分结构与生产力功能的耦合关系因子。

表1 标准地基本情况
Tab. 1 Statistics of sampling plots

样地编号	坡度/(°)	海拔/m	平均胸径/cm	平均树高/m	枝下高/m	郁闭度	株数密度/hm ²
1	23	150	11.9	7.5	2.2	0.65	1167
2	15	140	11.8	8.1	2.8	0.75	1217
3	20	130	13.3	8.9	2.8	0.7	1500
4	20	120	10.4	7.1	2.6	0.75	2433
5	14	135	10.4	8.4	3.1	0.85	2617
6	20	130	7.6	6.5	1.5	0.8	2517
7	16	120	9.5	7.7	3.7	0.85	2500
8	15	120	9.9	6.8	1.9	0.8	1917
9	34	135	8.3	5.5	1.2	0.8	2067

2.2.2 生产力功能计算

在本研究中,采用了乔木的木材生产功能来代替林分的生产力功能,将活立木蓄积量作为林分生产力功能的指标^[15]。活立木蓄积是指样地中存活的林木树干部分的材积量,可以根据湖南省和全国常见树种的二元材积模型计算。主要树种二元立

木材积模型如表2所示。

2.3 数据处理及分析

采用 SPSS 19.0 软件,运用主成分分析法,通过降维从众多因子中找出主要的影响因子,用较少的林分结构变量来衡量林分的生产力功能,以此来研究林分结构与生产力功能之间的耦合关系。

表2 主要树种二元立木材积模型
Tab. 2 Two-dimensional volume model of main trees

树种	公式	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
杉木	$V = aD^bH^c$	0.000058777042	1.969983	0.896462
其他针叶	$V = aD^bH^c$	0.000062341803	1.85515	0.956825
一类硬阔	$V = aD^bH^c$	0.000068563400	1.933221	0.867885
二类硬阔	$V = aD^bH^c$	0.000050479055	1.88452	0.990765
软阔	$V = aD^bH^c$	0.000041028005	1.80063	1.130599

注: *V* 表示材积,单位 m³; *D* 表示胸径,单位 cm; *H* 表示树高,单位 m; *a*, *b*, *c* 表示参数。

3 结果与分析

3.1 主成分提取与表达

将代表林分结构因子的平均胸径、平均高、枝下高、郁闭度、林分密度指数、混交度、角尺度、大小比数、树种组成这9个指标中的属性数据转换为数值型数据,将数据标准化,消除数量级和量纲的影响,结果如表3所示。然后,计算其相关矩阵,结果如表4所示。

由各个因子的相关系数可知,林分结构因子

间存在一定的相关性,各个因子相互作用,相互影响。因而,应使用因子分析来将信息简化,筛选出影响林分结构和功能的代表性因子。通过主成分因子分析法计算每个主成分因子的特征值和贡献率(表5)。由表5可知,前3个主成分的样本方差累积贡献率为86.806%,大于80.00%,符合主成分提取原则,因此,这3个主成分因子能够代表所研究的杉木-闽楠混交林的林分结构特征。另外,各主成分因子的代表变量,即主成分体现的结

构因子的信息,可以从因子载荷矩阵表中(表6)获得。由表6的各因子载荷的绝对值可知,第1主成分在林分的平均胸径、混交度、角尺度、大小比数指标上有较大载荷,它们的载荷分别为0.937, -0.838, 0.805, 0.739, 可将它定义为林木空间结

构指标;第2主成分在林分的密度指数、枝下高、平均高指标上有较大载荷,它们的载荷分别为0.879, 0.861, 0.643;第3主成分因子主要反映了林分的树种组成和郁闭度特征,它们的载荷分别为0.663, 0.420。

表3 数据标准化处理

Tab. 3 Data quantitative processing

标准化值	林分结构因子				
	郁闭度	混交度	角尺度	大小比数	树种组成
3	<0.6	[0, 0.25)	>0.517	[0.75, 1]	混交林
2	>0.8	[0.25, 0.75)	<0.475	[0.25, 0.75)	相对纯林
1	[0.6, 0.8]	[0.75, 1]	[0.475, 0.517]	[0, 0.25)	混交林

表4 林分结构因子相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of structure factors

因子	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
胸径 X ₁	1.000								
树高 X ₂	0.800	1.000							
枝下高 X ₃	0.461	0.760	1.000						
郁闭度 X ₄	-0.671	-0.221	0.186	1.000					
密度指数 X ₅	0.298	0.584	0.658	0.255	1.000				
混交度 X ₆	-0.706	-0.462	-0.076	0.656	0.187	1.000			
角尺度 X ₇	0.580	0.313	-0.019	-0.533	-0.086	-0.869	1.000		
大小比数 X ₈	0.591	0.378	0.090	-0.394	-0.227	-0.629	0.721	1.000	
树种组成 X ₉	-0.637	-0.301	-0.024	0.736	-0.213	0.300	-0.468	-0.416	1.000

注: X₁ 表示平均胸径; X₂ 表示平均高; X₃ 表示枝下高; X₄ 表示郁闭度; X₅ 表示林分密度指数; X₆ 表示混交度; X₇ 表示角尺度; X₈ 表示大小比数; X₉ 表示树种组成。

表5 主成分特征值及贡献率

Tab. 5 Eigenvalues of each principal component and contribution rate

成分	特征值	贡献率	累计贡献率
1	4.375	48.613	48.613
2	2.405	26.724	75.337
3	1.032	11.470	86.806
4	0.522	5.796	92.602
5	0.438	4.866	97.469
6	0.165	1.828	99.297
7	0.058	0.646	99.943
8	0.005	0.057	100.000
9	-2.916E-18	-3.240E-17	100.000

表6 因子载荷矩阵表

Tab. 6 Component Matrix

结构因子	成分		
	1	2	3
X ₁	0.937	0.220	-0.090
X ₂	0.696	0.643	0.132
X ₃	0.310	0.861	0.207
X ₄	-0.730	0.428	0.420
X ₅	0.135	0.879	-0.252
X ₆	-0.838	0.275	-0.330
X ₇	0.805	-0.318	0.239
X ₈	0.739	-0.251	0.345
X ₉	-0.686	0.078	0.663

注: X₁ 表示平均胸径; X₂ 表示平均高; X₃ 表示枝下高; X₄ 表示郁闭度; X₅ 表示林分密度指数; X₆ 表示混交度; X₇ 表示角尺度; X₈ 表示大小比数; X₉ 表示树种组成。

表7 因子得分系数矩阵

Tab. 7 Component score coefficient matrix

结构因子	成分		
	1	2	3
X_1	0.214	0.091	-0.087
X_2	0.159	0.267	0.127
X_3	0.071	0.358	0.201
X_4	-0.167	0.178	0.407
X_5	0.031	0.366	-0.244
X_6	-0.192	0.114	-0.320
X_7	0.184	-0.132	0.232
X_8	0.169	-0.104	0.334
X_9	-0.157	0.032	0.642

注: X_1 表示平均胸径; X_2 表示平均高; X_3 表示枝下高; X_4 表示郁闭度; X_5 表示林分密度指数; X_6 表示混交度, X_7 表示角尺度; X_8 表示大小比数; X_9 表示树种组成。

3.2 耦合关系模型构建

根据对林分结构特征的分析结果,将其与林分生产力功能指标对应,运用 SPSS 19.0 采用 Pearson 检验法进行结构因子与功能指标的相关性分析,并对其进行模型拟合。

根据林分结构因子与林分生产力功能的特点,选择线性模型拟合林分结构与生产力功能之间的关系,表达式如下:

$$A = m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_nx_n \quad (1)$$

式中: A 为因变量; x_1, x_2, \dots, x_n 为自变量; m_1, m_2, \dots, m_n 为自变量系数。

可以从因子得分系数矩阵(表7)获得自变量系数 m 的值,并且可以基于因子得分系数和原始变量的观测值来计算出各个样地在3个主成分上的得分,如式(2)~(4)式所示:

$$F_1 = 0.214X_1 + 0.159X_2 + 0.071X_3 - 0.167X_4 + 0.031X_5 - 0.192X_6 + 0.184X_7 + 0.169X_8 - 0.157X_9 \quad (2)$$

$$F_2 = 0.091X_1 + 0.267X_2 + 0.358X_3 + 0.178X_4 + 0.366X_5 + 0.114X_6 - 0.132X_7 - 0.104X_8 + 0.032X_9 \quad (3)$$

$$F_3 = -0.087X_1 + 0.127X_2 + 0.201X_3 + 0.407X_4 - 0.244X_5 - 0.320X_6 + 0.232X_7 + 0.334X_8 + 0.642X_9 \quad (4)$$

3.3 因子得分综合分析

每个主成分因子的权重(主成分特征值)和因子得分乘积之和便是主成分因子综合得分(F),即林分的生产力功能指数,表达式如下:

$$F = \frac{\lambda_1 \times F_1 + \lambda_2 \times F_2 + \lambda_3 \times F_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (5)$$

式中: $\lambda_1 = 4.375, \lambda_2 = 2.405, \lambda_3 = 1.032$ 。

通过建立的林分结构与功能模型可以计算出9个样地的生产力功能指数。为方便样地等级划分,将各样地的主成分因子综合得分值 F 进行标准化。标准化后的值用 P 表示, P 即为评价指数,范围在0~100之间。其标准化公式为:

$$P_i = \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \times 100 \quad (6)$$

式中: F_i 表示第 i 个样地的生产力功能综合评价价值; F_{\min} 表示样地生产力功能的最小综合评价价值; F_{\max} 表示样地生产力功能的最大综合评价价值。

利用分析评价结果构建的公式计算样地主成分综合评价指数 P ,根据综合评价指数 P 和蓄积量的关系散点图(图1)可以看出,它们之间的关系可以用线性函数表达,其相关系数为0.8288($P < 0.05$)。

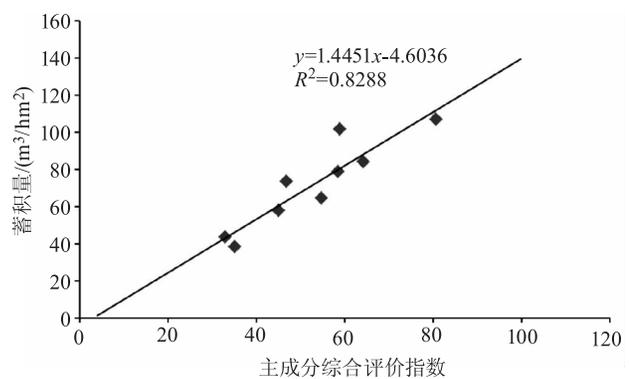


图1 主成分综合评价指数与蓄积量相关关系散点图

Fig. 1 scatter plot of principal component comprehensive evaluation index and stock volume

通过9个样地功能评价价值 P 的计算结果可知:生产力功能评价价值最高达80.8分(1个样地),主林层是杉木(*Cunninghamia lanceolata*)与闽楠,次林层为木荷(*Schima superba*)、香樟(*Cinnamomum cam-*

phora)、红豆杉等树种,林分结构合理;生产力功能综合评价在60~79分的样地有1个,主要优势树种是闽楠、木荷;生产力功能综合评价在40~59分的样地有5个;生产力功能综合评价在20~39分的样地有2个。

4 结论与讨论

研究结果表明,运用主成分分析研究林分生产力功能与结构因子的关系是可行的。通过寻找影响林分生产力功能的主要结构因子,通过降维将代表林分结构的9个因子简化为3个,从分析结果看,影响林分生产力功能的结构指标可以归并为林木生长和空间分布格局、林木拥挤程度、乔木多样性3个方面。其中林木生长和空间分布格局的贡献率最高,对林分生产力功能的影响最大。

影响林分生产力功能的因子是多方面的,生产力功能的大小是由多个因子相互作用、共同影响的结果,这由森林生态系统所具有的复杂结构和功能特征决定的。为了最大限度地发挥林分生产力,就要确保林分结构的合理性,只有结构合理才能正常发挥其功能^[16]。研究区可以制定科学的经营管理措施,调整林分结构,最大限度地发挥其经济效益。

本研究以金洞林场杉木-闽楠混交林为研究对象,建立了林分结构与生产力功能的耦合关系模型,利用模型计算出各样地主成分综合评价指数 P 。从 P 与生产力功能(蓄积量)之间的关系散点图(图1)可知,两者具有显著相关关系,其中,综合评价指数最高的样地,其蓄积量也最高;生产力综合评价指数较高的林分,其密度约为1500株/hm²、郁闭度为0.7左右、林层结构为复层林(该类型林分有利于保持较稳定的林分结构特征和较高的生产力功能,是金洞林场杉木-闽楠混交林的最佳林分结构)。

本研究中,在构建林分结构与生产力功能的耦合关系模型时,选择了与林分生产力功能密切相关的9个结构指标,但选择的指标可能不够全面,林

地的土壤养分、土层厚度等也可能对林木生产力产生影响,因此,今后的研究还需进一步探讨。本研究采用了线性模型表达林分结构与功能之间的关系,非线性模型是今后研究的方向之一。

参考文献:

- [1] 于明含,孙保平,胡生君,等. 退耕还林地结构与生态功能的耦合关系[J]. 生态学报,2014,34(17):4991-4998.
- [2] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势[J]. 林业科学,2010,46(1):117-122.
- [3] 张会儒. 森林多功能经营有关问题探讨[C]//中国林业青年科技论坛论文摘要集. 北京:中国林学会,2011.
- [4] 胡园杰,李际平,曹小玉,等. 杉木林改造后空间结构与水源涵养功能动态变化及其关系[J]. 中南林业科技大学学报,2018(11):103-109.
- [5] 罗梅,王威,宗雪,等. 水源涵养林结构与功能耦合关系模型研究——以北京山区水源涵养林为例[J]. 林业资源管理,2011(5):84-88.
- [6] 蒋桂娟,郑小贤,宁杨翠. 林分结构与水源涵养功能耦合关系研究——以北京八达岭林场为例[J]. 西北林学院学报,2012,27(2):175-179.
- [7] 孟楚,王琦,郑小贤. 北京八达岭林场水源涵养林结构与功能耦合机理研究[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(3):69-72.
- [8] 王秀云,宋绪忠,徐晓云,等. 林分结构与固碳功能的耦合关系模型研究[J]. 浙江林业科技,2017,37(3):43-47.
- [9] 严宏,谭伟,柴宗政,等. 黔中马尾松成熟林表层土壤养分与林分结构的异质性及其耦合关系[J]. 福建农林大学学报:自然科学版,2018,47(3):304-312.
- [10] 冯宜明,李毅. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质[J]. 林业科学,2018,54(10):20-30.
- [11] 郑万钧. 中国树木志[M]. 北京:中国林业出版社,1983:795-797.
- [12] 黄笑,李际平,赵春燕,等. 不同林分类型闽楠人工林土壤养分对比分析[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(7):36-42.
- [13] 石乐. 金洞林场闽楠人工林目标树密度及生长特征研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017.
- [14] 曹小玉,李际平. 林分空间结构指标研究进展[J]. 林业资源管理,2016(4):66-73.
- [15] 黄笑. 金洞林场闽楠人工林林分结构与多功能研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017.
- [16] 王维芳. 天然白桦林林分结构及优化经营的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,1997.