

# 马尾松—木荷不同比例混交林林下植被物种组成及其多样性分析

黎 芳<sup>1,2</sup>,潘 萍<sup>1</sup>,宁金魁<sup>1</sup>,郭孝玉<sup>1</sup>,吴自荣<sup>1</sup>,欧阳勋志<sup>1\*</sup>,褚 欣<sup>1</sup>

(1.江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045;2.中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心,江西 分宜 336600)

**摘要:**以飞播马尾松林为研究对象,按其树种组成为 10 马(10 马尾松,类型 I)、8 马 2 木(8 马尾松—2 木荷,类型 II)、7 马 3 木(类型 III)、6 马 4 木(类型 IV)4 种类型设置典型样地,分析比较其林下植被物种组成及多样性。结果表明:1)从类型 I 至类型 IV 林下植被的物种数增加,类型 I 为 11 种,类型 IV 为 28 种;随着木荷比例的增加,林下植被阳生植物的优势地位表现为先增强再逐渐减弱或消失,而喜湿植物的地位逐步提升甚至成为优势种。2)林下灌木及草本 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数、Pielou 均匀度指数均在类型 IV 时达到最大,表现为类型 IV > 类型 III > 类型 II > 类型 I。3)木荷比例与林下灌木及草本 Shannon-Wiener 多样性指数和 Patrick 丰富度指数呈显著( $P < 0.05$ )或极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 Pielou 均匀度指数相关不显著( $P > 0.05$ );拟合得出林下灌木及草本 Shannon-Wiener 多样性指数和 Patrick 丰富度指数达峰值的木荷比例分别为 0.43、0.54、0.57、0.50,对拟合曲线分析表明飞播马尾松林补植木荷比例在 43%~57% 之间其林下植被多样性达到最大值。

**关键词:**飞播马尾松林;混交比例;林下植被;物种多样性

**中图分类号:**S725.8      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)06-0034-07

Undergrowth Species Composition and Diversity of *Pinus massoniana* and *Schima superba* Mixed Stands with Different Proportions

LI Fang<sup>1,2</sup>, PAN Ping<sup>1</sup>, NING Jin-kui<sup>1</sup>, GUO Xiao-yu<sup>1</sup>, WU Zi-rong<sup>1</sup>, OUYANG Xun-zhi<sup>1\*</sup>, CHU Xin<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China;

2. Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi, Jiangxi 336600, China)

**Abstract:** *Schima superba* seedlings were planted in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations with 4 proportions: type I: pure *P. massoniana* (10), type II (8 *P. massoniana* + 2 *Schima superba*), type III (7+3), and type IV (6+4) to compare and analyse undergrowth species composition and diversity. Following results were obtained: 1) from type I to type IV, the number of plant species increased, 11 species were found in type I, and 28 in type IV; with the increase of the proportion of *S. superba*, the dominance status of heliophytes increased and then decreased gradually or disappear, while the dominance status of the hygrophytes increased gradually and even become the dominant species. 2) Shannon-Wiener diversity index, Patrick richness index and Pielou evenness index of the understory shrub and herb were in the order of type IV > III > II > I. 3) The correlations of the proportion of *S. superba* with Shannon-Wiener diversiy index and Patrick richness index of derstory shrub and herb were significantly positive ( $P < 0.05$ ) or extremely significantly positive ( $P < 0.01$ ), and not significant ( $P > 0.05$ ) with Pielou evenness index; simulations indicated that Shannon-Wiener diversity index and Patrick richness index reached the maximum value when the

收稿日期:2016-01-29 修回日期:2016-04-11

基金项目:国家自然科学基金(31360181,31160159)。

作者简介:黎 芳,女,硕士,研究方向:森林资源监测与管理。E-mail:lffnms@163.com

\* 通信作者:欧阳勋志,男,教授,博士生导师,研究方向:森林资源监测管理与森林生态。E-mail:oyxz\_2003@hotmail.com

proportion of *S. superba* were 0.43, 0.54, 0.57, and 0.43, respectively. The fitted curve showed that the diversity of undergrowth reached maximum when aerially seeded *P. massoiana* plantations replanting with 43%—57% *S. superba*.

**Key words:** aerially seeded *Pinus massoiana* plantation; mixed proportion; undergrowth; species diversity

林下植被在维护生态系统的多样性和稳定性、防止水土流失等方面具有重要功能<sup>[1-2]</sup>。尤其在以针叶树种为主的人工林中,乔木层植物种类单一,结构简单,养分分解归还速率慢,林下植被的作用就显得更为重要<sup>[3]</sup>。植物多样性是一个地区植被恢复和保护的基础<sup>[4]</sup>,而人工林的生物多样性对其稳定性有着重要影响<sup>[5]</sup>,其林下植被的多样性也备受学者们的关注。人工林的林下植被多样性指数高于退化的天然林<sup>[6]</sup>,人工林林下的植被多样性比同龄的天然林低或与天然次生林、撂荒地无显著差异<sup>[7-8]</sup>;人工林的树种组成和林分密度对物种多样性的影响较为明显<sup>[9]</sup>;但得出的结论不尽相同,如人工油松(*Pinus tabulaeformis*)与刺槐(*Robinia pseudoacacia*)混交林的林下灌、草层多样性高于刺槐、白榆(*Ulmus pumila*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松纯林<sup>[4]</sup>,人工云杉(*Picea asperata*)-白桦(*Betula platyphylla suk*)混交林灌木、草本层多样性高于白桦、青海云杉、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)纯林<sup>[10]</sup>,一代桉树(*Eucalyptus*)纯林的灌木物种数以及丰富度均高于杉木(*Cunninghamia lanceolata*)与红花荷(*Rhodoleia championii*)、米老排(*Mytilaria laosensis*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)等混交的几种针阔混交林<sup>[11]</sup>。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方造林绿化的先锋树种<sup>[12]</sup>,20世纪60~90年代初,赣南开展了以森林植被恢复为目的的大面积飞播马尾松种子造林工作并取得显著效果,但这逐渐暴露出了单一针叶纯林的弱点<sup>[13]</sup>,如不少林分林下植被稀少且物种组成简单等问题。20世纪90年代初为优化林分结构,对部分纯林进行了不同比例木荷的补植试验,而这些不同树种组成的混交林的林下植被多样性与纯林的差异尚不明确。因此,本研究以赣南飞播马尾松造林具有代表性的兴国县为研究区,分析马尾松纯林及马尾松—木荷(*Schima superba*)混交林林下植被多样性的差异及变化规律,为提高飞播马尾松纯林林下植被多样性及生态恢复提供参考依据。

## 1 研究地概况

兴国县(26°03'—26°42'N, 115°01'—115°51'E)位于赣州市北部,地貌以低山、丘陵为主,海拔130~249 m,该区属亚热带东南季风气候区,年平均气

温18.9℃,平均无霜期280~300 d,年平均降水量为1539 mm。兴国县母岩主要为花岗岩、第四纪红色粘土等,土壤类型以酸性红壤为主。据当地林业局相关统计资料,1973—2001年间马尾松飞播造林实播面积达77 633.3 hm<sup>2</sup>,目前保存面积64 000 hm<sup>2</sup>,占有全县林地面积的29.5%<sup>[14]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地选择与调查方法

因研究区飞播马尾松林分布区主要集中在中低丘地貌(海拔100~300 m),土壤主要为花岗岩发育而成的红壤,且当时补种木荷主要是在中下坡的飞播马尾松林分中,且其林分的林龄现在绝大部分为中龄林(20~30 a)。因此,在地貌为中低丘分布区选择人为干扰程度低且林分密度相似、坡位为中下坡、坡向为半阳或阳坡的中龄林为研究对象,根据当地补植木荷情况,按10马(马尾松纯林,类型I)、8马2木(马尾松与木荷的比例为8:2,类型II)、7马3木(类型III)、6马4木(类型IV)4种树种组成类型分别设置典型样地,同种类型的林分3个重复,共设置12个30 m×30 m样地。根据林下植被分布特征,在每个样地的上、中、下分别设置3个有代表性的4 m×4 m灌木样方,并在所选的灌木样方中各设置1个2 m×2 m的草本样方进行调查,记录林下植被的种类、数量和盖度等因子(不含乔木幼苗)(表1)。

### 2.2 数据处理与分析

灌木层和草本层分别计算其重要值、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Patrick丰富度指数。其计算公式如下:

#### 1) 重要值<sup>[15]</sup>

$$\text{重要值} = (\text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对高度})/3 \quad (1)$$

#### 2) Shannon-Wiener 多样性指数(H)<sup>[16]</sup>

$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

#### 3) Pielou 均匀度指数(J<sub>s</sub>)<sup>[16]</sup>

$$J_s = H / \ln S \quad (3)$$

#### 4) Patrick 丰富度指数(P)<sup>[15]</sup>

$$P = S \quad (4)$$

式中:S为物种总数;P<sub>i</sub>是第*i*种的个体数(*n<sub>i</sub>*)占总个体数(*N*)的比例,即P<sub>i</sub>=*n<sub>i</sub>*/*N*;*i*=1,2,3,…,*S*。

表 1 不同类型样地基本概况

Table 1 Basic condition of the plots in different types

类型	树种组成	平均 年龄/a	郁闭度	坡度/ $(^{\circ})$	平均胸径/cm		平均树高/m		平均林分密度/ $(株 \cdot hm^{-2})$
					马尾松	木荷	马尾松	木荷	
I	10 马	23	0.7	22	11.8		10.8		1 926
II	8 马 2 木	24	0.6	22	10.3	8.0	10.5	8.6	1 881
III	7 马 3 木	25	0.8	18	10.6	10.5	10.7	9.2	1 907
IV	6 马 4 木	24	0.8	19	12.6	9.3	11.9	8.9	2 263

注:10 马指马尾松纯林,8 马 2 木、7 马 3 木与 6 马 4 木分别指马尾松与木荷的比例为 8 : 2、7 : 3 与 6 : 4。

运用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析林下灌木和草本层不同类型多样性、丰富度以及均匀度的差异,差异显著时运用多重比较法(LSD)进一步分析;采用曲线估计分析不同类型马尾松林—木荷比例与林下植被各层次多样性的关系,并建立模型。数据的分析及图形的绘制使用 SPSS 19.0、Origin 7.5,数据处理及表格制作使用 Microsoft Excel 2003。

### 3 结果与分析

#### 3.1 林下植被物种组成及重要值

林下植被共 49 种,其中灌木层 31 种,草本层 18 种。对不同类型林下植被重要值的计算统计结果(表 2)表明,研究区林下灌木层和草本层物种数均呈类型 IV > 类型 III > 类型 II > 类型 I,类型 I 为 11 种,类型 IV 为 28 种,其中美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)、白檀(*Symplocos paniculata*)和铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)在各类型中都占有较大优势。

通过进一步对各类型林下植被重要性>10%的物种的比较发现,随着木荷比例增加,灌木层算盘子(*Glochidion puberum*)等阳生植物表现为主要值排序先升高再降低或物种消失,栀子(*Gardenia jasminoides*)、糯米条(*Abelia chinensis*)等喜湿植物逐渐出现在重要值>10%的物种之列,至类型 IV 时其主要值排序甚至位于灌木种群前列。随着木荷比例增加,草本层淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、凤尾蕨(*Pteris cretica*)等喜湿植物逐渐出现在重要值>10%的物种之列并呈主要值排序升高之势。总体而言,随着木荷比例增加,阳生植物的优势地位表现为先增强再逐渐减弱或消失,而喜湿植物的地位逐步提升甚至成为优势种。

表 2 不同类型马尾松林林下植被物种组成

Table 2 Undergrowth species composition of *Pinus massoniana* in different types

类型	灌木层			草本层		
	物种数	重要值范围/%	重要值>10%的物种	物种数	重要值范围/%	重要值>10%的物种
I	7	2.9~22.9	美丽胡枝子、算盘子、油茶、白檀	4	11.5~44.0	铁芒萁、五节芒、细毛鸭嘴草、圆果雀稗
II	10	5.5~18.4	算盘子、油茶、美丽胡枝子、栀子、糯米条、白檀	10	1.2~38.4	铁芒萁、五节芒、淡竹叶、细毛鸭嘴草、圆果雀稗
III	14	1.5~19.5	櫟木、栀子、糯米条、美丽胡枝子、豆腐柴、白檀	11	2.0~33.8	铁芒萁、五节芒、淡竹叶、细毛鸭嘴草、圆果雀稗、凤尾蕨
IV	16	2.2~18.3	栀子、櫟木、糯米条、美丽胡枝子、白檀、豆腐柴	12	2.0~30.3	铁芒萁、五节芒、淡竹叶、凤尾蕨、细毛鸭嘴草、圆果雀稗

注:美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)、算盘子(*Glochidion puberum*)、油茶(*Camellia oleifera*)、栀子(*Gardenia jasminoides*)、白檀(*Symplocos paniculata*)、糯米条(*Abelia chinensis*)、櫟木(*Loropetalum chinense*)、豆腐柴(*Premna microphylla*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、细毛鸭嘴草(*Ischaemum ciliare*)、圆果雀稗(*Paspalum orbiculare*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、凤尾蕨(*Pteris cretica*)。

#### 3.2 不同类型林下物种多样性比较分析

对不同类型林下灌木层及草本层物种多样性指标进行单因素方差分析(表 3),Shannon-Wiener 多样性指数表现为类型 IV > 类型 III > 类型 II > 类型 I,其中:灌木层类型 II、类型 III 与类型 I、类型 IV 无显著差异,类型 IV 与类型 I 差异显著;草本层类型 II、类型 III、类型 IV 与类型 I 有显著差异,其 3 者间无显著差异,也即当木荷比例达一定水平(类型 IV),

Shannon-Wiener 多样性指数与类型 I 差异显著。灌木层及草本层 Pielou 均匀度指数表现为类型 IV > 类型 III > 类型 II > 类型 I,其各类型间差异均不显著,表明木荷比例差异对 Pielou 均匀度指数不产生显著影响。灌木层及草本层 Patrick 丰富度指数均表现为类型 IV > 类型 III > 类型 II > 类型 I,类型 II、类型 III、类型 IV 显著大于类型 I,其 3 者间无显著差异,表明马尾松—木荷混交林较马尾松纯林更

利于 Patrick 丰富度指数的增长。

### 3.3 不同类型木荷比例与林下物种多样性的关系

不同类型木荷比例与林下各层次多样性相关分析(表 4)可知,木荷比例与灌木 Shannon-Wiener 多样性指数显著正相关,与灌木 Patrick 丰富度指数极显著正相关( $P<0.01$ ),与草本 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数均呈极显著正相关,而与灌木及草本 Pielou 均匀度指数均不显著相关。

灌木层与草本层物种多样性指数变化趋势较为一致,Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数随着木荷比例增加,均呈现出先迅速增加,再增加变缓的趋势;Pielou 均匀度指数变化幅度较小。由  $R^2$  可知,木荷比例与 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数拟合程度较好,但与 Pielou

均匀度指数拟合效果不理想。因此,可采用木荷比例与 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数的拟合模型来确定合理的木荷比例,根据木荷比例与灌木、草本层多样性的拟合模型计算出最大值(峰值),结果表明,使灌木层 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数达峰值时的木荷比例分别为 0.43、0.54,使草本层 Shannon-Wiener 多样性指数、Patrick 丰富度指数达峰值的木荷比例分别为 0.57、0.50(图 1、图 2)。

基于上述曲线特征及拟合模型,综合考虑两层次物种多样性等方面原因,建议补植木荷比例在使 Shannon-Wiener 多样性指数或 Patrick 丰富度指数达峰值的最小木荷比例至最大木荷比例之间,即在 43%~57% 最佳。

表 3 不同类型马尾松林林下植被物种多样性

Table 3 Undergrowth species diversity of *P. massoniana* in different types

层次	指数	类型			
		I	II	III	IV
灌木层	Shannon-Wiener	1.379 0b	1.991 4ab	2.062 8ab	2.166 3a
	Pielou	0.875 3a	0.941 3a	0.944 1a	0.946 2a
	Patrick	4.333 3b	8.666 7a	10.000 0a	10.666 7a
草本层	Shannon-Wiener	0.741 1b	1.491 6a	1.497 0a	1.787 9a
	Pielou	0.806 3a	0.826 9a	0.896 6a	0.919 0a
	Patrick	2.333 3b	5.333 3a	6.333 3a	6.666 7a

注:同行小写字母不同代表差异显著( $P<0.05$ )。

表 4 木荷比例与林下植被多样性的相关性

Table 4 The correlation of *Schima superba* mixed proportion and undergrowth species diversity

层次	项目	木荷比例	Shannon-Wiener	Pielou	Patrick
灌木	木荷比例	1	0.790*	0.451	0.883**
	Shannon-Wiener	0.790*	1	0.389	0.948**
	Pielou	0.451	0.389	1	0.372
草本	木荷比例	1	0.915**	0.305	0.914**
	Shannon-Wiener	0.915**	1	0.508	0.884**
	Pielou	0.305	0.508	1	0.136
	Patrick	0.914**	0.884**	0.136	1

注: \* 表示差异显著; \*\* 表示差异极显著。

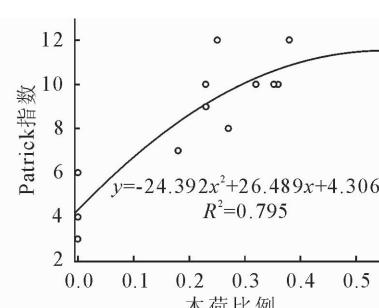
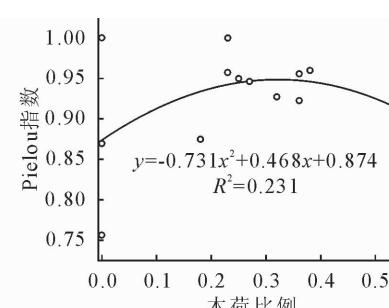
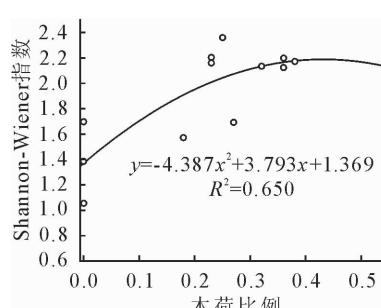


图 1 木荷比例与灌木层多样性最优拟合曲线

Fig. 1 The optimum fitted curve of *S. superba* mixed proportion and species diversity in shrub

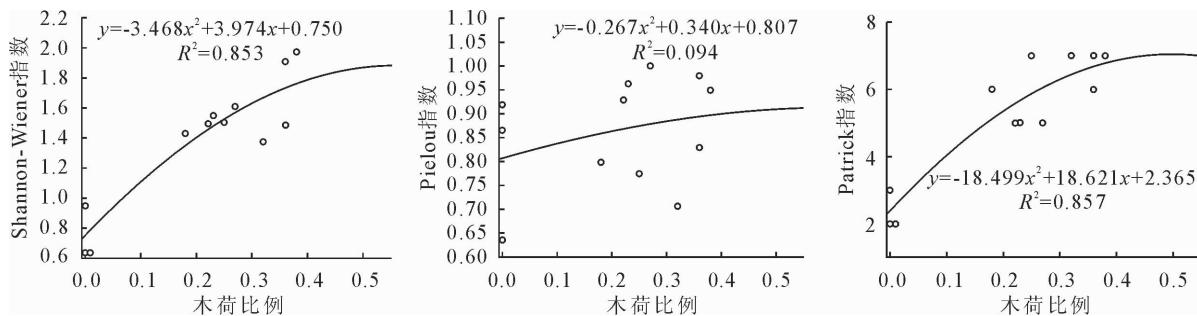


图 2 木荷比例与草本层多样性最优拟合曲线

Fig. 2 The optimum fitted curve of *S. superba* mixed proportion and species diversity in herb

## 4 结论与讨论

本研究区林下灌木层和草本层物种数均呈类型IV>类型III>类型II>类型I,美丽胡枝子、白檀和铁芒萁、五节芒在各类型中都占有较大优势。不同混交类型林下植被层组成不同,随着木荷比例增加,灌木层主要优势种由美丽胡枝子、算盘子、油茶等逐渐演替为栀子、櫟木、糯米条等,草本层主要优势种由铁芒萁、五节芒、细毛鸭嘴草等逐渐演替为铁芒萁、五节芒、淡竹叶等。类型I至类型IV,算盘子等阳生植物优势地位表现为先增强再逐渐减弱或消失,栀子、糯米条、淡竹叶等一些喜湿植物优势地位逐步提升甚至成为优势种,可能是因为马尾松—木荷混交林内的空气相对湿度高于马尾松纯林<sup>[17]</sup>。

林下灌木层及草本层各层次Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数表现出先迅速上升再趋于平缓的趋势,并呈现类型IV>类型III>类型II>类型I的规律,与唐敏忠<sup>[18]</sup>等得出的马尾松—木荷混交林灌木、草本层多样性不显著高于马尾松纯林的结果相近,导致马尾松—木荷混交林林下灌木、草本层多样性较好的原因一是在马尾松林下补植木荷后增加了凋落物量并加速凋落物的分解和养分的释放<sup>[19-20]</sup>,有利于提高土壤养分含量及脲酶、蔗糖酶的活性,从而改善林地地表层土壤状况<sup>[13]</sup>,二是马尾松—木荷混交林综合了马尾松林与木荷林的特征,更易导致生境的异质性,为物种的侵入创造了条件。但与秦新生<sup>[9]</sup>等得出的针叶纯林林下植被物种多样性高于针阔混交林的结论不同,研究结果不一致的关键因素可能是研究区树种<sup>[21]</sup>、林分密度<sup>[22]</sup>、林龄<sup>[5]</sup>不同,秦新生<sup>[9]</sup>等的研究对象是人工造林10 a的生态系统,造林密度大,同一造林密度的混交林较纯林来说郁闭度更高,导致林下光照条件较差,不利于林下植被的生长,而本研究针对飞播马尾松中龄林,郁闭度相近,林下光照条件差异较小,因此2者结论存在较大差异。Pielou均匀度指数在不同类型间无显著差异,可能是因为灌木和草

本的无序分布主要是受其物种种类影响造成的<sup>[23]</sup>。

针阔混交林是较为理想的造林模式,既可保持较高物种多样性,加速物种多样性的恢复,增加生态系统的稳定性,有利于土壤和生态环境的改善,增强水土保持功能<sup>[9,24]</sup>。本研究结果表明,马尾松—木荷混交林的林下植被物种多样性优于马尾松纯林,且木荷比例与林下灌木及草本Shannon-Wiener多样性指数和Patrick丰富度指数呈显著或极显著正相关,但与Pielou均匀度指数不显著相关。通过合理的曲线拟合可知,各类型马尾松林的木荷比例与均匀度拟合效果不理想,不适宜作为参考,但与Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数拟合程度较好,其中使灌木Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数以及草本Shannon-Wiener多样性指数、Patrick丰富度指数达峰值的木荷比例分别为0.43、0.54、0.57、0.50,综合考虑林下灌木层、草本层的多样性,建议补植木荷比例在43%~57%最佳。这与黑云杉(*Picea mariana*)与阔叶树的1:1时的混交林下草本植物多样性最高<sup>[25]</sup>以及李菁<sup>[26]</sup>得出的兴安落叶松(*Larix gmelinii*)和白桦介于5:5和7:3之间最利于森林多样性的结论相近。

影响林下植被物种多样性的机制较为复杂,林下植被物种多样性通常是多因子作用下的结果,本研究仅是在样地选择时控制对林下植被多样性影响较大的立地条件、坡度、坡位、林分密度等相同或相似的条件下单纯考虑木荷比例不同,忽略了有关因子微小差异对林下植被的影响,因此,在未来的研究中可扩大样本数,进一步探讨林下植被多样性与其影响因子之间的关系。

## 参考文献:

- [1] KERN B K, OHMANN J L. Evaluation and prediction of shrub cover in coastal Oregon forests (USA)[J]. Ecological Indicators, 2004, 4(2): 83-98.
- [2] 朱喜,何志斌,杜军,等.林下植被组成和功能研究进展[J].世界林业研究,2014,27(5):24-30.

- ZHU X, HE Z B, DU J, et al. Function and composition of understory vegetation: recent advances and trends[J]. *World Forestry Research*, 2014, 27(5): 24-30. (in Chinese)
- [3] 林娜, 刘勇, 于海群. 不同林龄飞播油松林林下植被多样性研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(3): 16-20.
- LIN N, LIU Y, YU H Q. Study on the diversity of understory vegetation in different age aerial seeding forests[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2011, 35(3): 16-20. (in Chinese)
- [4] 曲红, 王百田, 王棣, 等. 黄土区不同配置人工林物种多样性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 843-848.
- QU H, WANG B T, WANG D, et al. Research of artificial forest plant diversity under different configuration of loess area [J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(4): 843-848. (in Chinese)
- [5] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4313-4323.
- CUI N J, CHEN X H, LIU Y, et al. Shrub and herb diversity at different ages of *Pinus massoniana* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4313-4323. (in Chinese)
- [6] VERMA R K, KAPOOR K S, RAWAT R S, et al. Analysis of plant diversity in degraded and plantation forests in Kunihar forest division of Himachal Pradesh[J]. *Indian Journal of Forestry*, 2005, 28(1): 11-16.
- [7] RAMOVES B V, ROBERTS M R. Understory vegetation and environment responses to tillage, forest harvesting, and conifer plantation development[J]. *Ecological Applications*, 2003, 13(6): 1682-1700.
- [8] 袁王俊, 卢训令, 张维瑞. 不同植被类型植物物种多样性[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4652-4657.
- YUAN W J, LU X L, ZHANG W R. Plant's diversity of different vegetation types[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4652-4657. (in Chinese)
- [9] 秦新生, 刘苑秋, 邢福武. 低丘人工林林下植被物种多样性初步研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(3): 223-228.
- QIN X S, LIU Y Q, XING F W. Species diversity in undergrowth of artificial forests on lower hilly land[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(3): 223-228. (in Chinese)
- [10] 王世雷, 贺康宁, 刘可暄, 等. 青海高寒区不同人工林下植被的多样性及生态位研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(11): 67-72.
- WANG S L, HE K N, LIU K X, et al. Diversity and niche of different plantation configuration in alpine region in Qinghai Province[J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.*, 2013, 41(11): 67-72. (in Chinese)
- [11] 张卫强, 张卫华, 潘文, 等. 桉树林和针阔混交林对植物多样性的影响比较[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 122-128.
- ZHANG W Q, ZHANG W H, PAN W, et al. Effects of eucalypt plantation and conifer-broadleaved forest on plant biodiversity[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 122-128. (in Chinese)
- [12] 肖化顺, 刘发林, 向顺常, 等. 马尾松群落防火林带有效宽度模型研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 134-137.
- XIAO H S, LIU F L, XIANG S C, et al. Effective width model of fire-preventing forest belts for *Pinus massoniana*[J]. *Journal of Northwest Forestry*, 2008, 23(1): 134-137. (in Chinese)
- [13] 林惠章, 郭孝玉, 欧阳勋志, 等. 飞播马尾松纯林补植木荷后土壤酶活性与土壤养分变化[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(7): 136-139.
- LIN H Z, GUO X Y, OUYANG X Z, et al. Variation of soil enzyme activity and soil nutrients in aerially seeded *Pinus massoniana* plantation replanting with *schima suoerba* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(7): 136-139. (in Chinese)
- [14] 丁松, 应学亮, 吕丹, 等. 赣南飞播马尾松林林下植被盖度对土壤质量的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 31-36.
- DING S, YING X L, LU D, et al. Effects of understory vegetation coverage on soil quality of aerial seeding *Pinus massoniana* stands in south of Jiangxi province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 31-36. (in Chinese)
- [15] 于景金, 陈丽华, 谷建才, 等. 基于灰色关联分析的环境因子与物种多样性关系[J]. 林业资源管理, 2010(1): 68-72.
- YU J J, CHEN L H, GU J C, et al. Application of grey sequence to study on the relation between environmental factors and species diversity[J]. *Forest Resources Management*, 2010(1): 68-72. (in Chinese)
- [16] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法—I<sub>a</sub>多样性的测度方法: 下[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [17] 寇纪烈, 田晓瑞. 两种针阔混交林防火机理的研究[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(2): 11-18.
- KOU J L, TIAN X R. Studies on mechanism of fire resistance and benefits for coniferous and broadleaved mixed forests[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, 19(2): 11-18. (in Chinese)
- [18] 唐敏忠, 张超, 汉瑞英, 等. 大源溪流域马尾松林群落类型划分及物种多样性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2381-2389.
- TANG M Z, ZHANG C, HAN R Y, et al. Community type classification and species diversity of *Pinus massoniana* forest of Dayuan Creek[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(9): 2381-2389. (in Chinese)
- [19] 林德喜, 樊后保. 马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化[J]. 林业科学, 2005, 41(6): 10-18.
- LIN D X, FAN H B. Changes in amount, nutrient contents and turnover time of forest litter after interplanting hardwood species under masson pine stand[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(6): 10-18. (in Chinese)
- [20] 殷沙, 赵芳, 欧阳勋志. 马尾松木荷不同比例混交林枯落物和土壤持水性能比较分析[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(3): 454-460.
- YIN S, ZHAO F, OUYANG X Z. A comparision on water-holding capacity of forest litter and soil of mixed forests of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in different proportions[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, 37(3): 454-460. (in Chinese)
- [21] 金文斌, 邱实, 汤宛地. 小秦岭自然保护区森林群落分类及林下植物多样性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(3): 14-17.
- JIN W B, QIU S, TANG W D. Study on classification of forest

- community and diversity of understory plants in Xiaoqinling Nature Reserve[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(3): 14-17. (in Chinese)
- [22] 李国雷, 刘勇, 郭蓓, 等. 保留密度对飞播油松林下植被发育影响的研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 105-110.
- LI G L, LIU Y, GUO B, et al. Effect of reserve density on undergrowth development of aerial seeding *Pinus tabulaeformis* stands[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(3): 105-110. (in Chinese)
- [23] 吕娟娴, 王得祥, 张宋智, 等. 小陇山林区不同密度油松人工林林下物种多样性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(11): 49-56.
- LU J X, WANG D Y, ZHANG S Z, et al. Study on the species diversity of undergrowth in the different stand densities of *Pinus tabulaeformis* plantation of Xiaolongshan area [J]. Journal of Northwest A & F University: Nat. Sci. Ed., 2010, 38(11): 49-56. (in Chinese)
- [24] 王青天. 福建柏与马尾松混交造林模式的环境效应与生长分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 126-130.
- WANG Q T. Environmental effects and growth analysis of the mixed forest plantations of *Fokienia hodginsii* and *Pinus massoniana* [J]. Journal of Northwest Forestry, 2013, 28(3): 126-130. (in Chinese)
- [25] JOBIDON R, CYR G, THIFFAULT N. Plant species diversity and composition along an experimental gradient of northern hardwood abundance *Picea mariana* plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 194: 209-221.
- [26] 李菁, 骆有庆, 石娟. 基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例—以阿尔山林区为例[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4943-4949.
- LI J, LUO Y Q, SHI J. The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation: a case study in Aershan forest area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 4943-4949. (in Chinese)

(上接第 29 页)

- [9] 蒋伊尹, 李凤日, 李长胜. 兴安落叶松幼、中龄林生长规律的研究[J]. 东北林业大学学报, 1990, 18(1): 1-7.
- JIANG Y Y, LI F R, LI C S. Growth and yield of young and middle age stands of dahurian larch[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1990, 18(1): 1-7. (in Chinese)
- [10] 唐守正. 广西大青山马尾松全林整体生长模型及应用[J]. 林业科学研究, 1991, 4 (Supp. 1): 8-13.
- TANG S Z. The whole growth model and its application of Guangxi Mount Daqing [J]. Forest Research, 1991, 4 (Supp. 1): 8-13. (in Chinese)
- [11] 惠刚盈, 盛炜彤, GADOW K, 等. 杉木人工林收获模型系统的研究[J]. 林业科学研究, 1994, 7(4): 354-358.
- HUI G Y, SHENG W T, GADOW K, et al. Study on the yield modelling system of Chinese fir plantation [J]. Forest Research, 1994, 7(4): 354-358. (in Chinese)
- [12] 洪玲霞, 雷相东, 李永慈. 蒙古栎林全林整体生长模型及其应用[J]. 林业科学研究, 2012, 25(2): 201-206.
- HONG L X, LEI X D, LI Y C. Integrated stand growth model of Mongolian oak and its application [J]. Forest Research, 2012, 25(2): 201-206. (in Chinese)
- [13] 袁一超, 王得祥. 小陇山林区日本落叶松人工林林冠截留特征[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(6): 20-24.
- YUAN Y C, WANG D X. Characteristics of canopy interception of *Larix kaempferi* in Xiaolongshan Forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28 (6): 20-24. (in Chinese)
- [14] 石小龙, 刘文桢, 郭小龙, 等. 小陇山林区锐齿栎群落邻体干扰指数研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 73-76.
- SHI X L, LIU W Z, GUO X L, et al. Community interference index of *Quercus aliena* var. *acutiserrata* in Xiaolongshan Forests[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 73-76. (in Chinese)
- [15] 郭小龙, 刘文桢, 张宋智, 等. 小陇山林区锐齿栎原始林群落的空间结构特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(11): 106-112.
- GUO X L, LIU W Z, ZHANG S Z, et al. Spatial structure character of *Quercus aliena* var. *acutiserrata* primeval forest on Xiaolongshan Forests Area [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(11): 106-112. (in Chinese)
- [16] 唐守正, 朗奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算 (ForStat 教程)[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 343-354.
- [17] FURNIVAL G M, WILSON K W JR. Systems of equations for predicting forest growth and yield [M]// PATIL G P, PIELON E C, WATERS W E. Statistical ecology. University Park: Pennsylvania State University Press, 1971: 43-57.
- [18] 李永慈, 唐守正. 带度量误差模型的全林整体模型参数估计研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28 (1): 23-27.
- LI Y C, TANG S Z. Parameter estimate of the whole stand model with measurement error[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(1): 23-27. (in Chinese)
- [19] ROSE C E, LYNCH T B. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equations and seemingly unrelated regressions [J]. Forest Ecology and Management, 2001, 148 (1): 51-61.