

# 林分因子对云顶山不同人工林 林下植物多样性的影响

李婷婷<sup>1</sup>, 鱼舜尧<sup>1</sup>, 吴傲淼<sup>1</sup>, 顾栋磊<sup>1</sup>, 许航<sup>1</sup>, 郝建锋<sup>1,2\*</sup>

(1 四川农业大学 林学院, 成都 611130; 2 水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130)

**摘要:** 该研究采用典型抽样法, 以成都云顶山 5 种人工林——柏木-枫杨林(BF)、银杏-楠木林(YN)、光皮桉木-樟林(GZ)、枫杨-桉木林(FQ)、柏木林(CB)为研究对象, 分析不同人工林的林下植物组成与多样性特征, 并确定影响林下植物多样性的主导林分因子, 为当地人工林经营管理提供理论依据。结果表明: (1) 研究区共记录林下植物 168 种, 隶属于 62 科 130 属; 5 种人工林灌木层与草本层的科属种数均以 GZ 最多。(2) 5 种不同人工林灌木层与草本层的优势种数分别为 7、4、7、6、4 种和 5、4、9、9、10 种, 数量都较少。(3) 5 种人工林的 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Simpson 优势度指数( $H'$ )、物种丰富度指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J_{sw}$ ) 均基本表现为草本层 > 灌木层, BF、GZ 灌木层的  $D$  略高; 灌木层的  $H$ 、 $H'$ 、 $D$  值均以 GZ 最大, 但不同人工林的  $J_{sw}$  差异不显著; 草本层的  $H$ 、 $H'$ 、 $D$ 、 $J_{sw}$  均基本呈现 CB > FQ > GZ > BF > YN 趋势, GZ 的  $D$  值略高于 FQ。(4) 6 个林分因子对灌木层 4 个物种多样性指数的影响均无显著差异; 林分平均树高、平均枝下高、平均胸径、平均冠幅和林分密度是影响草本层  $H$ 、 $D$  的主要因子, 但各林分因子对草本层  $H'$ 、 $J_{sw}$  的影响差异不显著。研究认为, 林分结构对林下草本层物种多样性的影响更大, 平均树高、平均枝下高、平均胸径、平均冠幅、林分密度对草本层多样性有显著影响。

**关键词:** 林分因子; 人工林; 物种多样性; 林分结构; 郁闭度

中图分类号: Q948.12

文献标志码: A

## Effects of Stand Factors on Understory Species Diversity of Different Plantations in Yunding Mountain

LI Tingting<sup>1</sup>, YU Shun Yao<sup>1</sup>, WU Aomiao<sup>1</sup>, GU Donglei<sup>1</sup>, XU Hang<sup>1</sup>, HAO Jianfeng<sup>1,2\*</sup>

(1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Soil and Water Conservation, Desertification Combating of MOE, Sichuan Provincial Colleges and Universities Key Laboratory, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** We investigated the understory species composition and diversity and determined the dominant stand factors affecting the understory species diversity using typical sampling method in five plantations (BF: *Cupressus funebris*-*Pterocarya stenoptera* forest; YN: *Ginkgo biloba*-*Phoebe zhennan* forest; GZ: *Swida wilsoniana*-*Cinnamomum camphora* forest; FQ: *Pterocarya stenoptera*-*Alnus cremastogyne* forest; CB: *Cupressus funebris* forest) in Yunding Mountain, Chengdu, to provide scientific basis for local plantation management. The results showed that: (1) a total of 168 understory plants were recorded, belonging to 62 families and 130 genera. The number of families, genera and species in the shrub layer and herb layer of five plantations was the greatest in the GZ. (2) The number of dominant species in five different

收稿日期: 2019-04-26; 修改稿收到日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(31370628); 四川省教育厅一般项目(自然科学, 15ZB0020); 四川农业大学双支计划(03571838)

作者简介: 李婷婷(1998-), 女, 本科生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 2549189895@qq.com

\* 通信作者: 郝建锋, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学研究。E-mail: haojf2005@aliyun.com

plantation shrub layer was 7, 4, 7, 6, 4, and the number of herb layer was 5, 4, 9, 9, 10, all of which were small. (3) The Shannon-Wiener diversity index ( $H$ ), Simpson dominance index ( $H'$ ), Richness index ( $D$ ), Pielou evenness index ( $J_{sw}$ ) of five plantations were all expressed as: the herb layer  $>$  the shrub layer, the  $D$  of the BF and GZ was slightly higher in the shrub layer. The  $H$ ,  $H'$ , and  $D$  of the shrub layer were the highest in the GZ, and there were no significant differences in the  $J_{sw}$  of the shrub layer among different plantations. The  $H$ ,  $D$  and  $J_{sw}$  of the herb layer were sized as the CB, FQ, GZ, BF and YN, but the  $D$  of the GZ was slightly higher than FQ. (4) There were no significant differences in the effects of six stand factors on the four species diversity indexes in the shrub layer. The main stand factors affecting the  $D$  and  $H$  of the herb layer were average tree height, average branch height, average diameter at breast height, average crown and stand density. Stand factors had no effects on the  $H'$  and  $J_{sw}$  in the herb layer. Research suggested that, the effects of stand structure on species diversity of the herb layer were more significant. Average tree height, average branch height, average diameter at breast height, average crown width and stand density had significant effects on the diversity of the herb layer.

**Key words:** stand factor; plantation; species diversity; stand structure; crown density

人工林是世界森林资源的组成部分之一,在生态环境修复与经济效益获取方面发挥着巨大作用<sup>[1]</sup>。林下植物作为人工林生态系统的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>,在促进生物多样性、森林更新演替、群落养分循环和维持土地生产力上具有关键作用<sup>[1,4-5]</sup>。物种多样性是群落的基本特征<sup>[6-8]</sup>,是生物多样性在物种上的一种表现形式<sup>[9-12]</sup>,也是人工林生态系统稳定性的基础<sup>[13]</sup>。合理的林分结构是森林功能充分发挥的重要基础<sup>[14-15]</sup>,通过调控林分结构实现物种多样性保育一直是森林生态学的研究热点<sup>[16]</sup>。而林分因子则是构成林分结构的重要因素<sup>[17]</sup>,能够通过影响林内光照和空气流通状况等条件对林下植物的生长状况产生影响<sup>[16-17]</sup>。目前已有大量研究表明林分密度<sup>[5-6,13-14]</sup>、郁闭度<sup>[4,15,18-19]</sup>对林下植物多样性有显著影响;部分学者发现林分平均胸径<sup>[4,13,17]</sup>、树高<sup>[13,17]</sup>、枝下高<sup>[17]</sup>等对林下植物多样性的影响也十分显著;然而也有研究表明林分密度<sup>[4]</sup>、平均冠幅<sup>[17]</sup>等林分因子对林下植物多样性无明显影响。总之,林下植物多样性对林分因子的响应机制复杂,不同学者的研究结果不尽相同,研究结论尚未统一。

近几年对人工林林下植物多样性的研究多集中于林分密度<sup>[5-6]</sup>、林分年龄<sup>[1,13,18]</sup>、林窗大小<sup>[10]</sup>、经营措施<sup>[20]</sup>、抚育措施<sup>[2-3]</sup>等宏观角度对林下植物多样性的影响,而立足于微观层面的研究各林分因子对林下物种多样性的综合影响还较少。因此哪些林分因子对林下植物多样性影响较大?不同林分因子对同一植被层次的物种多样性影响是否相同?同一林分因子对不同植被层次的物种多样性影响是否一致?这些问题目前都还未得到解决,如何通过合理科学地调控林分因子来实现人工林物种多样性水平

提升与可持续发展仍是目前亟待解决的问题。鉴于此,本研究通过对云顶山广泛分布的5种人工林林下植物组成、重要值、物种多样性指数及其与林分因子的相关性进行分析,旨在探究不同人工林的林下植物多样性特征,并确定影响林下植物多样性的主要林分因子,以给当地及类似地区的人工林经营管理与天然化培育提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

四川云顶山地理位置介于(30°29'0"~30°57'41" N,104°20'37"~104°52'56"E)之间,面积约为6 700 hm<sup>2</sup>。位于成都平原东北部金堂县境内龙泉山脉中段,山体呈南北走向,南缓北陡,最高海拔982 m。研究区属于亚热带季风气候区,年平均日照1 295.5 h,年平均气温16.6℃,平均气温年较差10℃,常年雨量充沛,平均年降水量920.5 mm,无霜期年平均285 d。土壤较肥沃,以紫色土为主。由于历史上的长期破坏,云顶山的自然原始植被很少,其森林植被基本皆为20世纪五六十年代人工后期培育的生态公益林,经过长期自然演替,研究区内植被类型较为丰富,多以柏木(*Cupressus funebris*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、楠木(*Phoebe zhennan*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、光皮楝木(*Swida wilsoniana*)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)等树种形成的人工混交林。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置与调查** 依据方精云等<sup>[21]</sup>的样地选取方法,在成都市金堂县云顶山的调查研究范围

内,采用典型抽样法,在全面踏查的基础上选取生长环境相似、具有代表性的柏木-枫杨林(BF)、银杏-楠木林(YN)、光皮榉木-香樟林(GZ)、枫杨-桤木林(FQ)和柏木纯林(CB)5种人工林各4个样地,每个样地面积为20 m×30 m。对各样地内的乔木(DBH≥3 cm)进行每木检尺,记录其树高、活枝下高、胸径、冠幅、林分密度以及郁闭度等,树高用DQL-10A测高罗盘仪测量,胸径用胸径尺在树高1.3 m处测量,冠幅取东西南北四个方位树木冠幅的平均值。在各样地内采用对角线法设5 m×5 m灌木样方6个,1 m×1 m草本样方12个,记录灌木(DBH<3 cm)及草本植物的种类、盖度和株(丛)数等。使用全球定位系统(GPS)对调查样地定位,同时记录各样地的海拔、坡度和坡向等信息。各样地基本情况见表1。

**1.2.2 物种多样性数据处理** 统计与计算5种人工林灌木层与草本层植物的重要值、Shannon-Wiener多样性指数( $H$ )、Simpson优势度指数( $H'$ )、物种丰富度指数( $D$ )以及Pielou均匀度指数( $J_{sw}$ ),公式如下:

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

(2) Shannon-Wiener多样性指数:

$$H = - \sum_{i=a}^S P_i \log P_i$$

(3) Simpson优势度指数:  $H' = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

(4)物种丰富度指数:  $D = S$

(5)Pielou均匀度指数:  $J_{sw} = \frac{- \sum P_i \log P_i}{\log S}$

表1 样地概况

Table 1 General situation of the sample plot

样地编号 Plot number	海拔 Altitude/m	坡度 Slop/°	坡向 Aspect/°	郁闭度 Canopy density	密度 Density /(trees · hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 Average diameter/cm	平均树高 Average height/m	类型 Type
1	926	16	NW45	0.8	520	25.8	16.3	BF
2	925	15	NW50	0.8	470	21.6	14.2	BF
3	925	18	NW45	0.7	570	23.2	15.8	BF
4	923	14	NW50	0.6	550	20.1	13	BF
5	908	3	—	0.8	530	19.3	13.8	YN
6	906	5	—	0.8	700	21.1	13	YN
7	908	9	—	0.7	550	22.9	14.4	YN
8	908	3	—	0.8	500	25.6	15.8	YN
9	941	12	正西	0.8	1000	15.3	10.2	GZ
10	941	17	正西	0.8	1115	10.9	8.4	GZ
11	934	13	正西	0.9	900	16.5	11.7	GZ
12	941	19	正西	0.8	880	16.4	11.8	GZ
13	767	5	SE44	0.8	800	14.7	9.5	FQ
14	770	4	SE45	0.9	830	13.5	9.3	FQ
15	771	5	SE50	0.8	880	14.2	9.3	FQ
16	774	11	SE45	0.7	680	15.3	8.7	FQ
17	841	22	SW40	0.7	750	17	10.2	CB
18	841	12	SW46	0.8	1115	15.7	8.5	CB
19	837	17	SW48	0.7	1020	13.6	9.1	CB
20	835	16	SW50	0.8	1065	15.9	9.4	CB

注: NW. 西北; SE. 东南; SW. 西南; BF. 柏木-枫杨林; YN. 银杏-楠木林; GZ. 光皮榉木-香樟林; FQ. 枫杨-桤木林; CB. 柏木林; 文下表示的意义相同

Note: NW. Northwest; SE. Southeast; SW. Southwest; BF. *Cupressus funebris*-*Pterocarya stenoptera* forest; YN. *Ginkgo biloba*-*Phoebe zhennan* forest; GZ. *Swida wilsoniana*-*Cinnamomum camphora* forest; FQ. *Pterocarya stenoptera*-*Alnus cremastogyne* forest; CB. *Cupressus funebris* forest; the same as below

上述各式中,  $P_i$  为第  $i$  种的个体数  $n_i$  占有所有种个体总数  $n$  的比例, 即  $P_i = n_i/n, i=1, 2, 3, \dots, S$ ,  $S$  为物种数。本文采用 DPS 7.05 中的单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析不同人工林物种多样性指数间的差异, 用相关分析(correlation analysis)计算林分因子与物种多样性指数之间的关系; 运用 Microsoft Office Excel 2010、Origin 2017 统计软件进行数据整理与统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同人工林的林下植物组成

5 种不同人工林的物种组成如图 1 所示。研究区共记录林下植物 168 种植物, 隶属于 62 科 130 属。共记录灌木 30 科 66 属 85 种, 以忍冬科(Caprifoliaceae)、豆科(Leguminosae)、蔷薇科(Rosaceae)、桑科(Moraceae)等为主; 记录草本植物 37 科 70 属 83 种, 以菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、唇形科(Labiatae)、百合科(Liliaceae)等为主。从 BF、YN、GZ、FQ 到 CB, 灌木层植物科属种分布情况为: 15 科 31 属 35 种、18 科 24 属 25 种、30 科 39 属 42 种、26 科 33 属 34 种、22 科 31 属 35 种; 草本层分布情况为: 25 科 31 属 31 种、18 科 25 属 27 种、31 科 41 属 45 种、29 科 39 属 41 种、21 科 36 属 41 种。可以看出, 5 种人工林灌木层与草本层的科属种数均以 GZ 最大, 其林下物种总数高达 87 种, 说明其物种组成最丰富, 因此认为 GZ 能够维持林下较高的物种丰富度。

### 2.2 不同人工林的林下物种重要值

重要值分析结果显示(表 2), 灌木层中, BF 有优势种 7 种, 蚊母树(*Distylium racemosum*, 0.130 2)、

箭竹(*Fargesia spathacea*, 0.104 7)为明显优势种; YN 有优势种 4 种, 蚊母树(0.340 2)、五叶地锦(*Parthenocissus quinquefolia*, 0.153 0)具有明显优势; GZ 有优势种 7 种, 蚊母树(0.142 7)、蕊帽忍冬(*Lonicera pileata*, 0.103 7)为明显优势种; FQ 有优势种 6 种, 石海椒为明显优势种(*Reinwardtia indica*, 0.285 9); CB 有优势种 4 种, 黄荆(*Vitex negundo*, 0.359 6)、石海椒(0.114 8)优势成分明显。草本层中, BF 有优势种 5 种, 扁竹兰(*Iris confusa*, 0.286 1)、火麻(*Cannabis sativa*, 0.145 7)为明显优势种; YN 有优势种 4 种, 荩草(*Setaria chondrachine*, 0.218 1)、火麻(0.230 3)、韩信草(*Scutellaria indica*, 0.131 0)具有明显优势; GZ 有优势种 9 种, 荩草(0.258 1)为明显优势种; FQ 有优势种 9 种, 益母草(*Leonurus artemisia*, 0.161 4)、土牛膝(*Achyranthes aspera*, 0.103 2)为明显优势种; CB 有优势种 10 种, 荩草(0.181 8)、白接骨(*Asystasiella neesiana*, 0.116 1)优势成分明显。

可以看出, 不同人工林灌木层中蚊母树、石海椒、黄荆等喜光或喜温的阳生性树种具有主要优势, 而草本层中以荩草、韩信草、火麻等阴性、耐阴性或对环境适应能力较强的植物占据主导地位, 说明研究区林下灌木层的光照条件较为充足, 而上层植物对林下草本层的底荫作用较强。此外还发现, 珊瑚朴(*Celtis julianae*)、异叶鼠李(*Rhamnus heterophylla*)、八角枫(*Alangium chinense*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、枇杷(*Eriobotrya japonica*)、油桐(*Vernicia fordii*)等乔木树种的幼苗或幼树在 5 种人工林的灌木层中均有分布, 说明这些树种都为对当地环境适生良好且更新能力较强的乡土树种。

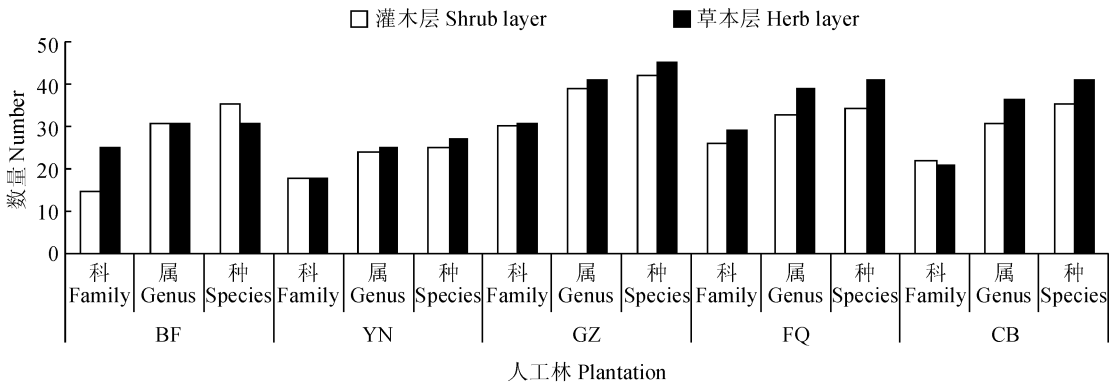


图 1 不同人工林林下物种组成

Fig. 1 The understory species composition of different plantations

表 2 不同人工林灌木层和草本层的重要值

Table 2 Important value of shrub layer and herb layer with different plantations

层次 Layer	物种 Species name	重要值 Important value				
		BF	YN	GZ	FQ	CB
灌木层 Shrub layer	蚊母树 <i>Distylium racemosum</i>	0.130 2	0.340 2	0.142 7	—	—
	箭竹 <i>Fargesia spathacea</i>	0.104 7	0.010 3	0.015 0	0.091 0	—
	蕊帽忍冬 <i>Lonicera pileata</i>	0.099 0	0.020 0	0.103 7	0.012 3	0.098 2
	白箭 <i>Acanthopanax trifoliatum</i>	0.081 0	0.033 7	0.068 9	0.008 9	—
	五叶地锦 <i>Parthenocissus quinquefolia</i>	0.079 7	0.153 0	0.058 9	0.008 2	—
	石海椒 <i>Reinwardtia indica</i>	0.040 6	0.035 1	0.096 9	0.285 9	0.114 8
	豆腐柴 <i>Premna microphylla</i>	0.032 2	0.005 1	—	0.073 6	0.043 2
	珊瑚朴 <i>Celtis julianae</i>	0.064 8	0.061 4	0.080 0	0.015 1	0.056 8
	荚蒾 <i>Viburnum dilatatum</i>	0.057 1	—	0.023 6	0.083 1	0.099 4
	棕榈 <i>Trachycarpus fortunei</i>	—	—	0.006 1	—	—
	云南土沉香 <i>Excoecaria acericifolia</i>	0.078 7	—	0.009 6	—	—
	四川山胡椒 <i>Lindera setchuenensis</i>	—	—	0.057 3	0.005 4	0.003 1
	黄荆 <i>Vitex negundo</i>	—	—	—	0.062 9	0.359 6
	油桐 <i>Vernicia fordii</i>	—	—	0.002 0	0.053 9	0.005 9
	BF:其余 25 种 The remaining species belonging to BF	0.232 0	—	—	—	—
	YN:其余 17 种 The remaining species belonging to YN	—	0.341 3	—	—	—
	GZ:其余 30 种 The remaining species belonging to GZ	—	—	0.335 3	—	—
	FQ:其余 23 种 The remaining species belonging to FQ	—	—	—	0.299 6	—
	CB:其余 27 种 The remaining species belonging to CB	—	—	—	—	0.218 9
	合计 Total	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
草本层 Herb layer	荻草 <i>Setaria chondrachne</i>	0.022 8	0.218 1	0.258 1	0.084 4	0.181 8
	大麻 <i>Cannabis sativa</i>	0.145 7	0.230 3	0.038 9	0.033 1	—
	韩信草 <i>Scutellaria indica</i>	0.041 3	0.131 0	0.081 4	—	0.037 9
	细野麻 <i>Boehmeria gracilis</i>	0.081 7	0.050 3	0.021 7	0.045 7	0.016 0
	麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	0.033 8	0.021 5	0.008 0	0.072 1	0.048 8
	求米草 <i>Oplismenus undulatifolius</i>	0.005 7	0.012 2	0.008 0	0.025 7	0.044 7
	过路黄 <i>Lysimachia christinae</i>	0.008 3	0.005 3	0.003 9	—	0.037 2
	黄鹌菜 <i>Youngia japonica</i>	—	—	0.045 5	0.026 1	0.036 9
	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	—	—	0.022 0	0.025 1	0.036 2
	爵床 <i>Rostellularia procumbens</i>	—	—	—	0.037 2	0.034 5
	扁竹兰 <i>Iris confusa</i>	0.286 1	0.049 4	0.020 8	—	—
	白接骨 <i>Asystasiella neesiana</i>	0.033 8	0.020 4	0.032 1	0.027 4	0.116 1
	益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	—	—	0.017 7	0.161 4	0.031 1
	土牛膝 <i>Achyranthes aspera</i>	0.011 9	0.004 2	0.013 0	0.103 2	0.012 9
	莎草蕨 <i>Schizaea digitata</i>	0.004 1	—	0.034 8	0.058 6	0.010 8
	乌莓莓 <i>Cayratia japonica</i>	0.002 1	0.021 0	0.009 2	0.032 1	—
	舞花姜 <i>Globba racemosa</i>	0.013 7	0.038 8	0.058 6	—	—
	白英 <i>Solanum lyratum</i>	—	—	0.050 1	0.002 2	—
	薯蓣 <i>Dioscorea opposita</i>	—	—	0.024 6	—	0.002 2
	三花蕨 <i>Caryopteris terniflora</i>	—	—	—	—	0.055 8
楼梯草 <i>Elatostema involucreatum</i>	0.072 5	—	—	—	—	
BF:其余 17 种 The remaining species belonging to BF	0.236 4	—	—	—	—	
YN:其余 15 种 The remaining species belonging to YN	—	0.197 4	—	—	—	
GZ:其余 27 种 The remaining species belonging to GZ	—	—	0.251 7	—	—	
FQ:其余 27 种 The remaining species belonging to FQ	—	—	—	0.265 8	—	
CB:其余 26 种 The remaining species belonging to CB	—	—	—	—	0.297 2	
合计 Total	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	

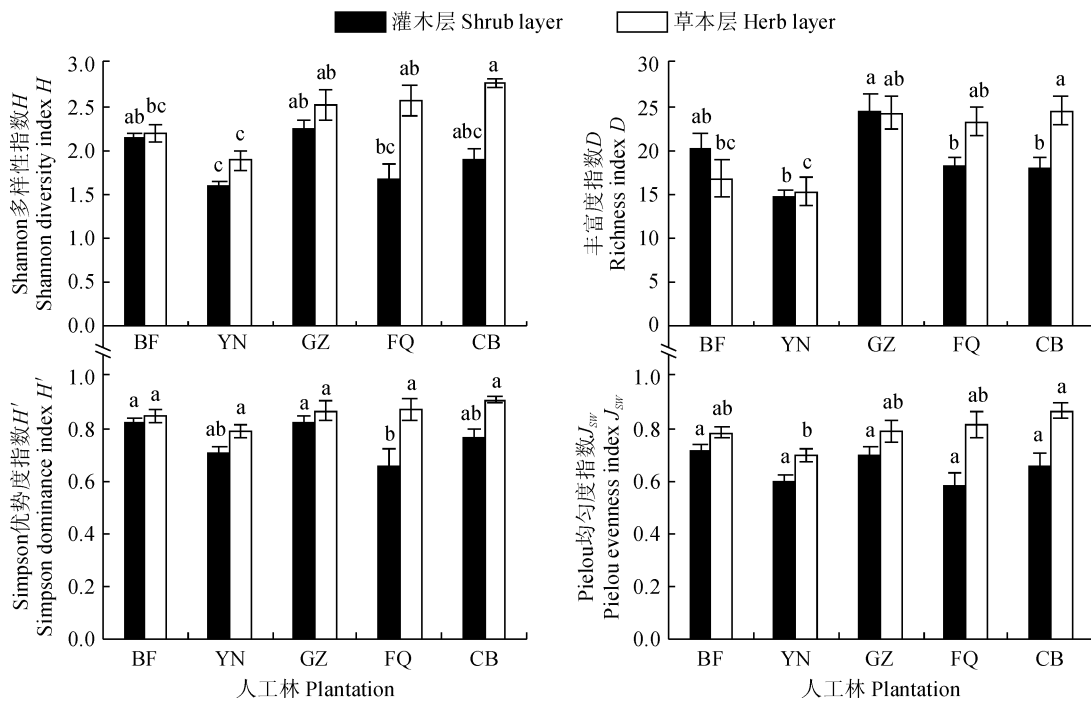
### 2.3 不同人工林的林下物种多样性指数

5 种不同人工林灌木层和草本层的 Shannon-Wiener 多样性指数  $H$ 、Simpson 优势度指数  $H'$ 、物种丰富度指数  $D$ 、Pielou 均匀度指数  $J_{sw}$  的分析结果表明(图 2),不同人工林的  $H$ 、 $H'$ 、 $D$ 、 $J_{sw}$  表现为草本层 > 灌木层;但 BF、GZ 的  $D$  表现为灌木层 > 草本层,这是因为两者的灌木层中有较多乔木树种的幼苗和幼树,使灌木层物种丰富度有一定程度的增加。不同人工林灌木层的  $H$ 、 $H'$ 、 $D$  差异性显著( $P < 0.05$ ), $J_{sw}$  无显著差异( $P > 0.05$ ); $H$ 、 $H'$ 、 $D$  均以 GZ 最大, $H$ 、 $D$  均以 YN 最小, $H'$ 、 $J_{sw}$  均以 FQ 最

小。不同人工林草本层的  $H$ 、 $D$ 、 $J_{sw}$  差异性显著, $H'$  无显著差异; $H$ 、 $H'$ 、 $D$ 、 $J_{sw}$  总体呈现  $CB > FQ > GZ > BF > YN$  规律,GZ 的  $D$  稍高于 FQ。

### 2.4 林分因子与物种多样性指数之间的关系

本研究用相关分析计算了 6 个林分因子与 4 个物种多样性指数之间的关系,以期获取影响林下物种多样性的主要林分因子。相关性分析结果(表 3)表明,灌木层的 4 个物种多样性指数与 6 个林分因子均无显著相关性( $P > 0.05$ )。草本层的  $H'$ 、 $J_{sw}$  与 6 个林分因子均无显著相关性;草本层的  $H$ 、 $D$  与除郁闭度外的其余 5 个林分因子均具有显著( $P$



不同小写字母表示不同人工林间的数据差异显著( $P < 0.05$ )

图 2 不同人工林的林下物种多样性指数

Different lowercase letters indicate significant differences in data between different plantations

Fig. 2 Diversity index of understory plants in different plantations

表 3 林分因子与物种多样性指数之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between stand factors and species diversity indexes

林分因子 Stand factor	灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			
	$H$	$H'$	$D$	$J_{sw}$	$H$	$H'$	$D$	$J_{sw}$
平均树高 Average tree height/m	-0.01	0.17	-0.14	0.06	-0.59**	-0.34	-0.66**	-0.37
平均枝下高 Average branch height/m	-0.23	-0.06	-0.11	-0.21	-0.48*	-0.34	-0.49*	-0.35
平均胸径 Average diameter at breast height/cm	-0.1	0.11	-0.22	-0.02	-0.54*	-0.28	-0.62**	-0.32
平均冠幅 Average crown/m	0.01	0.11	-0.06	0.04	-0.55*	-0.38	-0.54*	-0.4
林分密度 Stand density/(株·hm <sup>-2</sup> )	0.22	0.05	0.34	0.1	0.58**	0.31	0.66**	0.35
郁闭度 Crown density	0.03	-0.09	0.05	0	0.21	0.11	0.27	0.11

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$

$<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )相关性,其中  $H$ 、 $D$  与平均枝下高、平均冠幅均呈显著负相关,与平均树高呈极显著负相关,与林分密度呈极显著正相关,与平均胸径分别呈显著负相关与极显著负相关。可见林分因子对草本层多样性的影响更大,平均树高、平均枝下高、平均胸径、平均冠幅、林分密度是限制研究区草本层多样性的主要林分因子。

## 3 讨 论

### 3.1 不同人工林对林下物种组成的影响

林下植物组成是群落的重要特征<sup>[1,22]</sup>,通过对其研究能进一步加深对群落的了解。Rawlika 等<sup>[23]</sup>、赵耀等<sup>[19]</sup>的研究结果表明,不同树种组成的林分其林下物种组成与分布不同。与以上研究结果相似,本研究中 5 种人工林林下物种组成具有差异,灌木层与草本层的科属种数均以 GZ 最多。表明研究区的林下植物组成易受林内微环境和乔木层特征的影响<sup>[1]</sup>,同时说明 5 种人工林中以 GZ 林下物种组成最丰富,在相同的空间资源里能容纳更多物种的生长更新。各人工林灌木层与草本层的优势种种类较单一,最多仅为 10 种。这可能是由于研究区林分郁闭度普遍较小,光照辐射经乔木冠层拦截后仍能满足光需条件较高的灌木树种的生长,使灌木层中蚊母树、箭竹、石海椒等个别竞争力强的阳生性树种占据稳固优势地位;而灌木层光照资源充足使其在林下空间充分扩张而占据宽阔的生态位,使到达草本层的光照辐射较为稀少,故草本层中葶草、韩信草、火麻等少数环境适应能力极强的逆境耐受型种群具有绝对优势。

### 3.2 不同人工林对林下植物多样性的影响

物种多样性是生态系统功能维持和结构稳定的基础<sup>[7,24]</sup>,本研究中林下植被不同类型、不同层次之间的物种多样性水平不同。各人工林的  $H$ 、 $H'$ 、 $D$ 、 $J_{sw}$  基本均表现为草本层 $>$ 灌木层,说明人工林中草本植物相较于灌木对林下物种多样性的贡献更大,与张柳桦等<sup>[14]</sup>、赵耀等<sup>[19]</sup>的研究结果相似,这是由于草本植物生活史短,生态位宽,环境适应能力非常强<sup>[25]</sup>。张柳桦等<sup>[14]</sup>认为人工林群落中灌木层最具更新活力,因此人工林林下物种多样性水平与更新潜力主要取决于灌木层。在本研究中,灌木层的  $H$ 、 $H'$  和  $D$  均在 GZ 达到最大,因此认为 GZ 林下植被更新演替最快、总体多样性最高,若仅从物种多样性角度来讲,当地建设生态公益林可优先考虑经营光皮栎木-香樟混交林。草本层中  $H$ 、 $H'$ 、 $D$  和  $J_{sw}$

基本均呈现出  $CB>FQ>GZ>BF>YN$  规律,说明 CB 草本层多样性最高,这可能是由于柏木作为针叶树种,其林隙相对较多,林下光照资源也更为充足,为种子库中非耐阴性草本先锋物种种子的入侵和萌发创造了有利条件<sup>[19]</sup>。

### 3.3 林分因子对林下植物多样性的影响

林下植物作为森林生态系统的重要组成部分,在提高森林生态系统的整体功能方面具有重要作用<sup>[2]</sup>。Tinya 等<sup>[26]</sup>认为在海拔、地形、地貌、土壤养分以及光照等立地条件中,光照条件是影响林下植物组成的主要因素之一。在本研究中,6 个林分因子与灌木层的 4 个物种多样性指数均无显著相关性,分析原因认为可能是由于灌木直接位于林冠之下,光照是影响其生长发育的主要影响因子<sup>[6]</sup>,而研究区林分郁闭度普遍较小,灌木植物光照来源充足,因此各林分因子对灌木生长更新的限制作用不强,这与陈小红等<sup>[13]</sup>的研究结果相似。

草本植物是森林生态系统及其功能的重要组成部分<sup>[27]</sup>,其更新周期短、适应能力强<sup>[23,25-26]</sup>,相较于灌木对林下微环境变化更敏感<sup>[6]</sup>。赵耀等<sup>[19]</sup>、矢佳昱等<sup>[22]</sup>、陈小红等<sup>[13]</sup>众多学者的研究表明,林分结构对草本层的物种多样性及其分布具有极大的影响力。与以上研究结果相似,本研究中平均树高、平均枝下高、平均胸径、平均冠幅、林分密度与草本层的  $H$ 、 $D$  均有显著或极显著相关性,说明林分结构对草本层多样性具有显著影响;而长势旺盛的灌木层对光照辐射的阻隔使草本层的光照条件并无显著变化,因此郁闭度与草本层  $H$ 、 $D$  的相关性不强。各林分因子与草本层  $H'$ 、 $J_{sw}$  均无显著相关性,说明林分因子对群落中种群的集中度与均匀度无较大影响<sup>[7]</sup>,这与朱媛君等<sup>[17]</sup>对杨树人工林的研究结果一致,而与陈小红等<sup>[13]</sup>对马尾松人工林的研究结果不同。分析认为,这可能是由于本研究与前者研究的人工林均处于成熟林或过熟林阶段,群落林相、环境等因子相对稳定,使物种分布趋于稳定<sup>[19]</sup>;同时经过前期发育过程中的激烈竞争和遴选,到群落发育后期林下的多数物种分别找到了各自的生态位<sup>[18]</sup>,故林分因子对草本层  $H'$ 、 $J_{sw}$  的影响不显著。而后者研究的马尾松人工林主要处于幼龄林、中龄林阶段,林内环境复杂多样、易变化,因此草本层多样性易受各方面因素的影响。

### 3.4 对云顶山人工林可持续发展的思考

研究区林分郁闭度普遍较低,而林分密度是调控人工林林分结构的直接手段<sup>[17]</sup>,可以有效改善林

下光照条件。相关研究表明密度过大或过小都不利于林下物种多样性的维持,只有在适宜密度下林下物种才有最多的生存机会<sup>[5-6]</sup>。因此对于云顶山的人工林群落,应注重保护林内珊瑚朴、异叶鼠李、八角枫、构树等乡土树种,并适当合理补植这些乔木树种以增大林分郁闭度,同时适当引入蚊母树、蕊帽忍冬、葶草、韩信草等林下植物,促进乔灌草混交比例的合理配置,形成复层混交异龄林,使群落结构向“潜在自然植被”方向演化<sup>[14]</sup>。同时后期管护中还应定期对林木进行疏伐、修枝等,以保持最佳林分郁闭度,促进林下灌草层物种多样性的发展<sup>[18]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 尤业明,徐佳玉,蔡道雄,等. 广西凭祥不同年龄红椎林林下植物物种多样性及其环境解释[J]. 生态学报, 2016, **36**(1): 164-172.  
YOU Y M, XU J Y, CAI D X, *et al.* Environmental factors affecting plant species diversity of understory plant communities in a *Castanopsis hystrix* plantation chronosequence in Pinxiang, Guangxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(1): 164-172.
- [2] 原志坚,王孝安,王丽娟,等. 抚育对黄土高原油松人工林林下植被功能多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(2): 339-346.  
YUAN Z J, WANG X A, WANG L J, *et al.* Effects of tending on functional diversity of understory vegetation in *Pinus tabulaeformis* plantation on the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(2): 339-346.
- [3] 王丽娟,王孝安,原志坚,等. 抚育对黄土高原人工油松林林下植被的影响[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(8): 1 301-1 309.  
WANG L J, WANG X A, YUAN Z J, *et al.* Effects of tending on undergrowth vegetation of artificial *Pinus tabulaeformis* forests on the Loess Plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(8): 1 301-1 309.
- [4] 曹梦,潘萍,欧阳勋志,等. 飞播马尾松林林下植被组成、多样性及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(1): 1-8.  
CAO M, PAN P, OUYANG X Z, *et al.* Relationships between the composition and diversity of understory vegetation and environmental factors in aerially seeded *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(1): 1-8.
- [5] 王媚臻,毕浩杰,金锁,等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(3): 981-998.  
WANG M Z, BI H J, JIN S, *et al.* Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain [J].

## 4 结论

综上所述,林分结构对草本层物种多样性的影响更大,林分平均树高、平均枝下高、平均胸径、平均冠幅、林分密度对草本层多样性均有显著影响;此外发现,当地人工林建设可以光皮柞木-香樟混交林作为优选类型,在森林经营过程中还需注重调控林分郁闭度,以促进林下物种多样性的发展。林下植被生长较快,更新相对频繁,林分冠层结构随季节更替也有较大变化,因此林分因子对林下植物多样性影响的季节性、动态性规律仍有待进一步研究。

*Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 981-998.

- [6] 张柳桦,齐锦秋,李婷婷,等. 林分密度对新津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(15): 1-9.  
ZHANG L H, QI J Q, LI T T, *et al.* Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Wenfeng Mountain, Xinjin County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(15): 1-9.
- [7] 姚俊宇,齐锦秋,张柳桦,等. 人为干扰对碧峰峡山矾次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(10): 2 942-2 950.  
YAO J Y, QI J Q, ZHANG L H, *et al.* Effects of anthropogenic disturbance on species diversity and soil physicochemical properties of *Symplocos sumuntia* secondary forest in Bifengxia [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(5): 2 942-2 950.
- [8] XU Z F, ZHU H, WANG Y X, *et al.* Species diversity dynamics of fragmented tropical rainforests in the lower-Lancang/Upper-Mekong River basin [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(5): 585-593.
- [9] 赵娜,鲁绍伟,李绍宇,等. 北京松山自然保护区典型植物群落物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(11): 2 120-2 128.  
ZHAO N, LU S W, LI S N, *et al.* Study on plant diversity of typical plant communities in Songshan Nature Reserve, Beijing [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(11): 2 120-2 128.
- [10] 姚俊宇,伍炫蓓,孙千惠,等. 林窗大小对川西马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(2): 214-220.  
YAO J Y, WU X B, SUN Q H, *et al.* Effects of canopy gap size on understory species diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in western Sichuan [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(2): 214-220.
- [11] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, LÓPEZ-MATA L. Plant species richness and diversity along an altitudinal gradient in the Sier-



- ra Nevada, Mexico [J]. *Diversity and Distributions*, 2005, **11**(6): 567-575.
- [12] TILMAN D, REICH P B, KNOPS J M H. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment [J]. *Nature*, 2006, **441**(7 093): 629-632.
- [13] 陈小红,赵安玖,张健,等.不同林龄马尾松林下植物多样性与环境特征[J].四川农业大学学报,2017,**35**(2): 186-192+233.
- CHEN X H, ZHAO A J, ZHANG J, *et al.* Understory plant diversity and environmental characteristics of different age *Pinus massoniana* plantations [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, **35**(2): 186-192+233.
- [14] 张柳桦,齐锦秋,柳苹玉,等.林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响[J].西北植物学报,2018,**38**(1): 166-175.
- ZHANG L H, QI J Q, LIU P Y, *et al.* Effects of stand density on community structure and species diversity of *Eucalyptus robusta* plantation [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(1): 166-175.
- [15] 秦随涛,龙翠玲,吴邦利.地形部位对贵州茂兰喀斯特森林群落结构及物种多样性的影响[J].北京林业大学学报,2018, **40**(7): 18-26.
- QIN S T, LONG C L, WU B L. Effects of topographic sites on the community structure and species diversity of karst forest in Maolan, Guizhou Province of southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40**(7): 18-26.
- [16] 张建宇,王文杰,杜红居,等.大兴安岭呼中地区3种林分的群落特征、物种多样性差异及其耦合关系[J].生态学报,2018, **38**(13): 4 684-4 693.
- ZHANG J Y, WANG W J, DU H J, *et al.* Differences in community characteristics, species diversity, and their coupling associations among three forest types in the Huzhong Area, Daxinganling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(13): 4 684-4 693.
- [17] 朱媛君,杨晓晖,时忠杰,等.林分因子对张北杨树人工林林下草本层物种多样性的影响[J].生态学报,2018,**37**(10): 2 869-2 879.
- ZHU Y J, YANG X H, SHI Z J, *et al.* The influence of stand factors on species diversity of herb layer in Zhangbei poplar plantations [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(10): 2 869-2 879.
- [18] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等.不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J].生态学报,2014,**33**(10): 2 610-2 617.
- CUI N J, ZHANG D J, LIU Y, *et al.* Plant diversity and soil physicochemical properties under different aged *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(10): 2 610-2 617.
- [19] 赵耀,王百田.晋西黄土区不同林地植物多样性研究[J].北京林业大学学报,2018,**40**(9): 45-54.
- ZHAO Y, WANG B T. Plant diversity of different forestland in the loess region of western Shanxi Province, northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40**(9): 45-54.
- [20] 吴文,李月辉,胡远满.不同营林措施对林下层多样性和群落结构的影响[J].生态环境学报,2018,**27**(7): 1 369-1 376.
- WU W, LI Y H, HU Y M. Effects of different management on plant diversity and vegetation structures in understory of forests [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(7): 1 369-1 376.
- [21] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容和规范[J].生物多样性,2009,**17**(6): 533-548.
- FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, *et al.* Methods and protocols for plant community inventory [J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 533-548.
- [22] 矢佳昱,韩海荣,程小琴,等.辽河源自然保护区不同年龄天然油松林下草本层植物物种多样性及其环境解释[J].生态学杂志,2018,**37**(5): 1 326-1 333.
- SHI J Y, HAN H R, CHENG X Q, *et al.* Environmental factors affecting plant species diversity of understory herbaceous communities in a chronosequence of *Pinus tabulaeformis* forest in Liaoheyuan Nature Reserve [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(5): 1 326-1 333.
- [23] RAWLIKA M, KASPROWICZA M, JAGODZI ŃSKIB A M. Differentiation of herb layer vascular flora in reclaimed areas depends on the species composition of forest stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, (409): 541-551.
- [24] ASHTON L A, BARLOW H S, NAKAMURA A, *et al.* Diversity in tropical ecosystems: The species richness and turnover of moths in Malaysian rainforests [J]. *Insect Conservation and Diversity*, 2015, (8): 132-142.
- [25] 陈杰,郭屹立,卢训令,等.伊洛河流域草本植物群落物种多样性[J].生态学报,2012,**32**(10): 3 021-3 030.
- CHEN J, GUO Y L, LU X L, *et al.* Species diversity of herbaceous communities in the Yiluo River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(10): 3 021-3 030.
- [26] TINYA F, MÁRIALIGETI S, KIRÁLY I, *et al.* The effect of light conditions on herbs, bryophytes and seedlings of temperate mixed forests in Western Hungary [J]. *Plant Ecology*, 2009, **204**(1): 69-81.
- [27] HORVAT V, BIURRUN I, GARCÍ-MIJANGOS I. Herb layer in silver fir-beech forests in the western Pyrenees: Does management affect species diversity [J]? *Forest Ecology and Management*, 2017, (385): 87-96.