

不同林龄杉木人工林林下灌木和草本物种组成及多样性分析*

刘佳哲^{1,2} 谭长强¹ 申文辉¹ 郑威¹
彭玉华¹ 何峰¹ 谭一波¹ 何琴飞¹

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院 / 广西漓江源森林生态系统国家定位观测研究站 / 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西南宁 530002; 2. 广西大学林学院, 广西南宁 530002)

摘要 选取广西壮族自治区融水县不同林龄的杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林为研究对象, 为深入了解不同林龄杉木林下群落多样性、群落演替以及对其生态效益提供理论技术支持, 采用典型抽样法, 对林下植物物种组成和植物多样性进行调查研究。结果表明: 4种不同林龄(3、7、13、17 a)杉木人工林林下物种共40科53属60种, 3 a林物种总数最多, 17 a林最少, 两种多样性指数与均匀度指数均随林龄增加产生明显波动。杉木人工林下灌木层中粗叶榕 *Ficus hirta*、大青 *Clerodendrum cyrtophyllum* 在各林龄中均有分布且占较大优势, 鸭脚木 *Schefflera heptaphylla* 在17 a林下占绝对优势; 林下草本层中狗脊 *Woodwardia japonica* 和乌毛蕨 *Blechnum orientale* 在各林龄均有分布, 3 a林以五节芒 *Miscanthus floridulus* 为主, 17 a林以金毛狗 *Cibotium barometz* 占绝对优势。灌木 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在3 a和7 a林均大于草本。灌木与草本的 Piolou 指数和 Alatalo 指数存在一定的差异。随着杉木林林龄增加, 林下物种群落的共同物种和群落相似系数逐渐下降, 17 a林下群落与其他林龄群落相似度低已趋于稳定。

关键词 杉木人工林; 林下植物; 物种多样性; 林龄

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 03-0104-07

Species Composition and Diversity Analysis of Undergrowth Shrubs and Herbs in *Cunninghamia lanceolata* Plantations of Different Ages

LIU Jiazhe^{1,2} TAN Changqiang¹ SHEN Wenhui¹ ZHENG Wei¹
PENG Yuhua¹ HE Feng¹ TAN Yibo¹ HE Qinfei¹

(1. Guangxi Academy of Forestry/Guangxi Lijiang River Source Forest Ecosystem Research Station/Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning, Guangxi 530002, China; 2. Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi 530002, China)

Abstract *Cunninghamia lanceolata* plantations of different ages in Rongshui, Guangxi were selected as the research objects. In order to understand the community diversity, community succession of *C. lanceolata* plantations of different ages and provide theoretical and technical support for their ecological benefits, the species composition and plant diversity of undergrowth plants were investigated by using typical sampling method. The results showed that there were 60 species in 53 genera of 40 families in 4 different ages (3, 7, 13, 17 a) of

* 基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204087-8), 中央引导地方科技发展专项(桂科 ZY19183014), 广西重点研发计划项目(桂科 AB1850011), 广西科技发展战略研究专项(桂科 ZL20111022)。

第一作者: 刘佳哲(1995—), 男, 主要从事园林植物资源及应用等方面的工作, E-mail: gxuljz@gmail.com。

通信作者: 申文辉(1972—), 男, (教授级)高级工程师, 主要从事森林生态研究等方面的工作, E-mail: shenwenhui2003@163.com。

Chinese fir plantations. The total number of species in 3 a forest was the most, while that in 17 a forest was the least. The two kinds of diversity index and evenness index fluctuated significantly with the increase of age. *Ficus hirta* and *Clerodendrum cyrtophyllum* in the shrub layer under the *C. lanceolata* plantation are distributed and dominant in all ages, and *Schefflera heptaphylla* has an absolute advantage under the 17 a forest; *Woodwardia japonica* and *Blechnum orientale* in the understory herbaceous layer are distributed in all forest ages. The 3 a forest is dominated by *Miscanthus floridulus*, and the 17 a forest is dominated by *Cibotium barometz*. The Shannon-Wiener index and Simpson index of shrubs were higher than those of grasses in 3 a and 7 a forests. There is a certain difference between the Piolou index and the Alatalo index of shrubs and herbs. With the increase of the age of *C. lanceolata* plantations, the common species and community similarity coefficients of the understory communities gradually decreased, and the low similarity between the understory communities and other forest age communities in 17 a has stabilized.

Key words *Cunninghamia lanceolata* plantation; understory plant; species diversity; stand age

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 为常绿针叶乔木, 是我国南方重要的用材树种之一^[1-2]。杉木具有生长快、用途广、效益高的优点, 木材有香气, 材质易加工、耐腐蚀、纹理优美, 是一种优良的建筑用材, 也可用于人造板、家具和纸张的生产^[3]。因此长江流域以南大量种植, 杉木林占我国人工林总面积的 26.6%^[4-5]。然而在长期的人工林种植中过度追求速生和丰产, 集约经营和连栽对森林生态结构造成了一定影响^[6]。

人工林林下植物群落的多样性对森林生态系统的稳定性具有重要的作用, 能缩短森林物质循环周期和提升能量流动速率^[7]。通常人工林主要造林目的为获取经济效益, 为了最大限度的获取木材, 导致林下生物多样性往往较低^[8]。丰富的林下植被通过改变土壤微生物结构加速林下调落物的分解, 对人工林地力的恢复产生促进作用^[9-10]。因此研究林下灌木层和草本层的生物多样性组分, 对目前面临的人工林下植物种类、土壤肥力以及生物量的减少等问题具有重要意义^[11]。

在对杉木人工林林下植物物种多样性的研究中, 已有学者对江西杉木人工林进行研究, 认为当地杉木成熟林物种多样性比幼龄林丰富, 但对于广西地区的杉木林下物种多样性研究尚缺^[12]。为补充广西杉木人工林种植理论基础, 本研究通过对 4 个不同林龄 (3、7、13、17 a) 阶段的杉木人工林林下灌木和草本进行研究, 通过调查林下灌木层和草本层的物种组成以及对物种多样性进行分析, 深入了解不同林龄杉木林对林下群落多样性的影响、多样性变化以及群落演替, 以期全面评价杉木人工林的生态效益提供理论技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贝江河林场位于广西壮族自治区柳州市融水县, 东经 108°35', 北纬 24°49'。海拔梯度为 155~630 m, 属低山、中山以及丘陵地貌, 土壤类型为红壤和山地黄壤, 土层厚度约 60~80 cm, 表土层厚度约 10~30 cm。地处亚热带季风气候, 年均气温为 18.9 °C, 年均降水量为 1 824.8 mm。贝江河林场自 1953 年建厂森林经营面积为 103 700 hm², 森林储蓄量 1 110 000 m³, 主要以培育杉木为主。2008 年起建立杉木高世代种子园, 至 2011 年营建第二期种子园并完成杉木种质资源基因库基地的建立, 是广西第一批重点林木良种基地。

1.2 样地调查

2018 年 11 月, 在广西融水贝江河林场选择临近分布、立地条件相同、长势良好的 3、7、13、17 a 共 4 个发育阶段的 2 代杉木人工林样地, 在 4 个不同林龄林分中各设置 3 个 30 m × 30 m 的样地。在各样地中调查胸径 1.0 cm 以上所有杉木, 调查杉木树高、胸径、林分密度等。在调查样方内设置 5 m × 5 m 样方, 调查灌木种类、高度、基径、冠幅等参数。在调查样方内设置 1 m × 1 m 小样方, 调查草本种类、株丛数、盖度、高度等参数。同时测定各样地海拔、坡向、坡位、坡度等环境因子, 采集样地的土壤样品测定土壤有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾含量和土壤 pH (表 1)。

1.3 试验分析

1.3.1 指数计算 通过在样地采集灌木层和草本层的频度、盖度和高度信息, 计算物种的重要值^[13]。

表 1 样地林分及土壤基本特征
Tab.1 Basic characteristics of standing forest and soil in the sample plot

因子 Factor	3 a	7 a	13 a	17 a
海拔 /m Altitude	182	182	165	479
坡向 Aspect	WS	ES	WS	EN
坡度 Slope	38°	40°	38°	27°
郁闭度 /% Coverage	65	95	92	85
平均树高 /m Average tree height	2.30	11.11	13.23	15.07
平均胸径 /cm Average diameter at breast height	3.50	11.18	12.60	17.92
林分密度 /(株 ·hm ⁻²) Stand density	3119	2333	1808	1400
pH	3.90	4.10	3.96	4.58
有机碳含量 /(g ·kg ⁻¹) Organic carbon content	17.14	30.58	20.03	23.71
碱解氮含量 /(mg ·kg ⁻¹) Alkaline nitrogen content	67.93	135.54	92.92	102.09
速效磷含量 /(mg ·kg ⁻¹) Available phosphorus content	1.84	3.29	1.88	0.77
速效钾含量 /(mg ·kg ⁻¹) Available potassium content	37.08	39.97	24.61	73.49

注: WS,ES,EN 分别表示西南、东南、东北方向。

Note: WS,ES,EN indicate the southwest,southeast,and northeast directions respectively.

再进行 Shannon-Wiener^[14] 和 Simpson 多样性指数^[15] 的计算, 以及 Pielou 均匀度指数^[16] 和 Alatalo 均匀度指数^[17] 的计算。最后计算群落相似系数 Sorensen 指数^[18]。计算公式分别为:

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

$$(2) \text{ Shannon-Wiener 指数: } H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$(3) \text{ Simpson 指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$(4) \text{ Pielou 指数: } J_{SW} = \left(-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \right) / \ln S$$

(5) Alatalo 指数:

$$AL = \left[1 / \sum (P_i)^2 - 1 \right] / \left(e^{-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i} - 1 \right)$$

(6) 群落相似系数 (Sorensen 指数):

$$C = \left(\frac{2w}{a+b} \right) \times 100\%$$

以上式中 P_i 为相对重要值, S 为样方中出现的物种数目, a 为一个样地的物种数, b 为另一个样地的物种数, w 为以上两个样地的共有物种数。

1.3.2 数据分析 使用 Excel 2019 软件进行数据

的统计整理及作图, 使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 杉木人工林林下物种组成分析

物种的重要值通过其相对多度、相对盖度和相对频度的综合, 确定群落中物种的功能地位和种群在群落中的分布格局, 可以全面的反应物种在群落中的重要性。杉木人工林林下调查的样方中共存在植物种类 40 科 53 属 60 种。杉木林下灌木层植物种类组成共包括 35 科 41 属 42 种, 草本植物种类共包括 37 科 45 属 47 种。灌木层中科数最多为 7 a 林, 属数和种数最多为 3 a 林; 草本层中 3 a、13 a 林下物种科数最多, 属数和种数最多为 3 a 林 (表 2)。其中木本植物 19 科 26 属 30 种, 草本植物 21 科 27 属 30 种。对杉木人工林的植物重要值进行计算与统计 (表 3), 可知灌木层中粗叶榕 *Ficus hirta*、大青 *Clerodendrum cyrtophyllum* 和鸭脚木 *Schefflera heptaphylla* 占有绝对优势, 重要值均在 30% 以上。大部分灌木植物种类重要值都在 10% 以下, 总体较为均衡。草本层中五节芒 *Miscanthus floridulus*、金毛狗 *Cibotium barometz* 和乌毛蕨 *Blechnum orientale* 占主要优势地位, 其中五节芒重要值达 51.25%。

表 2 林下植被物种组成
Tab.2 Species composition of understory vegetation

林龄 /a Stand age	科 Families		属 Genera		种 Species	
	灌木层 Shrub layer	草本层 Shrub layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Shrub layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Shrub layer
3	9	11	12	15	12	16
7	10	8	11	9	11	10
13	7	11	8	13	8	13
17	9	7	10	8	11	8
总计 Total	35	37	41	45	42	47

表 3 灌木层主要物种组成及重要值
Tab.3 Main species composition and important value of shrub layer

%

种名 Species	科 Families	属 Genera	3 a	7 a	13 a	17 a
杜茎山 <i>Maesa japonica</i>	报春花科	杜茎山属	10.21	5.78	3.68	
罗伞树 <i>Ardisia quinquegona</i>	报春花科	紫金牛属				4.85
大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>	唇形科	大青属	2.99	3.93	32.82	13.49
紫珠 <i>Callicarpa bodinieri</i>	唇形科	紫珠属	2.11			
大叶紫珠 <i>Callicarpa macrophylla</i>	唇形科	紫珠属				5.54
乌桕 <i>Triadica sebifer</i>	大戟科	乌桕属	2.99			
山黄麻 <i>Trema tomentosa</i>	大麻科	山黄麻属	11.9			
柃叶冬青 <i>Ilex euryoides</i>	冬青科	冬青属		14.69	3.63	
仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	豆科	仪花属		11.73		
野漆 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	漆树科	漆树属				4.70
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科	盐肤木属	18.21			
大果榕 <i>Ficus auriculata</i>	桑科	榕属			4.79	
粗叶榕 <i>Ficus hirta</i>	桑科	榕属	12.14	31.93	24.32	5.79
台湾榕 <i>Ficus formosana</i>	桑科	榕属				4.85
木荷 <i>Schima superba</i>	山茶科	木荷属		5.83	14.32	
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	山茶科	山茶属		6.41		
白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	山矾科	山矾属		4.27		
冻绿 <i>Rhamnus utilis</i>	鼠李科	鼠李属		6.44		
椴木 <i>Aralia elata</i>	五加科	椴木属	2.35			
鸭脚木 <i>Schefflera heptaphylla</i>	五加科	南鹅掌柴属				30.48
毛果柃 <i>Eurya trichocarp</i>	五列木科	柃属	4.37			
米碎花 <i>Eurya chinensis</i>	五列木科	柃属		3.83		
八角 <i>Illicium verum</i>	五味子科	八角属	2.07			
枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	蕈树科	枫香树属				6.54
柏拉木 <i>Blastus cochinchinensis</i>	野牡丹科	柏拉木属				5.79
野牡丹 <i>Melastoma malabathricum</i>	野牡丹科	野牡丹属	12.22			
毛果算盘子 <i>Glochidion eriocarpum</i>	叶下珠科	算盘子属		5.16	3.63	
三椏苦 <i>Melicope pteleifolia</i>	芸香科	蜜茱萸属			3.54	11.47
山苍子 <i>Litsea cubeba</i>	樟科	木姜子属	17.28			
鸭公树 <i>Neolitsea chui</i>	樟科新	木姜子属				6.46

表4 草本层主要物种组成及重要值

%

Tab.4 Main species composition and important value of herbaceous layer

种名 Species	科 Families	属 Genera	3 a	7 a	13 a	17 a
山菅 <i>Dianella ensifolia</i>	阿福花科	山菅兰属	1.59	6.76	1.99	
菝葜 <i>Smilax china</i>	菝葜科	菝葜属		3.18		
牛尾菜 <i>Smilax riparia</i>	菝葜科	菝葜属				2.36
半边旗 <i>Pteris semipinnata</i>	凤尾蕨科	凤尾蕨属	1.94			
扇叶铁线蕨 <i>Adiantum flabellulatum</i>	凤尾蕨科	铁线蕨属	1.68	3.21	5.47	
铁线蕨 <i>Adiantum capillus-veneris</i>	凤尾蕨科	铁线蕨属		11.52		
小叶海金沙 <i>Lygodium microphyllum</i>	海金沙科	海金沙属	5.76	8.51		
淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i>	禾本科	淡竹叶属			2.07	
小花露籽草 <i>Ottlochloa nodosa</i> var. <i>micrantha</i>	禾本科	露籽草属	3.84			
乱子草 <i>Muhlenbergia huegelii</i>	禾本科	乱子草属	4.09			
五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i>	禾本科	芒属	51.25	2.92	2.04	
棕叶芦 <i>Thysanolaena latifolia</i>	禾本科	棕叶芦属	1.65			
滑叶山姜 <i>Alpinia tonkinensis</i>	姜科	山姜属				2.54
金毛狗 <i>Cibotium barometz</i>	金毛狗科	金毛狗属			13.45	45.55
圣蕨 <i>Dictyocline griffithii</i>	金星蕨科	圣蕨属			1.99	
观音坐莲 <i>Sempervivum tectorum</i>	景天科	长生草属				11.09
半边莲 <i>Lobelia chinensis</i>	桔梗科	半边莲属		4.60	4.26	
千里光 <i>Senecio scandens</i>	菊科	千里光属	2.95			
深绿卷柏 <i>Selaginella doederleinii</i>	卷柏科	卷柏属				8.57
芒萁 <i>Dicranopteris pedata</i>	里白科	芒萁属	4.21			
毛蓼 <i>Polygonum barbatum</i>	蓼科	篇蓄属	1.50			
两广鳞毛蕨 <i>Dryopteris linkwangensis</i>	鳞毛蕨科	鳞毛蕨属				4.45
乌蕨 <i>Odontosoria chusana</i>	鳞始蕨科	乌蕨属	5.09			
瘤足蕨 <i>Plagiogyria adnata</i>	瘤足蕨科	瘤足蕨属			2.34	
威灵仙 <i>Clematis chinensis</i>	毛茛科	铁线莲属	1.65		2.22	
玉叶金花 <i>Mussaenda pubescens</i>	茜草科	玉叶金花属		3.81	1.88	
锈叶悬钩子 <i>Rubus fuscifolius</i>	蔷薇科	悬钩子属	1.50			
小叶悬钩子 <i>Rubus taiwanicola</i>	蔷薇科	悬钩子属			2.21	
狗脊 <i>Woodwardia japonica</i>	乌毛蕨科	狗脊属	1.45	23.05	26.55	18.97
乌毛蕨 <i>Blechnum orientale</i>	乌毛蕨科	乌毛蕨属	9.62	32.42	33.63	6.46

2.2 不同林龄杉木林下灌草多样性指数

由图1、2可知,杉木林林下灌木与草本的Shannon-Wiener指数和Simpson指数随杉木林林龄增加的变化趋势基本一致,总体上呈相反趋势。经单因素方差分析,灌木与草本Shannon-Wiener多样性指数在不同林龄间无显著差异($P>0.05$);灌木Simpson多样性指数在不同林龄间呈显著差异($P<0.05$),草本无显著差异。

2.3 不同林龄杉木林下灌草均匀度指数

由图3、4可知,不同林龄杉木林下灌木与草本的Pielou均匀度指数和Alatalo均匀度指数存在一定的差异。经单因素方差分析,灌木与草本Pielou均匀度指数在不同林龄间差异不显著;灌木Alatalo均匀度指数在不同林龄间差异不显著,草本Alatalo均匀度指数呈显著差异($P<0.05$)。

2.4 杉木人工林林下物种组成相似性

随着杉木林林龄增加,林下物种群落的共同

物种和群落相似系数也存在变化。由表5可知,3a林和7a林以及13a林的共有物种数较多,17a林与其他林龄共有物种相对较少。随着林龄的增加共有物种逐渐减少,说明随林龄增加林下物种出现变化。从群落相似系数(表5)可以看出,3a林与7a林和13a林的相似系数最高,而17a林与其他龄林的相似系数在20%左右,相对较低。

表5 杉木不同林龄群落相似系数 %

Tab.5 The coefficient of community similarity of *Cunninghamia lanceolata* forest

林龄/a Stand age	3	7	13	17
3		40.81	44.89	21.27
7	10		19.04	20.00
13	11	13		25.00
17	5	4	5	

注:上三角为群落相似系数,下三角为两林龄间共有物种数。
Note:the upper triangle is the community similarity coefficient,and the lower triangle is the number of common species between the two forest ages.

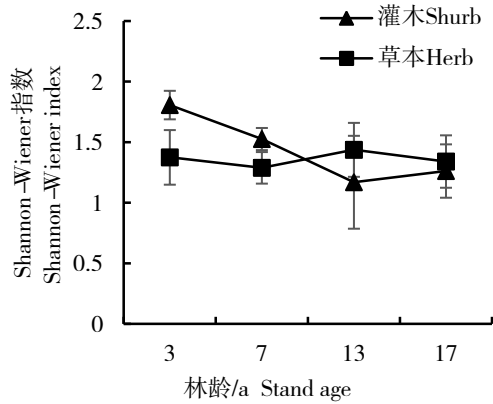


图1 杉木不同林龄灌木、草本 Shannon-Wiener 指数

Fig.1 The Shannon-Wiener index of *Cunninghamia lanceolata* shrubs of different forest ages and herbs

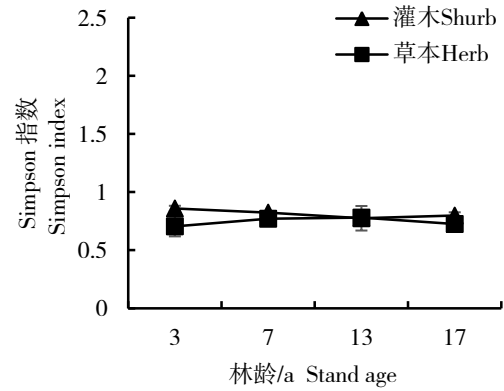


图2 杉木不同林龄灌木、草本 Simpson 指数

Fig.2 The Simpson index of *Cunninghamia lanceolata* shrubs of different forest ages and herbs

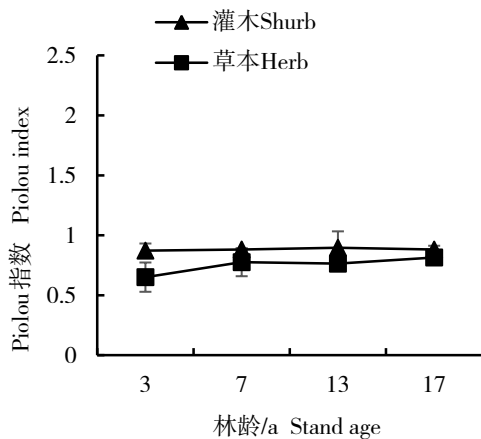


图3 杉木不同林龄灌木、草本 Pielou 指数

Fig.3 The Pielou index of *Cunninghamia lanceolata* shrubs of different forest ages and herbs

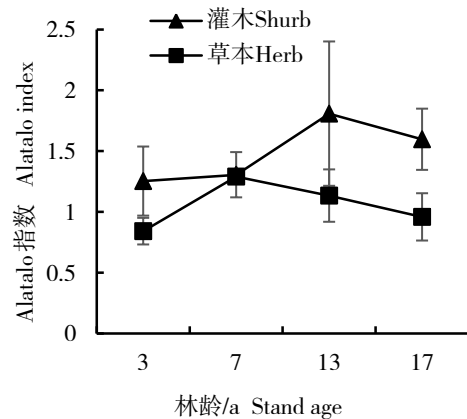


图4 杉木不同林龄灌木、草本 Alatalo 指数

Fig.4 The Alatalo index of *Cunninghamia lanceolata* shrubs of different forest ages and herbs

3 结论与讨论

由于造林初期林下郁闭度不高，出现大量的先锋植物和随机入侵的植物，因此林龄为3 a的杉木林林下植物种类最为丰富，随杉木林林龄的增加植物种类随之下降。本研究杉木不同林龄下植物群落演替趋势与陈伟光等^[19]的人工针叶林植物群落演替的规律相符。杉木林龄17 a后导致林下透光度下降，优势草本植物转变为耐阴耐贫瘠的金毛狗和狗脊等蕨类植物，与罗洁贤等^[20]对不同林龄桉树 *Eucalyptus* sp. 林下植被的多样性研究结论一致。通常灌木植物为先锋植物^[21]，对环境的适应性较强，因此灌木植物种类在不同林龄的杉木林下变化较小。林下光照发生变化对植物的影响较大，随着杉木林龄增加，高密度的杉木林导致在不同林龄下植物种类以及物种的重要值都相

差较大，这与陈春如等^[22]对粤北杉木林林下植物多样性的研究一致。

杉木人工林不同林龄林下物种所处的环境因子的不同会造成多样性的差异。草本与灌木在有限的空间资源里两者处于竞争关系，因此二者多样性呈相反的趋势，与杨立学等^[23]不同林龄胡桃楸 *Juglans mandshurica* 林下植物的多样性趋势一致。林龄3 a杉木林密度较低，生长环境中存在各种随机、先锋物种，因此杉木人工林3 a林龄多样性相对高于17 a林。随着杉木林龄的增加，优势物种逐渐占据有限的空间和资源使得新的物种难以侵入，这一结论与李淑君等^[24]对荒漠草原区不同林龄柠条 *Caragana intermedia* 林研究结果一致。丰富的生物多样性是生态系统稳定的基础，人工林由于单一性，生态位较为薄弱^[25]。混交林能够提高林分物种的丰富度，并且增加林分结构的多样

样性^[26],因此在人工林的营林中需注意合理配置,加大在保护生物多样性上的工作力度。

林龄小的杉木林下物种共有数较多,随林龄增加变少,物种相似系数也随之变小。这与崔宁洁等^[27]对马尾松 *Pinus massoniana* 人工林林下植被的研究结果相反。杉木林龄 3 a 时林下空间资源充足,植物群落主要以喜光植物如五节芒为主,随着杉木逐渐成林导致光照受到抑制。杉木林龄 17 a 时与其他林龄群落的相似系数最低。林下群落因光照变化更替的过程中,3 a 与 7 a 和 13 a 林下物种出现过渡的情况,因而相似度高。

本研究结果表明,不同林龄杉木林下植物群落呈前期波动较大后期稳定的趋势。大青、粗叶榕、狗脊、乌毛蕨等植物在杉木各个林龄林下均有分布,可以用作杉木人工林建群种以及丰富杉木人工林生物多样性。在杉木人工林的造林过程中需要充分考虑郁闭度对林下植物的影响,建议改善杉木种植模式,避免大面积高密度种植,与乡土树种混交种植可以增加林分的稳定性,有益于林内生态系统的重建。并且采取一定人工辅助手段保持最佳林分密度和疏枝,不仅可以保证杉木成材率,还可保持一定的林下植物多样性,保持森林生态系统的稳定性。

参考文献

- [1] YANFENG B, SHIYOU C, SHUORONG S, et al. Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 1-8.
- [2] WENLI C, XIAOQIANG L, JINYUE B, et al. *Curvularia spicifera* and *Curvularia muelhenbeckiae* causing leaf blight on *Cunninghamia lanceolata*[J]. Plant Pathology, 2020, 69(6): 1139-1147.
- [3] JING Q, YA JING L, JING JING G, et al. The effect of ultrasonic intensity on physicochemical properties of Chinese fir[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64(6): 1-7.
- [4] 黄永珍, 王晟强, 叶绍明. 杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2857-2865.
- [5] LAI Z, YUJUN S, SAJJAD S, et al. The difference of soil properties between pure and mixed Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations depends on tree species[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22(6): 1-11.
- [6] 郑鸣鸣, 任正标, 王友良, 等. 间伐强度对杉木 7 a 林生长和结构的影响[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(4): 369-376.
- [7] 巢林, 洪滔, 李键, 等. 中亚热带不同林龄杉木人工林径级结构与林下物种多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 88-96.
- [8] 朱育锋, 肖智华, 彭晚霞, 等. 广西不同龄级桉树人工林植物多样性和群落结构动态变化特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(12): 38-44.
- [9] 贾亚运, 周丽丽, 吴鹏飞, 等. 不同发育阶段杉木人工林林下植被的多样性[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 36-41.
- [10] 龙敏, 钟连香, 吴敏, 等. 阿丁枫人工林生长规律与林下植被多样性探究[J]. 林业调查规划, 2020, 45(4): 29-33; 40.
- [11] 黄小荣, 何峰, 庞世龙, 等. 广西石山人工林灌草多样性与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3024-3033.
- [12] 曾斌, 刘瑞敏, 翟学昌, 等. 不同林龄杉木人工林物种多样性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4877-4882.
- [13] 吴瑞航, 叶尔江·拜克吐尔汗, 努尔塔依·铁利汗, 等. 克拉玛依市乌尔禾区胡杨林下草本层物种多样性研究[J]. 中国城市林业, 2019, 17(4): 7-11.
- [14] 徐馨, 王法明, 邹碧, 等. 不同林龄木麻黄人工林生物多样性与土壤养分状况研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1514-1522.
- [15] 杜彦昌, 于永明, 郭小龙, 等. 秦岭西段日本落叶松人工林不同龄期密度调控对林下植被结构及多样性的影响[J]. 林业科技通讯, 2017, 2(4): 8-12.
- [16] 古丽红, 周毅. 不同林龄桉树林下植被结构与物种多样性[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 46-52.
- [17] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [18] 秦佳双, 王永琪, 马姜明, 等. 广西不同气候条件下马尾松人工林木本植物组成及多样性特征[J]. 广西科学, 2020, 27(2): 154-164.
- [19] 陈伟光, 张卫强, 唐洪辉, 等. 南亚热带不同林龄人工针阔混交林物种多样性研究[J]. 广东林业科技, 2014, 30(6): 45-51.
- [20] 罗洁贤, 俞政民, 聂钰滢, 等. 不同林龄桉树林下植被多样性分析[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(1): 36-42.
- [21] 夏莹莹, 郝丙青, 江泽鹏, 等. 广西油茶人工林林下植物多样性区域变化规律[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3507-3518.
- [22] 陈春如, 安伟莉, 高艳芳, 等. 粤北不同密度杉木林下植被的物种多样性比较[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(5): 73-78.
- [23] 杨立学, 孙跃志. 不同林龄胡桃楸林下植物多样性的差异[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 807-812.
- [24] 李淑君, 李国旗, 王磊, 等. 荒漠草原区不同林龄柠条林物种多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 82-87.
- [25] 冯秋红, 王勇, 谢大军, 等. 修枝对川西亚高山不同林龄云杉人工林生物多样性的短期影响研究[J]. 四川林业科技, 2018, 39(1): 6-9.
- [26] 洪维, 廖宇杰, 陈富强, 等. 龙眼洞林场红锥人工林林下植物组成研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 63-70.
- [27] 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.