

不同林龄马尾松人工林优势种径级结构 及物种多样性分析

盘金文, 郭其强*, 余大龙, 孙学广, 高 超

(贵州大学 林学院, 贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025)

摘 要: 采用空间代替时间的方法, 以黔中山地孟关林场 10a、20a、30a 和 36a 的马尾松人工林为研究对象, 通过设置 12 块 20 m×20 m 的典型样地, 分析了马尾松人工林发育过程中径级结构与物种多样性的动态特征。结果表明: (1) 马尾松人工林不同林龄阶段, 优势种径级结构存在一定差异, 10a 林分呈单峰型结构, 20a、30a、36a 林分呈多峰型结构。(2) 林下共有植物种类 35 科 53 属 53 种, 其中灌木 16 科 24 属 24 种, 草本 20 科 29 属 29 种, 物种较丰富; 不同林龄林分物种组成种类为: 20a 林分 > 10a 林分 > 30a 林分 > 36a 林分。(3) 随林龄增加, 马尾松人工林物种丰富度指数先增大后减小, Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数以及 Pielou 均匀度指数和 Alatalo 均匀度指数在 10a~30a 之间变化趋势相反, 30a~36a 之间变化趋势一致。

关键词: 林龄; 马尾松人工林; 优势种径级结构; 物种多样性

中图分类号: Q948.15⁺4; S718.54 **文献标志码:** A

Analysis on Diameter Class Structure of Dominant Species and Species Diversity of *Pinus massoniana* Plantation at the Different Ages

PAN Jinwen, GUO Qiqiang*, YU Dalong, SUN Xueguang, GAO Chao

(College of Forestry, Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Taking the masson pine plantation 10a, 20a, 30a and 36a of mengguan forest farm in central Guizhou as the research object, by adopting the method of replacing time change with space change, we analyzed the dynamic characteristics of diameter scale structure and species diversity in the development process of masson pine plantation by setting 12 typical 20 m by 20 m plots. The results showed that: (1) the diameter grade structure of masson pine plantation was different at different age stages, with single-peak structure at 10a stand and multi-peak structure at 20a, 30a and 36a stands. (2) There are a total of 53 species in 53 genera and 35 families of plants under the forest, including 24 species in 24 genera and 16 families of shrubs, 29 species in 29 genera and 20 families of herbs, with relatively rich species. Species composition of stands of different ages: 20a stands > 10a stands > 30a stands > 36a stands. (3) Species richness index of masson pine firstly increased and then decreased with the increase of forest age. Shannn-wiener index, Simpson index, Pielou evenness index and Alatalo evenness index showed the opposite trend between 10a and 30a, and the same trend between 30a and 36a.

Key words: forest ages; *Pinus massoniana* plantation; diameter structure of dominant species; species di-

收稿日期: 2019-01-10; 修改稿收到日期: 2019-03-12

基金项目: 贵州省科技厅基金(黔科合[2018]1040); 贵州省农业攻关项目([2019]2314); 广西创新驱动发展专项(A17204087-4); 贵州大学引进人才项目(2016[23])

作者简介: 盘金文(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事人工林培育研究。E-mail: 1746340599@qq.com

* 通信作者: 郭其强, 博士, 副教授, 主要从事森林培育与植物生态学研究。E-mail: hnguoqiqiang@126.com

iversity

林木径级结构是森林中乔木个体按径级大小的株数分布状况^[1],它在一定程度上反映了林分的胸径、干形、材积等基本状况,是林分结构的重要基本特征之一^[2]。物种组成是群落形成的基础^[3],研究人工林植物种类组成有助于明确其物种配比及组成结构,对深入理解森林群落恢复过程及经营管理具有重要参考价值。学者们通过研究森林群落优势种群结构、物种组成及多样性指数等特性探讨群落发育动态已经取得了大量重要成果^[4-5]。因此,在人工林发育过程中探讨林分乔木径级组成及林下物种组成变化规律,对深入了解人工林群落发育动态、维持机制以及群落稳定性等具有重要意义^[6]。

马尾松(*Pinus massoniana*)人工林是中国南方面积最大的人工林,也是中国南方最具代表性的森林类型之一^[7]。近年来,中国科研工作者对马尾松优良种源选育开展了大量研究,选育出树高、胸径和材积遗传力较高的种源,建筑材、纸浆材和高产脂材优良家系等^[8-12]。同时还开展了马尾松立地类型、整地措施、施肥效应、密度效应等方面研究并取得有效性成果^[13]。但中国马尾松人工林仍然存在采伐过早造成林地生产力浪费,群落结构简单,生态系统脆弱,病虫害严重等问题^[13-14]。贵州作为中国长江和珠江上游重要的生态安全屏障区,分布有 653.35 万 hm^2 人工林资源,其中有 1/3 为马尾松人工纯林。然而,长期以来因对资源特性不了解,专业管理技术缺乏及自然环境恶劣等原因,致使人工林群落层次简单、生物多样性较低和生态系统稳定性弱等弊端日趋凸显,其应有的生态功能也难以发挥^[15]。以上现象说明马尾松人工林在抚育措施和经营管理中仍有待进一步探讨。尤其是在充分了解林分不同发育阶段结构特性的基础上,开展相关的抚育措施更具可行性和科学性^[16]。鉴于此,本研究选择贵州中部孟关林场不同林龄马尾松人工林为研究对象,采用空间代时间的方法,通过典型样地调查和数据分析,旨在揭示马尾松人工林不同林龄径级结构与物种多样性特征,相关结论可为马尾松人工林资源的可持续经营及大径材定向培育提供科学的技术与理论支持。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区域概况

孟关林场位于贵州省贵阳市花溪区东南部(26°

23'N,106°44'E),林场总面积 1 142.69 hm^2 ,海拔约 1 100~1 300 m,相对高差 100~200 m,属黔中山原地貌类型,地势呈西高东低,平均坡度约 20°~30°。林区属贵州高原中部亚热带季风气候区,年平均气温 14.9 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 275 d,年平均降水量 1 441.6 mm。林区土壤主要成分是砂页岩上发育的硅铝质黄壤,呈酸性,肥力中等。

在孟关林场选择土壤、海拔、坡度等立地条件相近的 10a、20a、30a 和 36a 林分,4 种林分分别于 2006 年、1997 年、1987 年和 1982 年按照 1 m×2 m 株行距造林,造林方式均为炼山后实生苗营造纯马尾松林,造林第 5 和 15 年各进行一次抚育间伐,后自然生长。据统计,孟关林场幼龄林面积 58.30 hm^2 ;中龄林面积 181.30 hm^2 ;近熟林面积 671.06 hm^2 ;成熟林面积 36.82 hm^2 。林场以马尾松为优势建群种,伴生乔木树种主要包括杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、杨梅(*Myrica rubra*)和滇杨(*Populus yunnanensis*)等;灌木树种主要有茅栗(*Castanea seguinii*)、槲栎(*Quercus aliena*)、铁仔(*Myrsine africana*)和菝葜(*Smilax china*)等;草本主要有铁芒箕(*Dicranopteris dichotoma*)、乌蕨(*Odontosoria chinensis*)和地瓜藤(*Ficus tikoua*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查方法 在 4 种不同林龄林分中分别设置 3 个 20 m×20 m 的样地,以样地一边为 X 轴,垂直边为 Y 轴建立直角坐标系,记录所有乔木树种的名称、坐标值,并测定其胸径(幼苗测基径)、树高、冠幅和枝下高。在每个样地内沿对角线设置 3 个 5 m×5 m 的样方调查灌木层,同时选取 3 个 1 m×1 m 的小样方调查草本层,记录每种植物名称、株数和高度,并统计其在样方中出现的次数,测量其冠幅。同步记录样地海拔、坡度、坡向、土壤类型、坡位和林分郁闭度等。不同林龄林分基本特征见表 1。

1.2.2 径级结构划分 根据松属植物生长特点及以往研究方法^[17],以 5 cm 为一个径阶统计不同林龄马尾松径阶分布株数。把基径 < 5 cm 且树高 ≤ 1.5 m 的个体为第 I 径级,树高 > 1.5 m 的个体按胸径(DBH)划分径级,其中 0 < DBH ≤ 5 cm 的植株记为第 II 径级,5 < DBH ≤ 10 cm 的植株记为第 III 径级,……,以此类推,把 DBH > 35 cm 的植株都记为

表 1 不同林龄马尾松人工林林分特征

Table 1 The stand characteristics of *Pinus massoniana* plantation of different forest

林龄 Forest age/a	平均海拔 Average elevation/m	林分郁闭度 Forest stand canopy density	林分密度 Forest stand density /(plants · hm ⁻²)	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	平均冠幅 Average canopy breadth/m
10	1 127	0.90	5 250	6.93	7.85	2.59
20	1 100	0.90	2 368	13.14	15.66	4.24
30	1 144	0.75	925	20.32	18.74	3.26
36	1 103	0.70	932	20.07	19.44	3.35

第Ⅸ径级,共划分 9 个径级。按林龄分别统计各样地不同径级的马尾松株数,然后以径级为横坐标、以不同林龄各径级的马尾松密度为纵坐标,绘制不同林龄马尾松人工林径级结构图^[18]。

1.2.3 林下物种多样性研究方法 根据样地资料,计算不同物种多度、频度和盖度;计算每个样地不同物种的重要值(IV)、丰富度指数(R_o)、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数、Alatalo 均匀度指数。各参数计算公式如下:

多度:样方中物种个体数目;

频度:物种在样方中出现的次数;

盖度:物种地上部分垂直投影面积占样方面积;

重要值: $IV = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) \times 100/3$;

物种丰富度指数: $R_o = S$;

Shannon-Wiener 指数: $H' = -\sum P_i \ln P_i$;

Simpson 指数: $D = 1 - \sum P_i^2$;

Pielou 指数: $J_{sw} = H'/\ln S$;

Alatalo 指数: $E_a = [(\sum P_i^2)^{-1} - 1]/[\exp(-\sum P_i \ln P_i) - 1]$ 。

其中, S 为样地出现的物种数, P_i 为种 i 的相对重要值 IV 。

1.2.4 数据处理与分析 采用 Excel2007 进行数据处理,使用 Origin 8.5 软件绘图。在原始调查数据的基础上,分别以 10a、20a、30a、36a 林分为单位统计林分特征值、径级、物种重要值、物种多样性指数等平均值表示不同林龄阶段特征,并绘制成相应表格和图。

2 结果与分析

2.1 径级结构分析

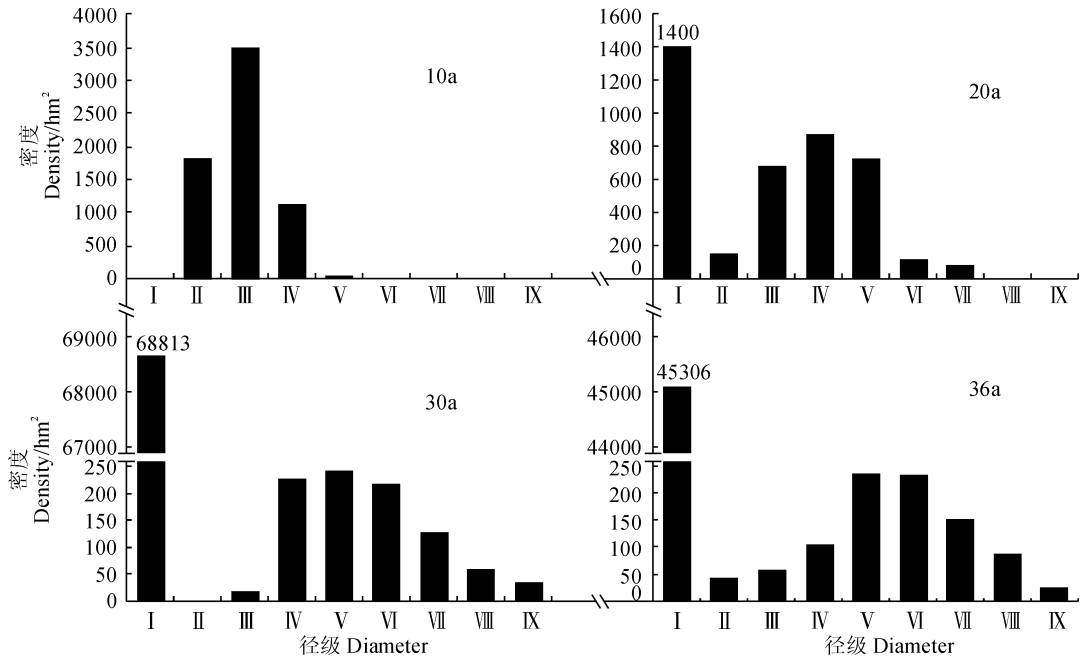
植物个体径级能有效反映种群现状和发展趋势,对林分径级结构分析可以了解种群在特定生境下的生存状况和发展趋势^[17]。由图 1 可知,不同林龄马尾松人工林径级结构存在一定差异,10a 林分

呈单峰型结构,20a、30a、36a 林分呈多峰型结构。10a 林分密度最大值出现在第Ⅲ径级,为 3 500 株/hm²,林下无更新幼苗;20a 林分密度极大值出现在第Ⅳ径级,密度为 875 株/hm²,林下更新幼苗密度为 1 400 株/hm²;30a 林分密度极大值在第Ⅴ径级出现,密度为 241 株/hm²,林下更新幼苗密度为 68 813株/hm²;36a 林分密度极大值出现在第Ⅴ径级,植株密度为 237 株/hm²,林下更新幼苗密度为 45 306 株/hm²。

2.2 物种组成

2.2.1 植物种类分布 对马尾松人工林林下植被调查,结果表明:林下出现的植物种类为 35 科 53 属 53 种,灌木层植物 16 科 24 属 24 种。草本层植物 20 科 29 属 29 种。其中,灌木层 10a 林分有 9 科 12 属 12 种,20a 林分有 13 科 15 属 15 种,30a 林分有 9 科 11 属 11 种,36a 林分有 8 科 10 属 10 种;草本层 10a 林分有 13 科 14 属 14 种,20a 林分有 14 科 16 属 16 种,30a 林分有 8 科 13 属 13 种,36a 林分有 6 科 6 属 6 种。

2.2.2 优势种重要值 计算不同林龄林下灌木层和草本层各物种重要值(IV),并列出群落优势种(重要值>10%)及其重要值(表 2);灌木层中,10a 林分榿栎和柃木占绝对优势,重要值分别达 28.67% 和 22.65%;20a 林分菝葜、榿栎占较大优势;30a 林分菝葜、榿栎、南烛等占据优势,重要值都在 18% 以上;36a 林分菝葜和榿栎占优势,重要值分别为 36.52% 和 22.49%。菝葜和榿栎在各林龄林分中均为优势种,莢蒾为 10a 和 20a 林分共有优势种,南烛为 10a、30a 和 36a 林分共有优势种,铁仔是 20a、30a 和 36a 林分共有优势种;柃木和茅栗为 10a 林分独有优势种;楸树和小果珍珠花是 20a 林分独有优势种。草本层中,10a 林分以铁芒萁占绝对优势,重要值为 40.54%;20a 林分铁芒萁、铜锤玉带草和地瓜藤为优势种,重要值分别为 41.25%、32.18% 和 29.73%;30a 林分以铁芒萁和乌蕨为优势种,其重要



10a、20a、30a、36a 分别表示 10 年生、20 年生、30 年生、36 年生；I 为基径 < 5 cm 且树高 ≤ 1.5 m 的林下更新幼苗，II ~ IX 为高 > 1.5 m 的个体，按胸径 (DBH) 大小来划分。II. $0 < DBH \leq 5$ cm；III. $5 < DBH \leq 10$ cm；……VIII. $30 < DBH \leq 35$ cm；IX. $DBH > 35$ cm。下同

图 1 不同林龄马尾松人工林径级结构

10a, 20a, 30a and 36a mean 10-year, 20-year, 30-year and 36-years respectively. I was the regenerated seedling with the base diameter < 5 cm and the tree height ≤ 1.5 m, II ~ IX is high of > 1.5 m individuals, according to the diameter at breast height (DBH) size classification. II. $0 < DBH \leq 5$ cm; III. $5 < DBH \leq 10$ cm; ……VIII. $30 < DBH \leq 35$ cm; IX. $DBH > 35$ cm. The same as below

Fig. 1 Diameter class structure of *P. massoniana* plantation at the different ages

表 2 不同林龄马尾松人工林林下优势种重要值

Table 2 Important values of dominant species of *P. massoniana* plantation at the different ages

林层 Forest layer	物种名称 Species	林龄 Forest age/a			
		10	20	30	36
灌木层 Shrub layer	菝葜 <i>Smilax china</i>	18.50	24.72	23.59	36.52
	槲栎 <i>Quercus aliena</i>	28.67	34.08	20.46	22.49
	荚蒾 <i>Viburnum dilatatum</i>	15.22	5.22	—	—
	铃木 <i>Eurya japonica</i>	22.65	—	—	—
	茅栗 <i>Castanea seguinii</i>	14.56	—	—	—
	南烛 <i>Vaccinium bracteatum</i>	15.74	—	18.63	14.7
	花椒树 <i>Sorbus pohuashanensis</i>	—	16.70	—	—
	铁仔 <i>Myrsine africana</i>	—	11.57	18.89	12.9
	小果珍珠花 <i>Lyonia ovalifolia</i> var. <i>elliptica</i>	—	14.87	—	—
草本层 Herb layer	边缘鳞盖蕨 <i>Microlepia marginata</i>	16.87	—	—	19.26
	黑足鳞毛蕨 <i>Dryopteris fuscipes</i>	19.96	15.56	—	—
	葎草 <i>Arthraxon hispidus</i>	16.31	21.08	—	—
	铁芒箕 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	40.54	41.25	42.44	46.88
	乌蕨 <i>Odontosoria chinensis</i>	13.87	—	28.04	12.31
	野青茅 <i>Deyeuxia pyramidalis</i>	12.93	26.37	—	12.49
	铜锤玉带草 <i>Lobelia nummularia</i>	—	32.18	—	—
	斑叶瑾菜 <i>Viola variegata</i>	—	—	14.17	—
	大果鳞毛蕨 <i>Dryopteris panda</i>	—	—	—	20.53
地瓜藤 <i>Ficus tikoua</i>	—	29.73	—	—	

表 3 不同林龄马尾松人工林物种多样性指数

Table 3 Species diversity index of *P. massoniana* plantation under the different ages

林层 Forest layer	多样性指数 Diversity index	林龄 Forest age/a			
		10	20	30	36
灌木层 Shrub layer	物种丰富度指数 S	6.000	6.750	5.330	5.330
	Simpson 指数 D	0.737	0.568	0.814	0.765
	Shannon-wiener 指数 H'	2.889	3.216	2.262	2.009
	Pielou 指数 J_{sw}	1.612	1.684	1.352	1.201
	Alatalo 指数 E_a	0.165	0.055	0.508	0.503
草本层 Herb layer	物种丰富度指数 S	7.300	7.500	4.780	3.220
	Simpson 指数 D	0.698	0.484	0.700	0.669
	Shannon-wiener 指数 H'	2.519	3.146	2.014	1.647
	Pielou 指数 J_{sw}	1.267	1.561	1.287	1.408
	Alatalo 指数 E_a	0.203	0.042	0.360	0.481

值分别为 42.44% 和 28.04%；36a 林分优势种为铁芒萁，其重要值为 46.88%。铁芒萁在不同林龄林分中均为优势种，黑足鳞毛蕨和荃草是 10a 和 20a 林分共有优势种，边缘鳞盖蕨是 10a 和 36a 林分共有优势种，乌蕨是 10a、30a 和 36a 林分共有优势种，野青茅是 10a、20a 和 36a 林分共有优势种；铜锤玉带草和地瓜藤为 20a 林分独有优势种，斑叶瑾菜为 30a 林分独有优势种，大果鳞毛蕨为 36a 林分独有优势种。

2.3 物种多样性指数

物种多样性能表征生物群落和生态系统的结构复杂性，体现群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异^[19]。从表 3 可看出，不同林龄马尾松人工林物种多样性存在一定波动：(1)随林龄增大马尾松物种丰富度指数先增大后减小，20a 林分达最大值，灌木层、草本层分别为 6.750 和 7.500。(2)Shannon-Wiener 指数 (H') 和 Simpson 指数 (D) 以及 Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 和 Alatalo 均匀度指数 (E_a) 在 10a~30a 之间变化趋势相反，30a~36a 之间变化趋势一致。Simpson 指数 (D) 在 20a 林分值最小，灌木层、草本层分别为 0.568 和 0.484；Shannon-Wiener 指数 (H') 20a 林分达到最大值，灌木层、草本层分别为 3.216 和 3.146。灌木层的 Pielou 均匀度指数在 20a 林分达到最大值 1.684，最小值出现在 36a 林分值为 1.201。草本 Pielou 均匀度指数在 36a 林分达到最大值 1.408，最小值出现在 10a 林分值为 1.267；灌木层和草本层的 E_a 最小值均出现在 20a 林分，其值分别为 0.055 和 0.042。灌木层的 E_a 最大值出现在 30a 林分值为 0.508，草

本层的 E_a 最大值出现在 36a 林分值为 0.481。

3 讨论

林木大小分布可用于评估干扰对森林的影响、描述森林的演替途径和结构发展以及预测未来林分结构^[20]。巢林等^[18]研究表明不同林龄杉木人工林的径级结构均呈正态分布。许恒等^[21]研究珍稀濒危植物桫欏种群径级结构与种内种间竞争关系也得出类似结论。本研究中，马尾松人工林随林龄增加，除第 I 径级外各径级分布的个体密度逐渐减少，符合人工林径级结构的分布规律^[22]。但可能受到人为干扰以及种内竞争压力的影响，导致林分径级结构存在分异现象^[23]。

物种丰富度和多样性是群落生态学研究的重要内容之一，常应用于多样性保护计划的制定以及鉴别需要保护的区域^[24]。菝葜、槲栎、铁芒萁在不同林龄林分中均为优势种，说明这些物种对马尾松人工林不同发育阶段的林下生境都具有较强的适应性。不同林龄林分物种组成和丰富度变化与 Margalef、Auclair 和 Goff 等^[25-26] 研究结果相似。在本研究中，把 10a、20a、30a、36a 林分分别视为幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林。在幼龄林阶段，林分郁闭度较低，林下有充足的光照条件，为一些喜光植物提供良好的生存条件，而此时耐荫性植物不利于生长。随着林分发育，到中龄林阶段，林下生存空间、光照、温度和湿度等环境因子变化，引来大量耐荫性植物，物种也相应增加。随后林分持续发育为近、成熟林阶段，不利于喜光植物的生存，林下种类对生存空间和养分的竞争加剧，加上马尾松针叶积累较多，黄酮

类和单宁等难分解物质降低了土壤养分质量^[27],导致林下植物种类稍减。因此,林下物种多样性呈现先增加后减小的趋势。许晴^[28]通过假设的群落条件及情景设计证明,Simpson 指数比 Shannon-Wiener 指数对物种均匀度更为敏感,而 Shannon-Wiener 指数对物种丰富度更敏感。本研究中 20a 林分丰富度最高,但可能受到环境或者人为因素的干扰,导致该林龄林分各物种个体分配不均匀,而 Simpson 指数对物种均匀度更为敏感,所以该林龄林分 Simpson 指数反而较低。马克平等^[24]对北京东灵山地区植物群落多样性的研究表明 Alatalo 均匀度指数受物种丰富度的影响最小。本研究中 Pielou 均匀度指数受丰富度影响大,随丰富度变化有相同的变化趋势,Alatalo 均匀度指数受丰富度的影响

小,可能受到其他因素的影响较大,所以变化趋势有一定差异性。

根据不同林龄马尾松人工林优势种生长特点及群落结构,对不同发育阶段林分提出不同的经营管理措施,具体为以下 3 个方面。第一,在幼龄林阶段,小径级林木较多,抵抗外界能力和竞争能力较弱。应适当筛选乡土物种和目标树种,注意人工补植和播种等措施^[16],改善林分树种组成和结构。第二,在中龄林阶段,物种丰富,结构复杂。应该适当间伐,为林下目标树种更新幼苗和补植幼苗提供良好的光照条件。第三,在近、成熟林阶段,应伐除妨碍优良木生长的枯立木、虫害木、分叉木和折顶木,为优良木创造良好的生存环境,维持稳定的森林群落结构。

参考文献:

- [1] 谢小魁,苏东凯,刘正纲,等.长白山原始阔叶红松林径级结构模拟[J].生态学杂志,2010,**29**(8): 1 477-1 481.
XIE X K, SU D K, LIU Z G, *et al.* Simulation of the diameter structure of the original broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(8): 1 477-1 481.
- [2] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,2006.
- [3] 王春玲,郭泉水,谭德远,等.准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究[J].应用生态学报,2005,**16**(7): 1 224-1 229.
WANG C L, GUO Q S, TAN D Y, *et al.* *Haloxylon ammodendron* community patterns in different habitats along south-east ern edge of Zhunger Basin [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(7): 1 224-1 229.
- [4] 谢晋阳,陈灵芝.暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征[J].生态学报,1994,**14**(4): 337-344.
XIE J Y, CHEN L Z. Species diversity characteristics of deciduous broad-leaved forest in warm temperate zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **4**(4): 337-344.
- [5] 漆良华,彭镇华,张旭东,等.退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局[J].生态学杂志,2007,**26**(11): 1 697-1 702.
QI L H, PENG Z H, ZHANG X D, *et al.* Species diversity and biomass distribution pattern of vegetation restoration communities in degraded land [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(11): 1 697-1 702.
- [6] 何艺玲,傅慰毅.人工林林下植被的研究现状[J].林业科学研究,2002,**15**(6): 727-733.
HE Y L, FU W Y. Research status of understory vegetation in artificial forest [J]. *Forest Research*, 2002, **15**(6): 727-733.
- [7] 刘士贵.全国森林资源//周晓峰.中国森林与生态环境[M].北京:中国林业出版社,1999: 518-519.
- [8] 卢兆银,李志辉,黄丽群.马尾松种源试验研究[J].中南林学院学报,2006,**26**(3): 5-10.
LU Z Y, LI Z H, HUANG L Q. Study on provenance of *Pinus massoniana* [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, **26**(3): 5-10.
- [9] 郑仁华,杨宗武,梁庆松,等.马尾松建筑材优良家系的选择[J].福建林学院学报,2002,**11**(1): 1-3.
ZHENG R H, YANG Z W, LIANG Q S, *et al.* The choice of excellent pedigree of masson pine building material [J]. *Journal of Fujian Forestry University*, 2002, **11**(1): 1-3.
- [10] 郑仁华,施季森,杨宗武,等.马尾松纸浆材优良家系的选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),2002,**26**(5): 1-6.
ZHENG R H, SHI J S, YANG Z W, *et al.* Selection of excellent families for masson pine pulp [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2002, **26**(5): 1-6.
- [11] 蔡树威,龙伟,杨章旗.马尾松不同种源采脂量与树体因子关系的研究[J].广西林业科学,2006,**35**(增刊1): 18-19.
CAI S W, LONG W, YANG Z Q. Study on the relationship between lipid intake and tree factors of masson [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2006, **35**(Supplement1): 18-19.
- [12] 覃冀,连辉明,曾令海,等.高产脂马尾松半同胞子代 20 年生测定林产脂力分析[J].广东林业科技,2005,**21**(2): 30-34.
TAN J, LIAN H M, ZENG L H, *et al.* High fat fat fellow *Pinus massoniana* half offspring born 20 years determination forest force analysis [J]. *Guangdong Forestry Technology*,

- 2005, **21**(2): 30-34.
- [13] 孟祥江, 何邦亮, 马正锐, 等. 中国马尾松林经营现状及近自然育林探索[J]. 世界林业研究, 2018, **31**(3): 63-67.
MENG X J, HE B L, MA Z, *et al.* The present management situation and natural cultivation of *Pinus massoniana* forest in China [J]. *World Forestry Research*, 2018, **31**(3): 63-67.
- [14] 邓伦秀, 李 茂. 马尾松人工林研究现状及展望[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(7): 2 968-2 971.
DENG L X, LI M. Present situation and prospect of masson pine plantation research [J]. *Anhui Agricultural Science*, 2009, **37**(7): 2 968-2 971.
- [15] 李克之. 黔中喀斯特山地森林灌木层结构与功能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [16] 姜 俊, 谢阳生, 陆元昌, 等. 不同林龄阶段马尾松人工林群落结构特征及经营策略[J]. 西北林学院学报, 2015, **30**(6): 1-7.
JIANG J, XIE Y S, LU Y C, *et al.* Community structure characteristics and management strategies of *Pinus massoniana* plantation at different forest age stages [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, **30**(6): 1-7.
- [17] 吴联杯, 施晓春, 邹丽娜, 等. 安溪云中山南岭栲径级结构与种间关联性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, **38**(5): 116-123.
WU L B, SHI X C, ZOU L N, *et al.* Research on the interspecific relationship of *Castanopsis castanopsis* structure in Nanling County, Yunshan Mountain, Anxi [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science)*, 2018, **38**(5): 116-123.
- [18] 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.
CHAO L, HONG T, LI J, *et al.* Analysis on the path grade structure and undergrowth species diversity of Chinese fir plantations of different age in subtropical forests [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2015, **24**(2): 88-96.
- [19] 中国森林编委会. 中国森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1978.
- [20] ARSENEAULT D, PAYETTE S. Reconstruction of millennial forest dynamics from tree remains in a subarctic tree line peatland [J]. *Ecology*, 1997, **78**: 1 873-1 883.
- [21] 许 恒, 刘艳红. 珍稀濒危植物梓叶槭种群径级结构与种内种间竞争关系[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(6): 1 160-1 170.
XU H, LIU Y H. The relationship between population size class structure and intraspecific competition of the rare and endangered species of *Acer tatschupensis* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, **38**(6): 1 160-1 170.
- [22] 孟祥楠, 赵雨森, 郑 磊. 嫩江沙地不同年龄樟子松人工林种群结构与林下物种多样性动态[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2 332-2 338.
MENG X N, ZHAO Y S, ZHENG L. Population structure and undergrowth species diversity dynamics of *Pinus campestris* plantation of different ages in nenjiang sandy land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(9): 2 332-2 338.
- [23] IKNAYAN K J, TINGLEY M W, FURNAS B J, *et al.* Detecting diversity: emerging methods to estimate species diversity [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2014, **29**: 97-106.
- [24] 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.
MA K P, HUANG J H, YU S L, *et al.* Beijing Donglingshan region research II richness of plant community diversity, evenness and species diversity index [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(3): 268-277.
- [25] VERMA R K, KAPOOR K S, SUBRAMANI, *et al.* Evaluation of plant diversity and soil quality under plantations raised in surface mined areas [J]. *Indian Journal of Forestry*, 2004, **27**(2): 227-233.
- [26] MARGALEF R. On certain unifying principles in ecology [J]. *Amer. Nat.*, 1963b, **97**: 357-364.
- [27] WANG C, WANG X A, WANG L. Plan species diversity of different age *Pinus tabulaeformis* plantations and its relations with soil fertility [J]. *Ecology Magazine*, 2007, **26**(8): 1 182-1 186.
- [28] 许 晴, 张 放, 许中旗, 等. Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数若干特征的分析及“稀释效应”[J]. 草业科学, 2011, **28**(4): 527-531.
XU Q, ZHANG F, XU Z Q, *et al.* Analysis of Simpson index and Shannon-wiener index and “dilution effect” [J]. *Science of Grass Industry*, 2011, **28**(4): 527-531.

(编辑: 潘新社)