

文章编号: 1008- 2786- (2009) 3- 257- 08

应用层次分析法评价闽西北山地马尾松-阔叶树混交林的综合效益

樊后保^{1, 2}, 刘文飞^{*}, 李燕燕¹, 廖迎春¹, 苏兵强³

(1. 南昌工程学院生态与环境科学研究所, 江西南昌 330099 2. 福建农林大学林学院, 福建福州 350002
3. 福建省国有林场管理局, 福建福州 353003)

摘要: 在 25 a 生的马尾松林下分别套种 1 a 生的火力楠、闽粤栲、苦槠、格氏栲、青栲和拉氏栲幼苗, 经过 16 a 的培育后形成了郁闭的针阔混交异龄林, 分别以马-火 (Pm-Mm)、马-闽 (Pm-Cf)、马-苦 (Pm-Cs)、马-格 (Pm-Ck)、马-青 (Pm-Cm)、马-拉 (Pm-Cl) 表示。对上述 6 种混交林的蓄积量、生物量、凋落物、物种多样性、土壤肥力等 10 个指标进行分析和综合, 以揭示混交林的经济效益、生态效益和地力维持。在此基础上, 应用层次分析法 (AHP) 确定各指标的权重, 构建多目标决策模型, 对混交林综合效益进行了评价。根据综合评价价值的大小, 各混交林的优劣顺序为: 马-闽[→]马-苦[→]马-拉[→]马-青[→]马-格[→]马-火, 从而为马尾松混交模式的选择提供科学依据。

关键词: 马尾松-阔叶树混交林; 层次分析法; 多目标决策模型; 综合效益

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 是我国南方的主要用材树种, 具有适应性强、用途广、速生丰产等优点。然而, 随着马尾松造林面积的迅速扩大, 单一针叶纯林的弱点逐渐暴露出来, 主要表现为: 立地衰退日益明显, 松毛虫危害严重, 火灾频率增加, 林分产量低^[1]。实践研究表明, 大力营造混交林, 可以增加森林生态系统中生物类群的多样性、多层性, 就能从根本上改善林分的生态环境, 提高生产力^[2, 3]。而将现有的纯林改造成混交林则显得更为迫切和实际, 因为在纯林下套种阔叶树为修复这些脆弱生态系统提供了一条有效途径。

我国已开展了大量有关马尾松混交林的生态学研究。研究结果表明: 混交林较之于纯林能改善光照条件, 有利于光合作用, 能有效维持地力, 使土壤理化性质得到了明显的改善, 而且促进了林木的速

生优质丰产^[4-10]。然而, 不同的混交模式在维持地力, 增加产量和改善生态环境, 提高系统的多样性和稳定性等方面互有优劣。为此, 福建农林大学莘口教学林场自 20 世纪 80 年代中期以来, 开展了在马尾松林下套种阔叶树种的试验研究, 目前已形成了多种针阔混交异龄林经营模式。为进一步探讨各混交模式的生态、经济和社会效益, 结合作者多年来对马-阔混交林的研究成果, 利用多层次分析法对马尾松与 6 种阔叶树的混交模式进行综合评判, 揭示不同混交模式的生态系统的功能特征, 为马尾松人工林的可持续经营提供理论基础。

1 研究地概况

试验地位于福建三明福建农林大学莘口教学林

收稿日期 (Received date): 2008- 10- 03; 改回日期 (Accepted): 2008- 12- 31。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (30370259)、江西省自然科学基金资助项目 (0630101) 及福建省自然科学基金重点资助项目 (B0320001)。 [The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (30370259; 30771714), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (0630101) and Key Project of Natural Science Foundation of Fujian Province (B0320001).]

作者简介 (Biography): 樊后保 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事森林生态系统养分循环和生产力研究。 [Fan Houbao Ph. D., Professor of Plant Ecology, currently engaged in nutrient cycling and productivity of forest ecosystems.] E-mail: hbfan@nit.edu.cn

* 通讯作者: 刘文飞 (1979-), [Corresponding author: Liu Wenfei (1979-).] E-mail: liuw@126.com

场。本区处武夷山东伸支脉,属中亚热带海洋性季风气候,年平均气温 19.1℃,年降水量 1 741 mm,年均相对湿度 81%。试验地位于该林场的沙阳工区,海拔在 190~ 210 m 之间,土壤为粉砂岩发育的山地红壤。

2 研究方法

2.1 试验林的建立

莘口教学林场于 20 世纪 80 年代开展了在马尾松林下套种阔叶树种的培育试验,建立了多种混交林经营模式。1984 年,在立地条件基本一致的南坡上(坡度 25°~ 30°),选择最后一次间伐后密度约为 570 株 /hm² 的马尾松纯林作为实验对象。先将林下植被劈净,挖 60 cm × 30 cm × 40 cm 的暗穴,套种

1 a 生阔叶树种幼苗。套种树种包括火力楠 (*Mitchelia macclurei*)、闽粤栲 (*Castanopsis fissu*)、苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*)、格氏栲 (*Castanopsis kawakamii*)、青栲 (*Cyclobalanopsis myrsinaefolia*) 和拉氏栲 (*Castanopsis lamontii*),初始套种密度为 1 200 ~ 1 500 株 /hm²。套种后前 3 a 每年块状锄草 1 至 2 次,第 4 第 5 a 分别劈草一次。在上述 6 种马阔混交林分及对照的马尾松纯林内,选择立地条件基本一致的林分设立 20 × 20 m 的固定样地,开展了为期 3 a (1999~ 2001) 的定位研究。为表达方便,马尾松与上述阔叶树混交所形成的林分在本文中分别简称为马-火 (Pm - Mm)、马-闽 (Pm - Cf)、马-苦 (Pm - Cs)、马-格 (Pm - Ck)、马-青 (Pm - Cm)、马-拉 (Pm - Cl),各林分类型的主要林分因子见表 1。

表 1 各混交林的主要立地和林分特征

Table 1 Major site and stand features of the six mixed forests

林分类型	林分年龄 (a)		林分密度 (n/ hm ²)		平均胸径 (cm)		平均树高 (m)	
	马尾松	阔叶树	马尾松	阔叶树	马尾松	阔叶树	马尾松	阔叶树
马-火 Pm - Mm	41	16	475	1100	25.6	9.4	21.1	9.1
马-闽 Pm - Cf	41	16	450	1094	28.5	12.3	23.0	15.6
马-苦 Pm - Cs	41	16	483	767	26.6	10.8	21.5	9.8
马-格 Pm - Ck	41	16	417	815	27.0	12.4	19.4	10.1
马-青 Pm - Cm	41	16	504	756	27.2	10.7	20.6	11.0
马-拉 Pm - Cl	41	16	440	602	27.0	11.7	19.5	9.6

注: 2000 年测定

2.2 森林地被物和年凋落物量的收集

在上述 6 个林分内,每样地分别设置 10 个面积为 1 m × 1 m 的小样方。在样方内,用手检出最上层肉眼可以辨别各组分的所有林地上的凋落物,视为 L 层,同时收集其下层的凋落物分解残余物,此即为 H 层。对于凋落物,在每样地内设置 10 个口径为 80 cm × 100 cm 的塑料网以收集凋落物,于监测期间 (1999~ 2001 年) 每月收集 1 次。将收集的地被物和凋落物按树种分为叶、枝、皮、果 (包括花、果实、种子等) 及其他。然后将各组分于 80℃ 恒温条件下烘干 48 h 后称重供化学分析。

2.3 蓄积量和生物量的测定

根据每木检尺结果,计算每种林分类型各树种的平均树高和胸径,根据树干解析法计算蓄积量。其中阔叶树采用分层平均标准木法,每样地选择 3 株标准木;而马尾松则采用平均标准木法,每样地选

择 1 株平均胸径大小的标准木。对地上部分,将标准木砍倒后以 1 m 为区分段作树干解析,并按 1 m 区分段分别树干、树皮、枝、叶当场称其鲜重,带回实验室进行烘干至恒重。对地下部分,以干基为中心,取营养面积大小的圆作为其调查范围,按其深度划分为: 0~ 20 cm、20~ 40 cm、40~ 60 cm、> 60 cm 4 层,分层挖出所有根系,按细根 (根径 $d \leq 0.2$ cm)、中根 (0.2 cm $\leq d \leq 2.0$ cm)、粗根 ($d > 2.0$ cm) 及根桩称其鲜重,并对各部分取样测其干重,各部分样品带回实验室保存,供化学分析。

在标准地内沿对角线均匀设置 5 个 1 m × 1 m 样方,统计调查样方内所有灌木和草本植物的种类、数量、高度、多度等,割取地上部分,挖取地下部分所有根系分别称其鲜重,并取样带回实验室测其烘干重,保存样品供化学分析。

2.4 植被和土壤的化学分析

测定土壤(每 1 标准地内按 S 形布点方法, 挖取 5 个土壤剖面, 分 0~ 20 cm、20~ 40 cm、40~ 60 cm 等 3 个层次取样)、林木样品、凋落物及森林地被物样品中主要营养元素(N、P、K、Ca、Mg)的含量, 其中 N 用半微量凯氏法测定, P 用钼兰比色法测定, K、Ca、Mg 用原子吸收分光光度法测定。

土壤 pH 值用 D-14 型 pH 计测定; 交换性酸和交换性铝用氯化钾交换-中和滴定法; 有机质用重铬酸钾氧化法; 全 N 用半微量开氏法, 全 P 用钼蓝比色法, 全 K 用火焰光度法, 全 Ca 和全 Mg 用原子吸收分光光度法; 碱解氮用碱解扩散法; 速效磷用盐酸氟化铵-钼锑抗比色法; 速效钾用原子吸收分光光度法; 交换性盐基离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、CEC)和交换性 Al³⁺ 用原子吸收分光光度法测定。植物和土壤样品的具体分析方法见《土壤农业化学分析方法》^[11]。

土壤养分储量是指土壤主要养分元素(N、P、K、Ca、Mg)的总储量, 计算方法如下(以 N 储量为例)

$$SNVS = \sum BD_i \times C_i \times d_i \times 10000$$

式中 SNVS 为土壤 N 储量(kg/hm²), BD_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³), C_i 为第 i 层土壤全 N 含量(g/kg), d 为第 i 层土壤深度(m)。其他养分元素的计算与此相同。

土壤盐基饱和度的计算公式

$$\text{盐基饱和度}(\%) = \frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{2}Mg^{2+} + K^+ + Na^+ / CEC \times 100$$

式中 $\frac{1}{2}Ca^{2+} + \frac{1}{2}Mg^{2+} + K^+ + Na^+$ 为测得的交换性盐基离子之和, mol/kg CEC 为阳离子交换量, mol/kg

2.5 评判模型的建立

2.5.1 层次分析法

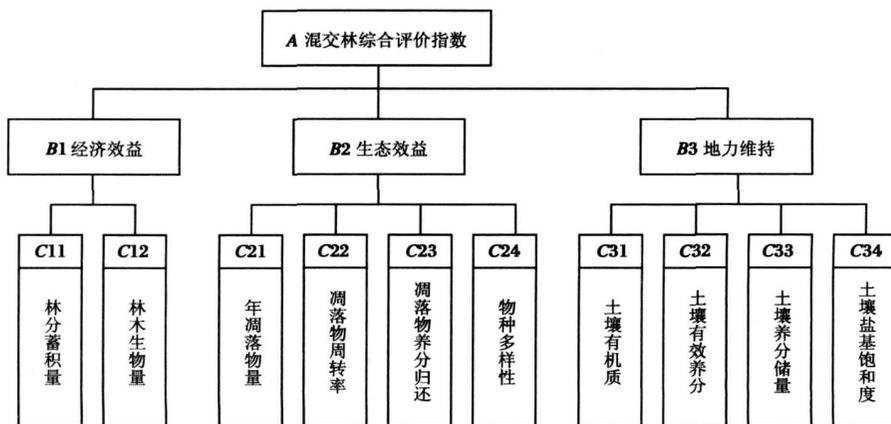


图 1 混交林效益综合评价层次结构模型

Fig. 1 Model of hierarchical structure set for comprehensive evaluation on functions of the mixed forests

利用 T. L. Saaty(1980)^[12] 提出的层次分析法, 建立各混交模式的综合评价体系(图 1)。本文的准则层由经济效益、生态效益和地力维持等 3 个因子组成, 然后分别选择其对应的指标层因子。

2.5.2 评判因子权重的确定

通过组织 26 位同行专家, 对混交林经济效益、生态效益和地力维持(土壤养分与盐基饱和度)等因子进行评价和权重打分, 按照层次结构关系分别构建出 A-B、B-C 的判别矩阵, 然后计算出矩阵的最大特征根 λ_{max} 及其对应的特征向量 W(权重)(表 2)。标准化数据均采用混交林的实测值, 然后进行归一化处理所得。

表 2 各层次指标的权重

Table 2 The weights from Level C to Level A

B 层指标	权重	C 层指标	权重
经济效益	0.4	林木蓄积量	0.7
		生物量	0.3
生态效益	0.3	年凋落物量	0.3
		凋落物周转率	0.2
		凋落物养分归还	0.3
		物种多样性	0.2
地力维持	0.3	土壤有机质	0.4
		土壤有效养分	0.2
		土壤养分储量	0.2
		土壤盐基饱和度	0.2

2.5.3 评判方法

假设 L 层有 m 个评价项目, 每一个项目有 n 个评价因子, 其对应的权重 u_j 可以组成一个权重矩阵: $U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$ 。而对于 m 个评价项目中的 n 个评价因子, 根据实测结果和归一化转换, 可以构成一个 $m \times n$ 阶的矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$, 那么, m 个评价项目中第 i 个项目的评价值参考模糊综合评判中的做法, 可以由 A 中第 i 行元素与权重矩阵 U 中对应元素的乘积之和来决定, 由此, 第 L 层中 m 个评价项目的评价值即由 A 与 U 的乘积 $U \times A^T$ 构成。从最底层开始, 逐层向上进行, 可以实现经营模

式的多目标综合评判, 根据评判值大小就可以对混交模式的优劣进行排序。

3 结果与分析

3.1 经济效益评判

各指标的权重确定之后, 下一步的工作就是计算评价因子矩阵。本文采用混交林各指标的实测值, 然后对其进行归一化处理得到评价因子矩阵。对于经济效益的评价, 我们采用林分蓄积量和生物量 2 个指标来测度, 其实测值见表 3。

表 3 经济效益评判指标的测定值

Table 3 The measured values for each index used in the evaluation on economical benefits

指标	马-火 Pm-Mm	马-闽 Pm-Cf	马-苦 Pm-Cs	马-格 Pm-Ck	马-青 Pm-Cm	马-拉 Pm-Cl
蓄积量 (m^3/lm^2)	293.43	360.89	294.3	288.42	323.68	263.49
林分生物量 (t/lm^2)	216.41	260.06	221.92	221.65	246.13	201.04

根据上述评判方法, 对表 4 中的数据进行归一化处理, 获得了经济效益评价因子矩阵

$$U_1 = \begin{pmatrix} 0.1609 & 0.1583 \\ 0.1978 & 0.1902 \\ 0.1613 & 0.1623 \\ 0.1581 & 0.1621 \\ 0.1774 & 0.1800 \\ 0.1444 & 0.1470 \end{pmatrix}$$

那么, 各混交林经济效益 B_1 的评判值可由 $A_1 \times U_1^T$ 获得, 即

$$\begin{aligned} B_1 &= (0.7, 0.3) \times U_1^T \\ &= (0.1601 \quad 0.1955 \quad 0.1616 \\ &\quad 0.1593 \quad 0.1782 \quad 0.1452) \end{aligned}$$

从经济效益的评判值可以看出, 马尾松与闽粤栲的混交模式得分最高, 为 0.1955, 其次是马-青,

接下来是马-苦、马-火和马-格, 马-拉混交模式得分最低只有 0.1452。闽粤栲、青栲和苦槠在与马尾松混交后, 林分生产力得到明显的提高^[5], 蓄积量和生物量也相应增大, 因此这三种模式的混交效果比较好。而马拉混交模式林分生产力在其他模式中也是最小的, 导致蓄积量和生物量也最小, 经济效益也最差。

3.2 生态效益评判

森林凋落物及其在分解过程中的养分释放, 是生物地球化学循环的一个关键环节, 是森林生态系统功能的重要体现。因此, 许多有关林木养分和土壤肥力问题都与到达林地的凋落物数量、质量和分解速率有关。而林下植被物种多样性在维护生态功能稳定性、养分循环、立地指示和持续生产力方面具有独特的功能和作用, 因此, 两者的有机结合能较好

表 4 生态效益评判指标的测定值

Table 4 The measured values for each index used in the evaluation on ecological effects

林分类型	年凋落物量 (kg/lm^2)	凋落物周转速率 (a)	凋落物养分归还 ($kg/(lm^2 \cdot a)$)	物种多样性指数 a^*
马-火 Pm-Mm	7 137.3	0.870	204.95	0.814 4
马-闽 Pm-Cf	6 741.1	1.031	223.93	0.950 2
马-苦 Pm-Cs	8 041.7	1.190	304.12	0.824 6
马-格 Pm-Ck	7 151.5	0.855	288.46	0.792 3
马-青 Pm-Cm	7 533.2	0.704	213.77	0.789 8
马-拉 Pm-Cl	6 149.1	1.316	238.05	0.844 9

* 物种多样性指数 a 是指林下植被 Simpson 多样性指数。

地表征森林的生态效益 (表 4)。其中, 凋落物周转速率由年凋落物量除以林地凋落物现存量测算。

对表 4 中的数据进行归一化处理, 可获得生态效益评价因子矩阵

$$U_2 = \begin{pmatrix} 0.1669 & 0.1458 & 0.1391 & 0.1624 \\ 0.1577 & 0.1728 & 0.1520 & 0.1894 \\ 0.1881 & 0.1995 & 0.2064 & 0.1644 \\ 0.1673 & 0.1443 & 0.1958 & 0.1579 \\ 0.1762 & 0.1180 & 0.1451 & 0.1574 \\ 0.1438 & 0.2206 & 0.1616 & 0.1684 \end{pmatrix}$$

那么, 各混交林生态效益 B_2 的评判值可由 $A_2 \times U_2^T$ 获得, 即

$$B_2 = (0.3 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.2) \times U_2^T \\ = (0.1534 \ 0.1654 \ 0.1911 \ 0.1692 \\ 0.1515 \ 0.1694)$$

各混交模式的生态效益的评判值的大小顺序为 马-苦 > 马-拉 > 马-格 > 马-闽 > 马-火 > 马-青。造成这些差异的原因可能是对生态效益起贡献因子所占权重有所不同。马苦混交模式的年凋落物量和养分归还量相比其他混交模式中都是最大的, 并且这两个因子在生态效应的评判中所占权重也最

大 (0.3 0.3)。因为森林凋落物储存和养分释放, 是森林生态系统能量流动和物质循环的一个重要环节^[13-15], 对维持森林生态系统平衡起重要作用。所以, 马-苦混交模式在生态效益的评判中得分最高。

3.3 地力维持评判

地力维持指标由土壤有机质、有效养分、养分储量及盐基饱和度等因子组成, 其中有效养分包括有效 N、有效 P 和有效 K。按专家评价, 有效 N、P、K 对有效养分的权重分别为 0.4 0.3 0.3。对表 5 中的数据进行归一化处理, 可获得地力维持评价因子矩阵

$$U_3 = \begin{pmatrix} 0.1138 & 0.1410 & 0.1588 & 0.1572 \\ 0.2045 & 0.1496 & 0.1608 & 0.2066 \\ 0.2080 & 0.1961 & 0.1747 & 0.0946 \\ 0.1470 & 0.1617 & 0.1656 & 0.1798 \\ 0.1331 & 0.1570 & 0.1641 & 0.1812 \\ 0.1937 & 0.1947 & 0.1761 & 0.1805 \end{pmatrix}$$

那么, 各混交林地力维持 B_3 的评判值可由 $A_3 \times U_3^T$ 获得, 即

$$B_3 = (0.4 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2) \times U_3^T \\ = (0.1369 \ 0.1852 \ 0.1763 \ 0.1602 \\ 0.1537 \ 0.1877)$$

表 5 地力维持指标的测定值

Table 5 The measured values for each index used in the evaluation on site fertility

林分类型	土壤层次 (cm)	土壤有机质含量 (g/kg)	土壤有效养分含量 (g/kg)			土壤养分储量 (kg/ha)	土壤盐基饱和度 (%)
			N	P	K		
			马-火 Pm-Mm	0~20	27.9		
	20~40	3.3	39	3.06	13	61 803.61	14.3
	40~60	4.8	25	0.17	12	59 643.99	15.6
马-闽 Pm-Cf	0~20	35.3	74	3.33	25	54 946.53	18.5
	20~40	21.3	12	0.69	23	70 445.44	21.7
	40~60	8.1	53	0.47	13	49 757.99	19.2
马-苦 Pm-Cs	0~20	41.4	133	3.61	11	51 328.22	6.5
	20~40	13.3	76	1.39	13	59 969.42	14.1
	40~60	11.1	91	0.28	12	78 979.06	6.6
马-格 Pm-Ck	0~20	32.3	23	1.67	29	44 052.80	19.5
	20~40	10.7	27	2.22	19	58 949.10	22.5
	40~60	3.5	87	1.67	17	77 420.10	9.7
马-青 Pm-Cm	0~20	14.1	59	3.89	20	62 622.12	9.8
	20~40	13.3	41	2.22	23	63 653.46	30.4
	40~60	14.7	15	0.56	16	52 477.53	11.9
马-拉 Pm-Cl	0~20	37.5	109	2.22	28	38 145.82	24.8
	20~40	13.3	57	2.22	20	86 737.70	18.7
	40~60	10.5	59	1.39	13	66 918.92	8.4

马-拉混交模式维持地力方面得分最高,其次是马-闽,后来就是马-苦、马-格和马-青,马-火得分最低。通过和经济效益的评判值对比,我们不难发现,马拉在经济效益得分最低,而在维持地力方面得分最高。因为马尾松与拉氏栲的混交林中凋落物分解速度较快^[16],凋落物的分解使土壤有机质含量提高,而有机质则有利于土壤动物的活动,促进土壤团粒结构的形成,改善土壤结构和孔隙度^[17-18]。当凋落物分解成腐殖质时,又能明显增加土壤阳离子交换量,同时分解过程中释放的有机酸也能加速土壤矿物的风化^[19],从而土壤肥力也相应得到提高。

3.4 综合效益评判

根据经济效益、生态效益、地力维持各指标的权重和 B_1 、 B_2 和 B_3 的评判值,可得各混交模式的综合评价价值 P

$$P = (0.4 \ 0.3 \ 0.3) \times \begin{pmatrix} 0.1601 & 0.1534 & 0.1369 \\ 0.1955 & 0.1654 & 0.1852 \\ 0.1616 & 0.1911 & 0.1763 \\ 0.1593 & 0.1692 & 0.1602 \\ 0.1782 & 0.1515 & 0.1537 \\ 0.1452 & 0.1694 & 0.1877 \end{pmatrix}^T$$

$$= (0.1511 \ 0.1834 \ 0.1749 \ 0.1625 \ 0.1628 \ 0.1652)$$

按综合评价价值的大小,各混交模式的优劣顺序为:马-闽 > 马-苦 > 马-拉 > 马-青 > 马-格 > 马-火。马-闽为最优模式,其综合评判值要比其它混交模式高出 17.61%、4.63%、11.40%、11.23%、9.92%。

4 小结与讨论

有关马尾松混交林的综合效益问题,国内学者已开展了大量的研究,但大都是从某一侧面来反映。林政等(2006)^[20]针对闽南沿海山地混交林经济效益进行分析得出,马尾松+福建柏或火力楠的混交模式能达到最大的经济效益,这种混交模式的收益率可达 8.2%~10.7%,投入产出比可达 1:1.5~1.9。邱贵云(2006)^[21]用马尾松与枫香、火力楠、拟赤杨、光皮桦、观光木、鹅掌楸、山杜英、凹叶厚朴混交,几年后发现,马尾松和阔叶树的胸径、树高都得到明显的增长。立地条件较差的林地,混交后促进生长的效果更好。也有大量研究证实马尾松混交林

对改良土壤,维持地力方面效果显著^[22-23]。

由此可见,马-阔混交林对林木生产力、维持地力等方面相比马尾松纯林都得到明显的改善。但是,就混交模式而言,其生态效应的各项指标,改土培肥的作用却各有千秋,互有优劣,难以进行横向综合比较。因此,如何评价经营模式的综合效应就成为选择混交模式的关键问题。目前对混交林评价方法比较多,主要采用的有灰色关联分析法、模糊数学、特尔斐法等。近年来,层次分析法在林业上应用日益广泛^[24],为森林经营管理、栽培模式选择和森林综合效益评价等提供了一条有效途径。不少研究利用该方法对混交林的综合效益进行评价^[25-26]。本研究在层次选择上首先考虑了混交林的经济效益,其次考虑了生态效益和地力维持方面的作用。经综合比较得出的最佳混交模式为马-闽混交林,其次为马-苦,接下去的马-格、马-青和马-拉等3种混交模式的效果相近,效果最差的是马-火。该方法符合林木混交模式选择的准则要求,在混交林的培育上是可行的。

混交模式是决定混交林效益好坏的重要因素之一,也是营造混交林的技术关键。在上述6种混交模式中虽然就混交模式而言可以确定其优劣排序,但是在某一混交模式中到底何种混交比例最为恰当,混交树龄最为合适,还有待于进一步试验研究。

参考文献 (References)

- [1] Wang Hongzhi. Studies on Mixed Forests in South China [M]. Beijing: China Forestry Press, 1993: 208~214 [王宏志. 中国南方混交林研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 208~214]
- [2] Shen Weitong. Ecology question and solution countermeasure of artificial timber forest in our country [J]. *World Forestry Research*, 1995, 2: 51~55 [盛炜彤. 我国人工用材林发展中的生态问题及治理对策 [J]. *世界林业研究*, 1995, 2: 51~55]
- [3] Worrell R, Hampson A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils—a review [J]. *Forestry*, 1997, 70 (1): 61~86
- [4] Fan Houbao, Li Yanyan, Huang Yuzhi et al. Changes of soil chemical properties after Pure Masson's pine plantations transferred into mixed conifer-hardwood stands [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (4): 77~81 [樊后保, 李燕燕, 黄玉梓, 等. 马尾松纯林改造成针阔混交林后土壤化学性质的变化 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20 (4): 77~81]
- [5] Fan Houbao, Li Yanyan, Su Bingqiang et al. Allocation pattern of biomass and productivity in the mixed uneven-aged stands of Masson's pine and hardwood species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (9): 2463~2473 [樊后保, 李燕燕, 苏兵强, 等. 马尾松-阔叶树混交异龄林生物量与生产国分配格局 [J]. *生态学*

- 报, 2006 26(9): 2463~2473]
- [6] Fan Houbao, Li Yanyan, Sun Xing, *et al*. Litter accumulation and nutrient fluxes in pinus massoniana stand and its mixed forests with broad-leaved trees [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology* 2005 11(5): 521~527 [樊后保, 李燕燕, 孙新, 等. 马尾松纯林及其与阔叶树混交林的凋落物与养分通量 [J]. 应用与环境生物学报, 2005 11(5): 521~527]
- [7] Fan Houbao, Lin Dexi, Su Bingqiang, *et al*. Forest litter ecology in Pinus massoniana stand and its mixed forests formed by inter-planting with hardwood tree species I. Litterfall and its seasonal dynamics [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2002 22(3): 209~212 [樊后保, 林德喜, 苏兵强, 等. 林下套种阔叶树的马尾松林凋落物生态学研究iv: 凋落物量及其动态 [J]. 福建林学院学报, 2002 22(3): 209~212]
- [8] Fan Houbao, Su Suxia, Lu Xiaolan, *et al*. Forest litter ecology in masson pine stand and its mixed forests formed by interplanting with hardwood tree species [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2003 23(3): 193~197 [樊后保, 苏素霞, 卢小兰, 等. 林下套种阔叶树的马尾松林凋落物生态学研究 ④ 凋落物现存量及养分通量 [J]. 福建林学院学报, 2003, 23(3): 193~197]
- [9] Fang Yunting, Mo Jiangning, Huang Zongliang, *et al*. Carbon accumulation and distribution in Pinus massoniana and Schima superba mixed forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(1): 47~52 [方运霆, 莫江明, 黄忠良, 等. 鼎湖山马尾松、荷木混交林生态系统碳素积累和分配特征 [J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(1): 47~52]
- [10] Tian Dalun, Xiang W H, Yan W D. Comparison of biomass dynamic and nutrient cycling between Pinus massoniana plantation and Pinus elliotii plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2207~2210 [田大伦, 项文化, 闫文德. 马尾松与湿地松人工林生物量动态及养分循环特征 [J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2207~2210]
- [11] Lu Rukun. Standard Soil Agro-chemical Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000]
- [12] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980
- [13] Scott N A, Binkley D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: comparison across North American forest sites [J]. *Oecologia*, 1997, 111(2): 151~159
- [14] Housr G C, Dasog G S, Satyanarayan T. Litter production and nutrient return of different tree species under plantation conditions [J]. *Indian Journal of Forestry*, 1997, 20(3): 231~235
- [15] Matthew S E. Global litter production, pools and turnover times estimates from measurement data and regression models [J]. *Geophysical Research*, 1997, 102(15): 18771~18800
- [16] Su Suxia, Lu Xiaolan, Fan Houbao, *et al*. Studies on the litter ecology of Pinus massoniana forest interplanted with the Broad-leaved trees under stands IV. The litter turnover time [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2003, 30(3): 43~46 [苏素霞, 卢小兰, 樊后保, 等. 林下套种阔叶树的马尾松林凋落物生态学研究: ④ 凋落物的周转时间 [J]. 福建林业科技, 2003 30(3): 43~46]
- [17] Twilley R R, Pozo M, Garcia V H, *et al*. Litter dynamics in riverine mangrove forests in the Guayas River estuary Ecuador [J]. *Oecologia*, 1997, 111(1): 109~122
- [18] Sukava P M, Huhta V. Habitat patchiness affects decomposition and faunal diversity: a microcosm experiment on forest floor [J]. *Oecologia*, 1998, 116(3): 390~396
- [19] Kimmins J P. Forest Ecology [M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1987 31~129
- [20] Lin Zheng, Liu Youli, Cai Jinqing. The analyze for management economic efficiency of mixed forest to the coastal mountainous in south of Fujian [J]. *Import Inquiry*, 2006, 5 56~57 [林政, 刘幼丽, 蔡金清, 等. 闽南沿海山地混交林经营管理经济效益分析 [J]. 引进与咨询, 2006 5 56~57]
- [21] Qiu Guiyun, Luo Jinqiang, Lin Jianchun. Preliminary study on the soil water physical properties in mixed Forest of Pinus massoniana and Broad-leaved Trees [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2006, 33(3): 77~80 [邱贵云, 罗金旺, 林建椿. 马尾松与阔叶树混交后土壤物理性质变化的初步研究 [J]. 福建林业科技, 2006 33(3): 77~80]
- [22] Lei Zhexiong. A study on the biomass and water conservation of mixed forest of Pinus massoniana and Sassafras tzumu [J]. *Acta Agricultrae Universitatis Jiangxiensis* 2003, 25(3): 379~382 [雷泽兴. 马尾松樟树混交林生物量及水源涵养研究 [J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(3): 379~382]
- [23] She Jiyun, Zheng Shiqi, Chen Zhichun. Study on the function of water and soil conservation for masson pine & Broadleaf-tree mixed forest [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2002, 21(1): 52~55 [余济云, 曾思齐, 成子纯. 马尾松阔叶树混交林涵水固土功能研究 [J]. 中南林业调查规划, 2002, 21(1): 52~55]
- [24] Chen Shen. Application of AHP in forest production decisions [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 1993 4 1~6 [陈森. 层次分析法在林业生产决策中的应用 [J]. 中南林业调查规划, 1993 4 1~6]
- [25] Han Jinchun, Li Hongkai. The study of synthetical judgment in many sides on themixed model of masson pine mixed forest [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000 24(4): 498~501 [韩锦春, 李宏开. 马尾松混交林混交模式的多层次综合评判 [J]. 植物生态学报, 2000 24(4): 498~501]
- [26] Chen Ruying. Application of analytical hierarchy process on optimum model selection of mixed forest in the south part of Fujian [J]. *Journal of Hunan Environment-Biological Polytechnic* 2006 12(4): 353~355 [陈如英. 层次分析法在闽南沿海山地混交林优化模式选择上的应用 [J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2006 12(4): 353~355]

Application of Analytic Hierarchy Process to Assessing the Integrated Values of Mixed Masson Pine-Hardwood Forests in Northwestern Fujian Mountain

FAN Houbao^{1, 2}, LU W enfei¹, LI Y anyan¹, LIAO Y ingchun¹, SU Bingqiang³

(1 Research Institute of Ecology & Environmental Sciences, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

2 The College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

3 Administration Bureau of National Forest Farms of Fujian Province, Fuzhou 353003, China)

Abstract One-year old seedlings of six hardwood species *Michelia macclurei*, *Castanopsis fissa*, *Castanopsis sclerophylla*, *Castanopsis kawakamii*, *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* and *Castanopsis lamontii* were separately planted under 25-year-old Masson's pine plantation, and developed into closed mixed forests after 16 years, abbreviated in this paper as Pm-Mm, Pm-Cf, Pm-Cs, Pm-Ck, Pm-Cm, and Pm-CI respectively. Economic, ecological and soil fertility maintenance values for the above six mixed stands were categorized by integrating ten factors involving stand stock, biomass, litterfall, species diversity and soil fertility. Analytical Hierarchy Process (AHP) method was applied to obtain relative weights of each criterion and sub-criterion, and then develop a multi-criteria decision model for evaluating the comprehensive benefits of the mixed stands. According to the integrated values derived from the model, the mixed Masson pine forests ranked in the following order: Pm-Cf $\vec{}$ Pm-Cs $\vec{}$ Pm-CI $\vec{}$ Pm-Cm $\vec{}$ Pm-Ck $\vec{}$ Pm-Mm, which provided a reference for introducing favorable hardwood species to interplant under Masson pine canopy.

Key words Mixed Masson pine-hardwood forest; analytical hierarchy process; multi-criteria decision model; integrated values