

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190202

林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响

金锁 毕浩杰 刘佳 刘宇航 王宇 齐锦秋 郝建锋
(四川农业大学林学院, 四川 成都 611130)

摘要:【目的】探索林分密度对柏木人工林群落结构和林下物种多样性及林下物种多样性与林分因子相关性的影响,为云顶山柏木人工林经营管理提供依据。【方法】以四川云顶山5种不同林分密度(A~E: 500、650、800、950、1 100株/hm²)60年生柏木人工林为研究对象,采用典型样地法进行植被调查,综合分析其群落结构、物种组成和物种多样性指数(Pielou均匀度指数 J_{sw} 、Simpson优势度指数 H' 、Shannon-Wiener多样性指数 H 、和物种丰富度指数 D)。【结果】(1)研究区内共记录植物170种,隶属于68科136属。不同密度下灌木层或草本层优势种多属阴性、耐阴性或适应性强的植物。(2)随着林分密度的减小,灌木层物种多样性指数均呈先增后减的单峰变化,基本在密度B达到最大,除 D 外均无显著差异($P > 0.05$);草本层 D 、 H 、 H' 则呈先增后减再增再减的双峰变化,在密度B和D出现峰值,不同密度间各指数差异性显著。林分密度和郁闭度与灌木层 D 呈极显著负相关,与草本层 H 、 H' 、 J_{sw} 呈显著或极显著正相关。(3)密度A群落径级和高度级结构均呈波动状不规则分布,其余密度下均呈单峰型分布。密度B群落内中、大乔木个体占比相对较多,不同大小个体数在群落中分布趋于合理,群落稳定性较好。【结论】650株/hm²为云顶山柏木人工林的相对最适林分密度,利于维持群落结构稳定并提高林下物种多样性。

关键词: 林分密度; 柏木人工林; 群落结构; 物种多样性

中图分类号: S718.54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)01-0010-08

引文格式: 金锁, 毕浩杰, 刘佳, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1):10-17. Jin Suo, Bi Haojie, Liu Jia, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1): 10-17.

Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain, southwestern China

Jin Suo Bi Haojie Liu Jia Liu Yuhang Wang Yu Qi Jinqiu Hao Jianfeng
(School of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] The effects of stand density on the community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation and the correlation between species diversity and stand factors were explored, providing a basis for the management of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountains, southwestern China. [Method] The research objects were five different stand densities (A-E: 500, 650, 800, 950, 1 100 tree/ha) of 60 years *Cupressus funebris* in Yunding Mountain, Sichuan Province, southwestern China. The vegetation was investigated by typical plot method. The community structure, species composition and species diversity index (Pielou evenness index J_{sw} , Simpson dominance index H' , Shannon-Wiener diversity

收稿日期: 2019-05-07 修回日期: 2019-06-14

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

第一作者: 金锁。主要研究方向: 森林生态学。Email: 1244230453@qq.com 地址: 611130 四川省成都市温江区惠民路211号四川农业大学林学院。

责任作者: 郝建锋, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林生态学。Email: haojf2005@aliyun.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

index H and species richness index D) were comprehensively analyzed. [Result] (1) A total of 170 species of plants were recorded in the study area, belonging to 136 genera and 68 families. The dominant species in shrub layer or herb layer under different densities were mostly shady, shade-tolerant or adaptable plants. (2) With the decrease of stand density, the trend of species diversity index in shrub layer increased first and then decreased. It reached the maximum at density B, with no significant difference except D ($P > 0.05$). The trend of D , H and H' in herbaceous layer increased first, then decreased, then increased and then decreased. The peak values appeared in density B and D, and there were significant differences among different densities. Stand density and canopy density were negatively correlated with shrub layer D , and significantly positively correlated with herb layer H , H' and J_{sw} . (3) Distribution between diameter and height structure of density A community was irregular and fluctuated, while distribution of other densities was unimodal. In density B community, medium and large individual trees accounted for a relatively large proportion of individuals, and the stability of the community was better. [Conclusion] The relative optimum stand density of cypress plantation in Yunding Mountain is 650 tree/ha, which is very helpful to maintain the stability of community structure and improve the species diversity under the forest.

Key words: stand density; *Cupressus funebris* plantation; community structure; species diversity

群落结构是评价植物群落稳定性、生长发育状况以及预测林分结构发展的重要指标^[1]。物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式^[2], 能够体现群落内物种通过对资源环境的竞争及协调利用形成的共存关系, 并有效度量群落功能的复杂性与稳定性^[3-4]。林分密度是指林木生长过程中单位面积上的立木株数^[5]。林分密度作为评价立地生产力和调控森林经营的重要因子, 影响林内光照、水分及养分等的分配进而引起林下植被物种分布及多样性水平的变化^[6-7]。王树森等^[8]研究表明, 林分密度适宜能够提高人工林物种多样性且利于其发展为天然群落。

据我国第八次森林资源清查数据显示, 我国人工林面积 0.69 亿 hm^2 , 居世界首位^[9]。人工林能够提供大量木材以缓解对天然林资源的采伐压力, 同时兼具天然林涵养水源、调节气候等生态功能。但现有人工林普遍存在林分结构简单、地力衰退严重、生态系统功能脆弱等问题^[10]。众多学者就人工林优化林分结构、提高物种多样性以增强群落稳定性等促进其生态效益发挥的途径展开研究^[11-14]。了解林分密度与群落结构和物种多样性之间的关系, 对实现人工林近自然化经营具有重要意义。

柏木(*Cupressus funebris*)属柏科(Cupressaceae)柏木属, 为我国特有树种, 具有喜光、寿命长、适应性强且材质细密等特点, 在保持水土、改善生态环境等方面也具有重要作用^[15]。柏木林分属我国亚热带常绿针叶林, 是四川盆地丘陵区的主要森林类型, 多为人工林。川中丘陵地区营建的柏木林因造林密度不合理、树种单一及经管措施不当等影响, 大多已退化为生境质量较差、林相残败、结构简单的低产低效林^[16]。目前, 已有不少关于不同林分密度下人工林

群落结构及物种多样性特征的研究, 但已有研究多集中在油松(*Pinus tabulaeformis*)^[17]、马尾松(*Pinus massoniana*)^[5]、桉树(*Eucalyptus robusta*)^[18]等树种, 柏木人工林的相关研究报道较少且研究结果不尽相同。鉴于此, 本文以四川金堂云顶山的柏木人工林为研究对象, 探究其群落结构和物种多样性对密度变化的响应, 分析得出现存密度中的相对最适林分密度, 以期为该地区及其他相似情况林地合理经营柏木人工林提供理论参考。

1 研究区概况

研究区位于成都平原东北部金堂县境内云顶山风景区($31^{\circ}11'06''\sim 31^{\circ}13'00''\text{N}$, $104^{\circ}47'04''\sim 104^{\circ}50'02''\text{E}$), 海拔 982 m, 面积约 67 km^2 , 地处龙泉山脉中段, 为亚热带湿润季风气候区, 气候温和, 降雨充沛, 四季分明。云顶山云雾多, 湿度大, 平均风速小, 累计年平均无霜期 285 d。年平均日照 1 295.5 h, 年平均气温 16.6 $^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量 920.5 mm。土壤较肥沃, 以黄壤为主。

该地区的柏木人工林栽植于 20 世纪 50~60 年代, 因非规范造林各地初始造林密度不同, 后因人采伐及自然稀疏, 现存林分密度差异明显。近年来该地柏木人工林划归为禁伐的公益林, 所受人为干扰较小且情况基本一致。按照实际踏查数据, 将研究区分为 500、650、800、950、1 100 株/ hm^2 5 种林分密度。现多以柏木人工纯林为主, 伴有少量黄连木(*Pistacia chinensis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)等。林下主要灌木有黄荆(*Vitex negundo*)、石海椒(*Reinwardtia indica*)、豆腐柴(*Premna microphylla*)等, 主要草本有苧草(*Setaria*

chondrachne)、白接骨(*Asystasiella neesiana*)、过路黄(*Lysimachia christinae*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

根据对云顶山风景区研究范围的全面踏查,参考方精云^[19]的研究方法,选取5种不同密度的柏木

人工林各设置4个20 m × 30 m的重复样地,共20个样地,各样地基本情况见表1。在各样地分别设置6个乔木样方(10 m × 10 m),沿对角线设置6个灌木样方(5 m × 5 m)和12个草本样方(1 m × 1 m)进行调查。乔木层检尺树高3 m及以上的所有个体,记录其种名、树高、胸径、冠幅等;灌木层及草本层均记录其种名、高度、盖度、株数(丛数)等。

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic situation of the survey plots

样地号 Sample plot No.	密度/(株·hm ⁻²) Density/(tree·ha ⁻¹)	密度划分 Density class	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree/(°)
9~12	500	A	827~867	正南 Due south	25~28
1~4	650	B	858~861	东北48°~60° NE48°~60°	19~26
5~8	800	C	835~841	正东~东北66° Due east-NE66°	20~25
17~20	950	D	833~835	正南 Due south	21~24
13~16	1 100	E	830~833	正南 Due south	25~27

2.2 群落结构划分

根据实地调查数据,对乔木树种胸径和高度进行划分并统计不同密度下乔木层各径级和高度级个体数,分别绘制径级和高度级结构图(图1)。对高度不小于3 m的乔木个体,采用上限排外法以4 cm为一个径级将胸径(d)分为8个径级,径级I为 $d < 3.0$ cm, II为 $3.0 \text{ cm} \leq d < 7.0$ cm,以此类推, VIII为 $d \geq 27.0$ cm;以3 m为一个高度级将树高(h)分为8个高度级,高度级I为 $3.0 \text{ m} \leq h < 6.0$ m, II为 $6.0 \text{ m} \leq h < 9.0$ m,以此类推, VIII为 $h \geq 24.0$ m^[20]。

2.3 数据处理

本实验采用重要值(important value, I_V)和 α 多样性指数综合评估群落物种组成和多样性水平,公式如下。

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

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

Shannon-Wiener 指数(H):

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

Simpson 优势度指数(H'):

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

物种丰富度指数(D): $D = S$

式中: $P_i = n_i$ (第*i*种的个体数)/ n (调查物种个体总数); S 为物种数。

采用 Excel2016 和 DPS 8.5 软件进行数据处理,运用 Origin 9.0 软件绘图。采用单因素方差分析和 LSD 法检验不同林分密度对群落径级、高度级以及

林下植被物种多样性指数的差异显著性,运用相关分析法计算各林分因子与物种多样性指数间的关系。

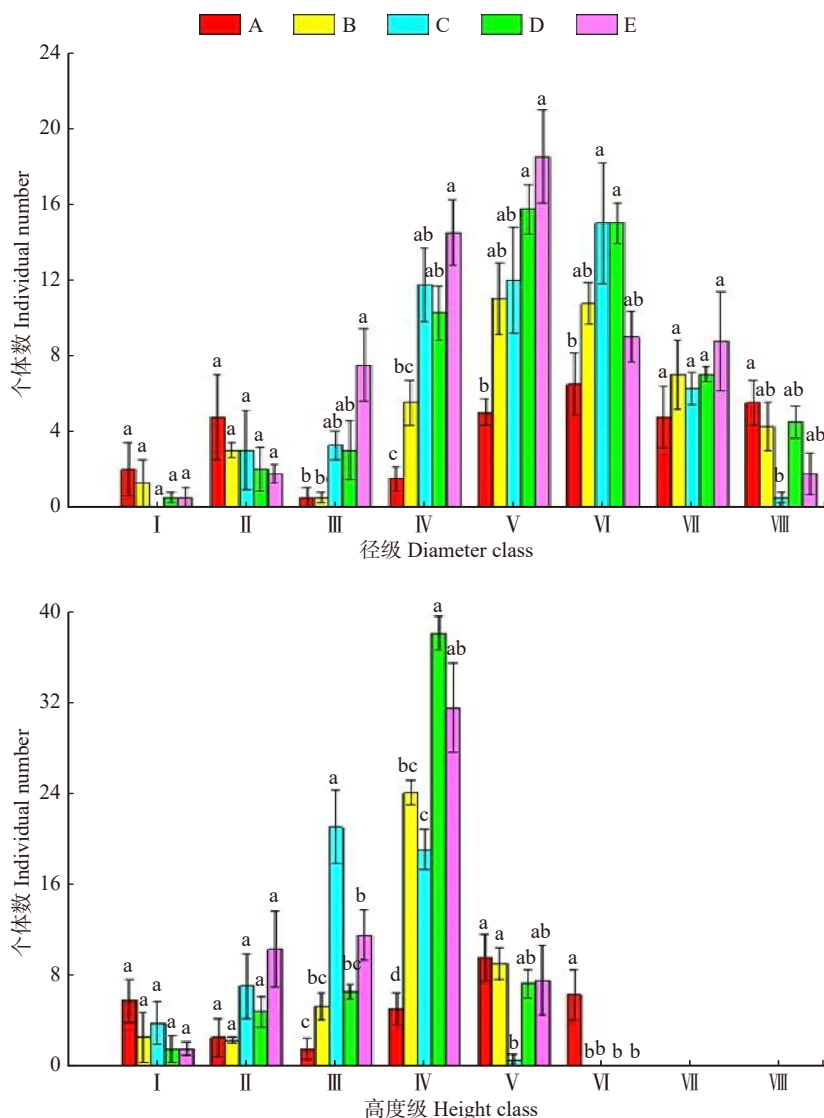
3 结果与分析

3.1 不同林分密度下的群落结构

不同林分密度下,群落径级和高度级结构存在差异(图1)。密度 A、B 群落大径级 VII~VIII($d \geq 23.0$ m)和树高高度级 V~VI($15.0 \text{ m} \leq h < 21.0$ m)乔木个体占比相对较多,密度 C、E 群落小径级 I~II($d < 7.0$ cm)和低高度级 I~II($3.0 \text{ m} \leq h < 9.0$ m)乔木个体占比相对较多,表明低密度下乔木个体径级和高度级相对较大,高密度下则相对较小。密度 A 乔木个体的径级和高度级结构均呈波动状不规则分布,且仅此密度有高度级 VI($18.0 \text{ m} \leq h < 21.0$ m)的乔木个体。除密度 A 外,其余4种密度的径级和高度级结构均呈单峰型分布,乔木个体主要分布在中径级 IV~VI($11.0 \text{ cm} \leq d < 23.0$ cm)和中高度级 III~IV($9.0 \text{ m} \leq h < 15.0$ m),在两端分布数量减少,表明密度 A 群落结构稳定性较弱,其余密度下群落结构相对稳定。同时 B 群落内中、大乔木个体所占比例相对较多,不同大小个体数在群落中分布趋于合理,表明当前群落稳定性及林分生长发育状况较好。

3.2 不同林分密度下的物种组成及重要值

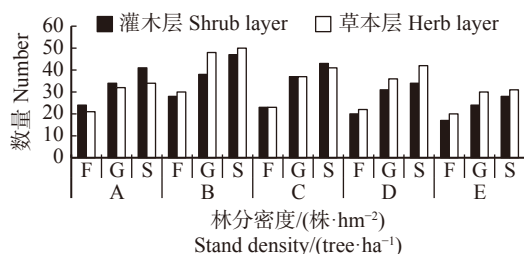
研究区内共记录植物170种,隶属68科136属,其中菊科(Compositae)物种最多,百合科(Liliaceae)、蔷薇科(Rosaceae)次之。从群落层次上看,灌木和草本物种数相近,乔木最少。从不同林分密度来看,随着林分密度的减小,灌木层和草本层物种数均呈先增后减的趋势,在密度 B 达到峰值(图2)。



同径级(高度级)不同字母表示不同密度在该径级(高度级)个体数差异显著($P < 0.05$)。Different letters appearing at the same diameter class (height class) indicate that the individual numbers with different densities at this diameter class (height class) are significantly different ($P < 0.05$).

图 1 不同密度柏木林乔木层径级和高度级结构

Fig. 1 Diameter and height structure of different densities of *C. funebris* plantation



F 为科, G 为属, S 为种。F, family; G, genera; S, species.

图 2 不同密度柏木林灌木层物种组成

Fig. 2 Species composition of shrub and grass layers of *C. funebris* plantation with different densities

由表 2 可知, 不同林分密度下灌木层或草本层优势种均有较多重叠, 但重要值有所差异。灌木层优势种主要为黄荆、石海椒、豆腐柴等, 草本层主要为茅草、白接骨、过路黄等。灌木层和草本层优势种

多属阴性、耐阴性或适应性强的植物, 但在密度 B 灌木层有喜光的珊瑚朴 (*Celtis julianae*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*) 等植物长势良好, 草本层有对光照要求较高的麦冬 (*Ophiopogon japonicas*) 出现且显现优势。表明密度 B 林内光照条件较好, 阳生植物逐渐生长并开始显现优势。调查中未发现柏木幼苗、幼树, 林下柏木重要值为 0。

3.3 不同林分密度下的物种多样性指数及相关分析

表 3 显示, 林下草本层物种多样性指数随密度变化情况较灌木层复杂, 不同密度间各指数差异性显著 ($P < 0.05$)。在草本层中, 物种丰富度指数 D 、Shannon-Wiener 多样性指数 H' 、Simpson 优势度指数 H' 随密度减小均呈先增后减再增再减的双峰变化, 在密度 B 和 D 出现峰值, Pielou 均匀度指数 J_{sw} 呈先增后减的变化趋势, 在 D 出现峰值。在灌木

表 2 不同密度柏木林灌草层优势种重要值

Tab. 2 Important values of dominant species of shrub and grass layers in different density *C. funebris* plantations

层次 Layer	密度 Density	优势种 Dominant species	重要值 Important value
灌木层 Shrub layer	A	黄荆 + 石海椒 + 豆腐柴 + 六道木 + 莢蒾 <i>Vitex negundo</i> + <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Premna microphylla</i> + <i>Abelia biflora</i> + <i>Viburnum dilatatum</i>	0.226 1 + 0.195 6 + 0.070 7 + 0.067 4 + 0.062 9
	B	石海椒 + 珊瑚朴 + 莢蒾 + 黄荆 + 豆腐柴 <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Celtis julianae</i> + <i>Viburnum dilatatum</i> + <i>Vitex negundo</i> + <i>Premna microphylla</i>	0.192 8 + 0.105 6 + 0.084 1 + 0.075 0 + 0.066 4
	C	黄荆 + 石海椒 + 六道木 + 莢蒾 + 豆腐柴 <i>Vitex negundo</i> + <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Abelia biflora</i> + <i>Viburnum dilatatum</i> + <i>Premna microphylla</i>	0.262 4 + 0.135 6 + 0.083 5 + 0.080 4 + 0.069 5
	D	黄荆 + 石海椒 + 莢蒾 + 蕊帽忍冬 + 珊瑚朴 <i>Vitex negundo</i> + <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Viburnum dilatatum</i> + <i>Lonicera pileata</i> + <i>Celtis julianae</i>	0.360 2 + 0.099 7 + 0.097 3 + 0.096 0 + 0.058 8
	E	石海椒 + 六道木 + 烟管莢蒾 + 黄荆 + 豆腐柴 <i>Reinwardtia indica</i> + <i>Abelia biflora</i> + <i>Viburnum utile</i> + <i>Vitex negundo</i> + <i>Premna microphylla</i>	0.212 7 + 0.197 7 + 0.122 5 + 0.108 5 + 0.052 6
草本层 Herb layer	A	莢草 + 求米草 + 韩信草 + 过路黄 + 白接骨 <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Oplismenus undulatifolius</i> + <i>Scutellaria indica</i> + <i>Lysimachia christinae</i> + <i>Asystasiella neesiana</i>	0.226 7 + 0.136 8 + 0.120 3 + 0.098 3 + 0.082 1
	B	过路黄 + 白接骨 + 莢草 + 麦冬 + 求米草 <i>Lysimachia christinae</i> + <i>Asystasiella neesiana</i> + <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Ophiopogon japonicus</i> + <i>Oplismenus undulatifolius</i>	0.136 1 + 0.133 1 + 0.119 4 + 0.112 3 + 0.094 4
	C	莢草 + 韩信草 + 白接骨 + 过路黄 + 爵床 <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Scutellaria indica</i> + <i>Asystasiella neesiana</i> + <i>Lysimachia christinae</i> + <i>Rostellularia procumbens</i>	0.372 8 + 0.142 7 + 0.133 6 + 0.111 9 + 0.082 6
	D	莢草 + 白接骨 + 三花莢 + 麦冬 + 求米草 <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Asystasiella neesiana</i> + <i>Caryopteris terniflora</i> + <i>Ophiopogon japonicus</i> + <i>Oplismenus undulatifolius</i>	0.177 9 + 0.116 5 + 0.059 6 + 0.045 6 + 0.043 3
	E	沿阶草 + 莢草 + 过路黄 + 求米草 + 韩信草 <i>Ophiopogon bodinieri</i> + <i>Setaria chondrachne</i> + <i>Lysimachia christinae</i> + <i>Oplismenus undulatifolius</i> + <i>Scutellaria indica</i>	0.132 2 + 0.121 4 + 0.114 3 + 0.110 9 + 0.093 4

表 3 不同密度柏木林灌草层物种多样性指数

Tab. 3 Species diversity indices of shrub and grass layers in *C. funebris* plantation under different densities

层次 Layer	密度 Density	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index (J_{sw})	Simpson优势度指数 Simpson dominance index (H')	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index (H)	物种丰富度指数 Species richness index (D)
灌木层 Shrub layer	A	0.615 3 ± 0.021 5a	0.758 5 ± 0.029 8a	1.989 0 ± 0.050 3a	25.500 0 ± 1.040 8ab
	B	0.671 1 ± 0.064 4a	0.764 3 ± 0.057 3a	2.253 6 ± 0.196 8a	29.000 0 ± 0.912 9a
	C	0.681 5 ± 0.076 5a	0.778 3 ± 0.081 8a	2.158 6 ± 0.274 8a	23.500 0 ± 1.707 8b
	D	0.657 3 ± 0.037 9a	0.767 5 ± 0.023 7a	1.878 4 ± 0.112 7a	17.500 0 ± 0.866 0c
	E	0.600 8 ± 0.063 3a	0.670 6 ± 0.074 6a	1.715 2 ± 0.194 4a	17.250 0 ± 0.478 7c
草本层 Herb layer	A	0.748 7 ± 0.047 7c	0.849 9 ± 0.025 7b	2.192 3 ± 0.146 8b	18.750 0 ± 1.030 8c
	B	0.752 4 ± 0.036 1c	0.878 4 ± 0.015 1ab	2.536 6 ± 0.114 6b	29.250 0 ± 1.108 7a
	C	0.768 6 ± 0.029 1bc	0.868 5 ± 0.019 5b	2.384 2 ± 0.107 5b	22.250 0 ± 0.853 9bc
	D	0.943 7 ± 0.004 8a	0.942 8 ± 0.002 8a	3.049 9 ± 0.059 3a	25.500 0 ± 1.707 8ab
	E	0.882 3 ± 0.012 3ab	0.904 1 ± 0.002 6ab	2.547 8 ± 0.024 1b	18.000 0 ± 0.577 4c

注: 同列含有不同字母表示该列指数不同密度间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: same column containing different letters indicate that the index of this column is significantly different between different densities ($P < 0.05$).

层中, 随着林分密度的减小, 物种多样性指数均呈先增后减的单峰变化, 基本在密度 B 有最大值, 除 D 外均无显著差异。表明密度 B 林下群落物种丰富程度及各物种个体分配的均匀程度均优于其余 4 种密度。

对林下灌木层和草本层的 4 种多样性指数与林分因子进行相关分析(表 4)发现, 林分密度和郁闭度与灌木层 D 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与草本层 H 、 H' 、 J_{sw} 均呈显著或极显著正相关。灌木层 D 与草本层 H 、 H' 和 J_{sw} 均呈显著或极显著负相关。表明

表 4 灌草层物种多样性指数与林分因子的相关性

Tab. 4 Correlation coefficients between understory species diversity index and stand factors

林分因子 Stand factor	密度 Density	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean tree height	平均胸径 Mean DBH	平均冠幅 Mean crown width	草本层 Herb layer				灌木层 Shrub layer				
						<i>D</i>	<i>H</i>	<i>H'</i>	<i>J_{sw}</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>H'</i>	<i>J_{sw}</i>	
密度 Density	1.00													
郁闭度 Canopy density	0.97**	1.00												
平均树高 Mean tree height	-0.31	0.29	1.00											
平均胸径 Mean DBH	-0.17	-0.18	0.65**	1.00										
平均冠幅 Mean crown width	-0.05	-0.11	0.01	0.15	1.00									
HL- <i>D</i>	-0.16	-0.13	0.20	0.31	-0.22	1.00								
HL- <i>H</i>	0.52*	0.53*	0.16	0.13	-0.04	0.44*	1.00							
HL- <i>H'</i>	0.58**	0.58**	0.07	0.00	-0.07	0.20	0.93**	1.00						
HL- <i>J</i>	0.69**	0.67**	0.07	-0.03	0.04	-0.05	0.87**	0.94**	1.00					
SH- <i>D</i>	-0.80**	-0.78**	0.07	0.31	-0.17	0.36	-0.49*	0.60**	0.74**	1.00				
SH- <i>H</i>	-0.35	-0.35	-0.12	-0.11	-0.22	0.11	-0.31	-0.33	-0.42	0.52*	1.00			
SH- <i>H'</i>	-0.23	-0.23	-0.06	-0.18	-0.17	-0.01	-0.17	-0.18	-0.21	0.26	0.91**	1.00		
SH- <i>J</i>	-0.06	-0.07	-0.13	-0.22	-0.18	0.00	-0.12	-0.10	-0.14	0.17	0.93**	0.94**	1.00	

注: *表示相关性显著($P < 0.05$), **表示相关性极显著($P < 0.01$)。HL表示草本层, SH表示灌木层。Notes: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates that the correlation is extremely significant ($P < 0.01$). HL means herb layer, SH means shrub layer.

林分密度和郁闭度是影响林下灌木层和草本层物种多样性的主要因素之一, 草本层物种多样性与灌木层关系密切。

4 讨 论

4.1 林分密度对柏木人工林群落结构的影响

植物群落的径级结构是植物生长与环境关系、种群个体间竞争与分异状况的综合反映^[21], 高度级结构是群落垂直结构物种组成性状的重要体现, 分析植物群落的径级和高度级结构有助于评价群落结构的复杂性、发展阶段和稳定程度^[20]。郭书彬等^[22]研究发现, 密度越小越有利于促进林木的个体发育。本研究中, 低密度下乔木个体径级和高度级相对较大, 高密度下则相对较小, 基本符合上述学者的研究结果。同龄人工纯林, 径级分布特征通常表现为中径级乔木个体占多数, 大、小径级乔木个体占少数^[23]。本研究中, 密度 A 群落径级和高度级结构均呈波动状不规则分布, 大、小乔木个体占比相对较多, 群落结构稳定性较弱, 原因可能是林分密度过低以致生态位空间不能被充分利用, 造成资源浪费且不利于林木正常生长^[24]。除密度 A 外其余密度下群落径级和高度级结构均呈单峰型分布, 基本符合同龄人工纯林的直径分布, 说明群落处于相对稳定状态。同时密度 B 群落内中、大乔木个体所占比例相对较多, 不同大小个体数在群落中分布和配置状况

趋于合理, 当前群落稳定性及林分生长状况较好, 分析原因是较低的林分密度利于缓和林木对营养空间的竞争, 利于林分生长, 这与刘相兵等^[25]、Nguyen 等^[26]的研究结果一致。

4.2 林分密度对柏木人工林物种多样性的影响

物种多样性可有效反映群落物种组成和林分结构特征, 同时体现群落的生境差异、演替动态和稳定程度^[27]。周树平等^[28]研究认为, 林分密度通过影响上层乔木生长发育过程影响林地生境异质性, 进而影响林下植被的生长分布。本研究中, 柏木人工林林下植被在不同林分密度、不同层次间物种组成不同。随着林分密度的减小, 灌木层物种多样性指数均呈先增后减的变化趋势, 基本在密度 B 达最大, 这与占玉芳等^[29]的研究结果相近。草本层 *D*、*H*、*H'* 呈先增后减再增再减的双峰变化, 在密度 B 和 D 出现峰值, 这与朱媛君等^[30]的研究中草本层物种多样性变化不一致, 原因可能是研究对象、研究区域和林分密度选择不同。综合来看, 密度 B 灌木层和草本层物种多样性指数整体较大, 表明密度 B 林下植被物种多样性优于其余 4 种密度。究其原因随着林分密度的减小, 限制植被生长发育的光照、养分、空间等林下环境条件改善, 适生物种类增多, 物种多样性提高。但密度过小导致空间、养分等资源过多, 林下少数竞争力强的种群过度利用冗余资源取得绝对优势, 占据过多生态位而排除其他物种, 物种多样性

水平降低。适宜的中间密度,能够维持更多物种的平衡共存,保有较高的物种多样性水平,有利于人工针叶林群落向多物种的复合稳定性顶级群落演替^[7]。本研究中,林分密度和郁闭度与灌木层 D 及草本层 H 、 H' 、 J_{sw} 均呈显著或极显著相关关系,表明林分密度和郁闭度是影响林下灌木层和草本层物种多样性的主要因素之一。草本层物种多样性与灌木层关系密切,其中灌木层 D 与草本层 H 、 H' 和 J_{sw} 均呈显著或极显著负相关,这可能与林下灌木和草本争夺有限的营养空间有关。

4.3 关于云顶山柏木人工林群落可持续发展的思考

人工林近自然改造有助于增加林地生物多样性并提升人工林的生态服务功能^[31]。云顶山地区的柏木林为人工纯林,生态系统脆弱,同时在调查中未发现柏木幼树、幼苗,表明该地柏木人工林在林下的自然更新潜力不良。为改善柏木人工林的单一结构并促进其自然更新,可通过疏伐补植引入阔叶乡土树种营造针阔混交林并引导其逐渐演化为“潜在自然植被”^[17,31]。就本研究而言,现存密度 $B(650 \text{ 株}/\text{hm}^2)$ 是相对最适林分密度。建议对过密林分适当疏伐并补植青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)、朴树 (*Celtis sinensis*) 等适生阔叶树种,阔叶树种能为立地提供更多的枯枝落叶腐殖质肥料以促进其疏伐后短期成林。对过疏林分,人为补植乡土树种如黄连木、麻栎等,也可适当控制灌木生长,减小灌木与草本及林下更新树种的竞争^[17]。

参 考 文 献

- [1] 郝建锋,王德艺,唐永彬,等.人为干扰对江油地区马尾松人工林群落结构和物种多样性的影响[J].生态环境学报,2014,23(5):729-735.
Hao J F, Wang D Y, Tang Y B, et al. Effects of human disturbance on species diversity of *Pinus massoniana* plantation in Jiangyou District, Sichuan Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(5): 729-735.
- [2] 汪殿蓓,暨淑仪,陈飞鹏.植物群落物种多样性研究综述[J].生态学报,2001,20(4):55-60.
Wang D P, Ji S Y, Chen F P. A review on the species diversity of plant community[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(4): 55-60.
- [3] 王茜茜,龙文兴,杨小波,等.海南岛3个林区热带云雾林植物多样性变化[J].植物生态学报,2016,40(5):469-479.
Wang Q Q, Long W X, Yang X B, et al. Patterns of plant diversity within and among three tropical cloud forest communities in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(5): 469-479.
- [4] Guo Q F. The diversity-biomass-productivity relationships in grassland management and restoration[J]. Basic and Applied Ecology, 2007, 8(3): 199-208.
- [5] 郝建锋,王德艺,李艳,等.不同林分密度下川北白云山地区喜树人工林的群落结构和物种多样性[J].植物研究,2015,35(5):772-778.
Hao J F, Wang D Y, Li Y, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of camptotheca acuminata plantation in Baiyun Mountain, Mianzhu District, Sichuan Province[J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(5): 772-778.
- [6] 雷相东,唐守正,李冬兰,等.影响天然林下层植物物种多样性的林分因子的研究[J].生态学报,2003(3):18-22.
Lei X D, Tang S Z, Li D L, et al. Stand variables affecting understory plant species diversity in natural forests[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003(3): 18-22.
- [7] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等.马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J].应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.
Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Effects of *Pinus massoniana* plantation stand density on understory vegetation and soil properties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2323-2331.
- [8] 王树森,余新晓,罗于洋,等.人工造林对八达岭森林植被木本植物生物多样性的影响[J].北京林业大学学报,2008,30(增刊2):155-159.
Wang S S, Yu X X, Luo Y Y, et al. Effects of reforestation on woody plant biodiversity of forest vegetation in Badaling, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(Suppl.2): 155-159.
- [9] 徐济德.我国第八次森林资源清查结果及分析[J].林业经济,2014,36(3):6-8.
Xu J D. The 8th forest resources inventory results and analysis in China[J]. Forestry Economics, 2014, 36(3): 6-8.
- [10] 刘世荣,杨子静,王晖.中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J].生态学报,2018,38(1):1-10.
Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1-10.
- [11] 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.
- [12] Chen Y M, Cao Y. Response of tree regeneration and understory plant species diversity to stand density in mature *Pinus tabulaeformis* plantations in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2014, 73(12): 238-245.
- [13] Ares A, Neill A R, Puettmann K J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(7): 1104-1113.
- [14] Tilman D, Reich P B, Knops J M, et al. Biodiversity and

- ecosystem stability in a decade-long grassland experiment[J]. *Nature*, 2006, 441: 629–632.
- [15] 陈丝露, 赵敏, 李贤伟, 等. 柏木低效林不同改造模式优势草本植物多样性及其生态位[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 143–155.
Chen S L, Zhao M, Li X W, et al. Study on plant diversity and niche characteristics of dominant herbaceous populations under different reconstruction patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 143–155.
- [16] 何朋俊, 李星月, 王谢, 等. 川中丘陵柏木低效林开窗补阔初期土壤养分和酶活性变化[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(4): 693–700.
He P J, Li X Y, Wang X, et al. Soil nutrient and enzymatic activity changes amidst the early stage of gap and mixed transformation of low-efficiency *Cupressus funebris* in the hilly area of the central Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(4): 693–700.
- [17] 郭敬丽, 崔立志, 赵会艳, 等. 林分密度对人工油松林下植物多样性的影响[J]. *林业与生态科学*, 2018, 33(3): 275–280.
Guo J L, Cui L Z, Zhao H Y, et al. Impact of stand density on plant diversity under artificial *Pinus tabulaeformis*[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2018, 33(3): 275–280.
- [18] 张柳桦, 齐锦秋, 柳碧玉, 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.
- [19] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[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.
- [20] 马双娇, 王庆成, 崔东海, 等. 抚育间伐对水曲柳天然林群落结构及植物多样性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(2): 1–7.
Ma S J, Wang Q C, Cui D H, et al. Effect of thinning on stand structure and plant species diversity in natural *Fraxinus manschurica* forest stands[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(2): 1–7.
- [21] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林群落结构特征分析[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(4): 615–620.
Zhao W J, Liu X D, Jin M, et al. Analysis on community structure of *Picea crassifolia* forests in the Qilian Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4): 615–620.
- [22] 郭书彬, 宋熙龙, 尤海舟, 等. 经营密度对华北落叶松人工林生长的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(4): 1–5.
Guo S B, Song X L, Long H Z, et al. Effects of forest density on *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(4): 1–5.
- [23] 段梦成, 王国梁, 史君怡, 等. 间伐对油松人工林优势种群结构与分布格局的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 1–10.
Duan M C, Wang G L, Shi J Y, et al. Effects of thinning on structure and spatial pattern of dominant populations in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 1–10.
- [24] 郝珉辉, 李晓宇, 夏梦洁, 等. 抚育采伐对蛟河次生针阔混交林功能结构和谱系结构的影响[J]. *林业科学*, 2018, 54(5): 1–9.
Hao M H, Li X Y, Xia M J, et al. Effects of tending felling on functional and phylogenetic structures in a multi-species temperate secondary forest at Jiaohe in Jilin Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(5): 1–9.
- [25] 刘相兵, 刘亚茜, 李兵兵, 等. 生态疏伐对林分密度及直径结构的影响[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(3): 145–149.
Liu X B, Liu Y Q, Li B B, et al. Influences of ecological thinning on the stand density and diameter structure[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(3): 145–149.
- [26] Nguyen H, Firm J, Lamb D, et al. Wood density: a tool to find complementary species for the design of mixed species plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334: 106–113.
- [27] 叶超, 安明志, 张楠, 等. 贵州北盘江喀斯特地区车桑子造林对乡土植物物种多样性的影响[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(2): 310–318.
Ye C, An M T, Zhang N, et al. Effect of afforestation of *Dodonaea viscosa* on native plant species diversity in karst area of Beipan River of Guizhou[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(2): 310–318.
- [28] 周树平, 梁坤南, 杜健, 等. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究[J]. *植物研究*, 2017, 37(2): 200–210.
Zhou S P, Liang K N, Du J, et al. Research on understory vegetation and soil physical-chemical properties of teak plantation with difference stand densities[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2017, 37(2): 200–210.
- [29] 占玉芳, 滕玉凤, 甄伟玲, 等. 民勤地区梭梭人工林密度与林下植物多样性的关系[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(6): 62–67.
Zhan Y F, Teng Y F, Zhen W L, et al. Relationship between plantation density and diversity of *Haloxylon ammodendron* forest in Minqin County, Gansu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(6): 62–67.
- [30] 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]. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 2869–2879.
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): 2869–2879.
- [31] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6154–6162.
Luo Y H, Sun D J, Lin J Y, et al. Effect of close-to-nature management on the natural regeneration and species diversity in a masson pine plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6154–6162.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑委 臧润国)