2016-12-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2016.04052 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2016, 22 (6): 1048-1054

不同郁闭度马尾松人工林林下植物多样性*

赵燕波 张丹桔 张 健** 周泓杨 魏大平 张 捷 袁亚玲
四川农业大学生态林业研究所, 四川省林业生态工程重点实验室 成都 611130

摘 要 对现有11年生马尾松(*Pinus massoniana*)人工林通过均匀间伐、抚育修枝, 结合冠层分析仪测定郁闭度, 形成郁闭度约为0.9、0.8、0.7、0.6、0.5的5个梯度林分, 研究不同郁闭度林下植物组成及多样性特征, 结果表明: (1) 各郁闭度林下植物物种重要值分配较为平均, 灌木中枹栎(*Quercus serrate*)、毛桐(*Mallotus barbatus*)、黄牛奶(*Symplocos laurina*)较高, 草本中铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonila*)、山菅兰(*Dianella ensifolia*)较高, 在各郁闭度都占主要优势. (2) 随郁闭度减小, 林下植物物种数、Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-wiener多样性指数都有增大趋势, 但多在0.6或0.5郁闭度较0.9郁闭度才有显著增加, 在0.5郁闭度灌木物种数又有减小; 各郁闭度林下灌木、草本Pielou均匀度指数差异都不显著, 5个郁闭度林分草本Alatato均匀度指数差异较小, 灌木Alatato均匀度指数在0.6郁闭度中最高, 0.5郁闭度较0.6郁闭度又相对降低. (3) 各郁闭度林下植物生活型都是以高位芽为主, 占比均为50%-60%, 在0.6、0.7郁闭度中出现了地上芽植物, 0.6、0.5郁闭度中出现了一年生植物、大型高位芽植物, 地下芽植物百分比在0.5郁闭度有明显升高. (4) 0.9郁闭度林分分别与其他各郁闭度林下植物群落相似系数都较低, 0.5、0.6、0.7郁闭度之间群落相似系数相近且较高, 都超过70%, 在0.7、0.6郁闭度左右物种类别有稳定的趋势, 0.5与0.8郁闭度林分群落相似系数又有下降, 又有许多新物种更新. 综合而言, 随郁闭度减小, 林下植物物种数、生活型层次和多样性指数都呈增大趋势, 在0.6郁闭度中各项指标表现最优, 更小郁闭度可能会导致林下植物物种数、均匀度和多样性相对减小, 不利于林地地力维持. (图3 表5 参30)

关键词 郁闭度; 林下植物; 多样性; 马尾松人工林
CLC S718.5

Understory vegetation diversity of *Pinus massoniana* plantations with various canopy density*

ZHAO Yanbo, ZHANG Danju, ZHANG Jian**, ZHOU Hongyang, WEI Daping, ZHANG jie & YUAN Yaling
Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering of Sichuan Province, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract This study investigated the species composition and diversity of understory vegetation of *Pinus massoniana* plantations. The plantations were of five canopy density gradients as about 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, respectively. The investigation used methods including uniform thinning, pruning, and canopy analysis system (CI-110). The results showed comparatively even important values of understory vegetation in *P. massoniana* plantations with different canopy densities; *Quercus serrate*, *Mallotus barbatus* and *Symplocos laurina* were the dominant shrubs, *Dicranopteris dichotoma*, *Parathelypteris glanduligera*, *Woodwardia japonila*, *Dianella ensifolia* were the dominant herbages. With the decrease of canopy density, the species number, Margalef richness index, Simpson diversity index and Shannon-wiener diversity index of understory vegetation showed an increasing trend, while the shrub species number reduced at the canopy density of 0.5. The Pielou evenness index of shrub and herbage and the Alatato evenness index of herbage showed no significant difference in *P. massoniana* plantations with different canopy densities, but the Alatato evenness index of shrubs was highest at 0.6; the Alatato evenness index of shrubs at 0.5 canopy density was lower than 0.6. The understory vegetation was mainly Phanerophytes (50%-60%); Chamaephytes appeared at 0.6 and 0.7 canopy coverage densities; Pherophytes and Meso-phanerophytes appeared at 0.5 and 0.6 canopy coverage densities; the percentage of geophytes at 0.5 was obviously higher than others. The understory vegetation of *P. massoniana* plantations of 0.9 canopy coverage density had lower coefficient of community similarity with others, which was similar

收稿日期 Received: 2016-04-29 接受日期 Accepted: 2016-06-14
*国家自然科学基金项目(31370628)、国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05)、四川省科技支撑计划项目(12ZC0017)、四川省科技厅应用基础项目(2012JY0047)和四川省教育厅科技创新团队计划项目(11TD006)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31370628), the Key Sci-tech Project of China (2011BAC09B05), the Key Sci-tech Project of Sichuan Province (12ZC0017), the Applied Foundation Project of Sichuan Provincial Science and Technology Department (2012JY0047) and the Technology Innovation Team Project of Sichuan Education Department (11TD006)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: sicauzhangjian@163.com)

among the understory vegetation in *P. massoniana* plantations with 0.5, 0.6 and 0.7 canopy coverage density. The coefficient of the vegetation community similarity between 0.5 and 0.8 was relatively low. In general, with the decrease of canopy density, the species diversity index and the number of species and life forms of understory plants increased, and the canopy coverage density of 0.6 was the optimal canopy density for succession of understory vegetation. Below the canopy coverage density, the number of species, evenness index and species diversity index might decrease, and reduce the productivity and the site fertility in *Pinus massoniana* plantations.

Keywords canopy density; understory vegetation; diversity; *Pinus massoniana* plantation

林下植被是森林生态系统的重要组成部分，尽管其占森林生态系统的总生物量比例较小，但他们在维护森林的多样性、维持地力和生态功能稳定性方面发挥着十分重要的功能和作用[1-2]. 人工林带来可观经济效益的同时也带来了一系列的生态问题，如生物多样性明显下降、地力衰退、病虫害严重等[2-3]. 因此，林下植被对人工林可持续经营有十分重要的意义. 郁闭度能够反映森林结构和森林环境，是影响林地光照、森林降水等的决定性因子，对林下植被发育有着重要影响，从而影响林地生产力和生态系统稳定性；郁闭度也是森林资源调查中的一个重要调查因子，是森林经营管理中的重要指标[4-6]. 目前，国内外对于人工林经营中郁闭度相关研究较少，多关于郁闭度对林下幼树幼苗、套种作物更新或生长的影响[6-8]. 只有李双喜等报道了郁闭度与林下植物多样性的关系，结果显示较低郁闭度对马褂木人工林林下草本多样性有显著的促进作用[9]. 以往对于林分经营密度、郁闭度与林下植被关系的研究多是以不同间伐强度或保留密度来衡量，量化控制的梯度较大，较粗放，研究结果不一[10-13]；只做间伐、密度控制，林冠在较短时间内会重新趋向郁闭，而林冠郁闭程度可能是影响林下植物多样性的主导因素[14-16]. 为此在前人研究的合理间伐强度（或保留密度）基础上引入郁闭度梯度控制，研究不同郁闭度控制对林下植物组成、多样性的影响，对人工林的生态经营和管理具有重要意义.

马尾松（*Pinus massoniana*）是我国人工造林主要树种，适应性强，经济价值高[17]，也是长江中上游地区退耕还林的主要树种，但由于马尾松人工林生态系统树种单一、密度过大等不合理经营管理措施，也存在一系列的生态问题如地力衰退、生物多样性下降、病虫害严重、火灾频发等[18-20]. 目前，还缺少从郁闭度控制角度研究马尾松人工林生物多样性的动态变化，为此，我们选取宜宾高县11年生马尾松人工林为研究对象，通过均匀间伐、抚育修枝，以目测法结合冠层分析仪测定郁闭度，形成5个郁闭度梯度（0.9、0.8、0.7、0.6、0.5），分析不同郁闭度控制下马尾松人工林林下植物多样性及物种组成变化特征，以期为马尾松人工林的生态经营管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于四川宜宾高县来复镇森林经营所管辖林区（28°11′-28°47′ N，104°21′-104°48′ E），该地地貌以低山丘陵为主，属亚热带湿润季风气候，雨季5-10月，年平均气温18.1 ℃，海拔400-550 m，年均降雨量1 021.8 mm，相对湿度81%，年日照时数1 148 h. 土壤为发育在砂岩上的山地黄壤. 马尾松人工纯林的初植密度较大，结构简单，林下植物稀少，常见林下灌木有枹栎（*Quercus serrate*）、毛桐（*Mallotus barbatus*）、黄牛奶（*Symplocos laurina*）、梨叶悬钩子（*Rubus pirifolius*）等，草本有淡竹叶（*Lophatherum gracile*），金星蕨（*Parathelypteris glanduligera*）、铁芒萁（*Dicranopteris dichotoma*）、山菅兰（*Dianella ensifolia*）、狗脊蕨（*Woodwardia japonila*）等.

1.2 样地设置及概况

实验样地位于宜宾高县来复镇森林经营所毛颠坳，造林前是马尾松人工纯林皆伐地，选择地形地貌、海拔、母岩、土壤类型等相同或相近的连片分布的马尾松人工林为研究样地，2013年10月，以现有11年生马尾松人工林（郁闭度约0.9，栽植密度约1.5 m × 1.5 m）为基础，以前人研究结果的间伐保留密度[15-16]为参考，通过均匀间伐、抚育修枝，以目测法结合数字式植物冠层分析仪（CI-110）测定郁闭度，形成郁闭度约为0.9、0.8、0.7、0.6、0.5的5个梯度，2014年12月再进行一次抚育修枝调控郁闭度，每个梯度设置3个重复样地，每个样地设置一个20 m × 20 m标准样方. 样地间间隔大于10 m，样地离林缘距离大于10 m. 样地基本情况见表1.

1.3 野外调查及取样

2013年10月林分郁闭度控制后，对样地的基本情况（海拔、经纬度、坡度、坡向、坡位、树高、胸径、株行距等）进行调查记录. 待林分郁闭度控制1年后（经过两个春季），于2015年4月进行植物多样性调查. 在15个20 m × 20 m的样方中心和四角各选取1个（共5个）5 m × 5 m的小样方，样方四角做好标记，记录样方内灌木的种名、株数或丛数、高度、盖度、

表1 样地设置及林分状况

Table 1 Basic characteristics of sample plots and forest stands

郁闭度 Canopy density	海拔 Altitude (*h*/m)	坡度 Slope (*α*/°)	坡向 Aspect	平均胸径 Average DBH (*d*/cm)	平均树高 Average height (*h*/m)	密度 Density (n/hm^{-2})	土壤含水量 Soil water content (*w*/%)	土壤pH Soil pH	土壤有机碳 Soil organic carbon (w/g kg^{-1})
0.9	461.6	28.3	SE	10.16 ± 2.81	9.34 ± 1.55	3630	20.00 ± 0.56	3.91 ± 0.01	17.92 ± 0.46
0.8	462.6	30.7	SE	10.16 ± 1.99	8.96 ± 0.90	3200	19.64 ± 0.29	4.08 ± 0.03	12.56 ± 1.23
0.7	460.1	29.0	SE	10.38 ± 1.82	8.91 ± 0.73	2667	21.90 ± 1.23	3.97 ± 0.01	15.67 ± 1.33
0.6	456.7	29.0	SE	10.87 ± 2.30	9.38 ± 0.93	2415	20.23 ± 1.01	4.00 ± 0.01	12.64 ± 0.92
0.5	488.6	30.3	SW	11.56 ± 2.04	10.49 ± 0.59	1748	22.98 ± 1.08	3.98 ± 0.03	16.07 ± 0.88

冠幅、基径等并采集标本. 在每个5 m × 5 m样方中心各选取一个2 m × 2 m的小样方, 样方四角做好标记, 记录样方内草本植物的种名、株(丛)数、高度、盖度、冠幅、基径等并采集标本[21-24]. 按照Raunkiaer生活型分类系统将植物进行生活型分类并统计生活型谱.

1.4 数据的处理与分析

通过野外调查数据, 分别计算灌木和草本植物的重要值, 再计算各个多样性指数[25-27]:

(1) 灌木层和草本层的重要值: IV = (相对盖度+相对高度)/2

(2) Margalef丰富度指数: $R = (S - 1)/\ln N$

(3) Simpson指数: $SP = 1 - \sum_{i=1}^{s} P_i^2$

(4) Shannon-Wiener多样性指数: $SW = - \sum_{i=1}^{s} P_i(\ln P_i)$

(5) Pielou均匀度指数: $JSW = - \sum_{i=1}^{s} P_i(\ln P_i)/\ln S$

(6) Alatalo均匀度指数: $AL = (1/\sum_{i=1}^{s} P_i^2 - 1)/[\exp(-\sum_{i=1}^{s} P_i(\ln P_i))]$

(7) 群落相似系数Sorensen指数: $IS = [2c/(a + b)] \times 100\%$

以上式中, N为调查样方中所有物种个体数之和, P_i为相对重要值, S为调查样方中物种数, a为某个样地的物种数, b为另一个样地的物种数, c为这两个样地的共有物种数.

采用EXCEL2007作图, SPSS20.0进行数据统计, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD法)检验密度、郁闭度控制对林下植物多样性的影响, 显著性水平设定为0.05.

2 结果与分析

2.1 不同郁闭度马尾松人工林林下植物组成、生活型及重要值

在所有调查样方中, 共出现植物种类24科36属38种, 其中灌木13科19属21种, 草本11科17属17种. 物种重要值大小可作为度量群落中植物种优势度的一个指标, 对群落中植物的相对重要性及最适生境起指示作用[28]. 由表2和表3可以看出, 各物种重要值较为平均, 最大重要值不超过0.30, 灌木层毛桐、枹栎、岗柃、黄牛奶, 草本层皱叶狗尾草、铁芒萁、金星蕨、狗脊蕨、山菅兰在各个郁闭度林分中都有分布, 且重要值较高. 随郁闭度减小, 物种数有升高趋势, 各梯度物种数分别为13、20、23、27、31种. 其中灌木7、12、14、17、15种, 草本6、8、9、10、16种, 灌木物种数在0.5郁闭度有减小. 在较高郁闭度下的优势种枹栎、黄牛奶、铁芒萁、狗脊蕨的重要值随郁闭度梯度减小有减小趋势, 而各物种重要值随郁闭度梯度减小(物种数量增加)分配更加均匀.

由表4可以看出, 林下灌木绝大多数是中、小型高位芽植物, 小型高位芽植物物种数随郁闭度减小有增多趋势, 4个郁闭度干扰控制过的林分都有矮高位芽植物分布, 且比例都在10%-15%. 各郁闭度林下植物生活型都是以高位芽植物为主, 百分比都在50%-60%. 在0.6、0.7郁闭度林分中出现了地上芽植物, 在0.6、0.5郁闭度林分中出现了一年生植物、大型高位芽植物, 地面芽植物的百分比随郁闭度减小有减小趋势, 但是其物种数没有明显减少, 地下芽植物百分比0.5郁闭度明显高于其他郁闭度林分中.

2.2 不同郁闭度马尾松人工林林下植物丰富度指数

林下灌木、草本、灌草的Margalef丰富度指数随着郁闭度减小有增大趋势(图1). 灌木丰富度指数3个较高郁闭度林分差异不显著, 在0.6、0.5郁闭度较对照林分有显著增加. 草本丰富度指数4个较高郁闭度林分差异不显著, 在0.5郁闭度较对照林分有显著增加. 灌草丰富度指数4个较高郁闭度林分差异不显著, 在0.5郁闭度较对照林分有显著增加, 0.5、0.6郁闭度林分差异不显著.

表2 灌木层主要物种组成、生活型及重要值

Table 2 Main species composition, life form and important values of the shrub layer

种名 Species	科 Family	生活型 Life form	郁闭度 Canopy density				
			0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
梨叶悬钩子 *Rubus pirifolius*	蔷薇科 Rosaceae	矮高位芽植物 Nano-phanerophytes	-	0.03	0.02	-	-
山莓 *Rubus corchorifolius*	蔷薇科 Rosaceae	矮高位芽植物 Nano-phanerophytes	-	0.10	0.05	0.03	0.06
盾叶莓 *Rubus peltatus*	蔷薇科 Rosaceae	矮高位芽植物 Nano-phanerophytes	-	0.13	0.07	0.09	0.10
野梧桐 *Mallotus tenuifolius*	大戟科 Euphorbiaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	-	0.03	-	0.03	-
毛桐 *Mallotus barbatus*	大戟科 Euphorbiaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	0.16	0.06	0.10	0.06	0.13
乌桕 *Sapium sebiferum*	大戟科 Euphorbiaceae	中型高位芽植物 Meso-phanerohpytes	-	-	0.04	-	0.03
巴豆 *Croton tiglium*	大戟科 Euphorbiaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	0.12	-	0.04	0.05	0.05
香樟 *Cinnamomum camphora*	樟科 Lauraceae	大型高位芽植物 Meso-phanerophytes	-	-	-	0.04	0.03
盐肤木 *Rhus chinensis*	漆树科 Anacardiaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	-	-	-	0.04	-
檵木 *Aralia chinensis*	五加科 Araliaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	-	0.05	0.05	0.04	0.03
枹栎 *Quercus serrata*	壳斗科 Fagaceae	中型高位芽植物 Meso-phanerohpytes	0.23	0.26	0.22	0.16	0.14
尖叶榕 *Ficus henryi*	桑科 Moraceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	0.04	-	-	-	0.02
岗柃 *Eurya groffii*	山茶科 Theaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	0.12	0.05	0.05	0.04	0.12
茶树 *Camellia sinensis*	山茶科 Theaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	-	0.05	0.06	0.03	0.07
黄牛奶树 *Symplocos laurina*	山矾科 Symplocaceae	中型高位芽植物 Meso-phanerohpytes	0.28	0.05	0.08	0.07	0.07
小叶女贞 *Ligustrum quihoui*	木犀科 Oleaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	-	0.11	0.07	0.11	0.07
棕竹 *Rhapis excelsa*	棕榈科 Palmae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	-	0.04	-	-	-
葛藤 *Argyreia seguinii*	旋花科 Convolvulaceae	矮高位芽植物 Nano-phanerophytes	-	-	-	0.03	0.05
地果 *Ficus tikoua*	桑科 Moraceae	地上芽植物 Chamaephtes	-	-	0.02	0.06	-
木姜子 *Litsea cubeba*	樟科 Lauraceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	0.04		0.02	0.12	0.04
柑橘 *Citrus reticulata*	芸香科 rutaceae	大型高位芽植物 Meso-phanerophytes	-	-	-	0.01	-

表3 草本层主要物种组成、生活型及重要值

Table 3 Main species composition, life form and important values of the herbage layer

种名 Species	科 Family	生活型 Life form	郁闭度 Canopy density				
			0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
商陆 *Phytolacca*	商陆科 Phytolaccaceae	地下芽植物 Geophytes	-	-	0.07	-	0.01
淡竹叶 *Lophatherum gracile*	禾本科 Poaceae	地面芽植物 Hemicyptophytes	-	0.06	0.05	0.05	0.10
皱叶狗尾草 *Setaria plicata*	禾本科 Poaceae	地面芽植物 Hemicyptophytes	0.17	0.04	0.05	0.05	0.03
白茅 *Imperata cylindrica*	禾本科 Poaceae	地下芽植物 Geophytes	0.16	-	0.06	-	0.06
黄茅 *Heteropogon contortus*	禾本科 Poaceae	地下芽植物 Geophytes	-	0.06	-	0.04	0.07
水竹 *Phyllostachys heteroclada*	禾本科 Poaceae	小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	-	-	0.12	-	0.08
仙茅 *Curculigo orchioides*	仙茅科 Hypoxidaceae	地面芽植物 Hemicyptophytes	-	0.05	-	0.06	0.04
铁芒萁 *Dicranopteris linearis*	里白科 Gleicheniaceae	地下芽植物 Geophytes	0.24	0.27	0.20	0.20	0.14
里白 *Hicriopteris glauca*	里白科 Gleicheniaceae	地下芽植物 Geophytes	-	-	-	-	0.03
乌蕨 *Stenoloma chusanum*	鳞始蕨科 Lindsaeaceae	地下芽植物 Geophytes	-	-	-	-	0.02
金星蕨 *Parathelyteris glanduligea*	金星蕨科 Thelyteridaceae	地面芽植物 Hemicyptophytes	0.17	0.14	0.20	0.20	0.11
狗脊蕨 *Woodwardia japonila*	乌毛蕨科 Blechnaceae	地面芽植物 Hemicyptophytes	0.21	0.17	0.10	0.17	0.13
姬蕨 *Hypolepis puuctata*	姬蕨科 Dennstaedtiaceae	地下芽植物 Geophytes	-	-	-	0.13	0.04
山菅兰 *Dianella ensifolia*	鸢尾科 Tridaceae	地面芽植物 Hemicyptophytes	0.15	0.21	0.15	0.16	0.06
展毛野牡丹 *Melastoma normale*	野牡丹科 Melastomataceae	矮高位芽植Nano-phanerophytes	-	-	-	-	0.03
牛筋草 *Eleusine indica*	禾本科 Poaceae	一年生植物 Pherophytes	-	-	-	0.04	-
杠板归 *Polygonum perfoliatum*	蓼科 Polygonaceae	一年生植物 Pherophytes	-	-	-	-	0.03

表4 马尾松人工林林下植物生活型的百分数(*P*/%)

Table 4 Proportion of life forms in understory vegetation of *Pinus massoniana* plantations (*P*/%)

生活型 Life form	郁闭度 Canopy density				
	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50
大型高位芽植物 Meso-phanerophytes	-	-	-	7.41	3.23
中型高位芽植物 Meso-phanerohpytes	25.38	10.00	13.04	7.41	9.68
小型高位芽植物 Micro-phanerophytes	38.46	35.00	34.78	33.33	29.03
矮高位芽植 Nano-phanerophytes	-	15.00	13.04	11.11	12.90
地上芽植物 Chamaephtes	-	-	4.35	3.70	-
地面芽植物 Hemicyptophytes	30.77	30.00	21.73	22.22	19.35
地下芽植物 Geophytes	15.38	10.00	13.04	11.11	22.58
一年生植物 Pherophytes	-	-	-	3.70	3.23

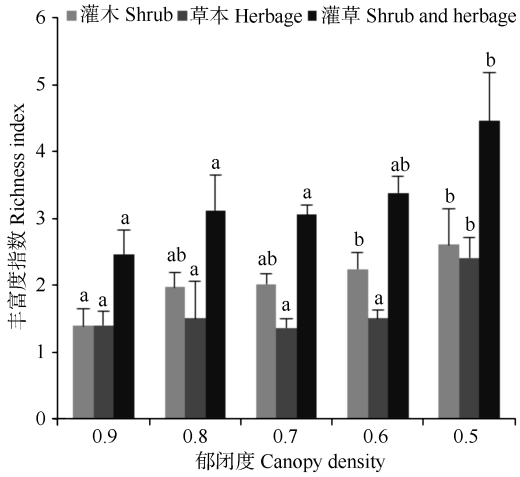


图1 不同郁闭度马尾松林下灌草Margalef丰富度指数(平均值±标准偏差). 不同字母表示差异显著($P < 0.05$).

Fig. 1 The Margalef richness index (mean ± SD) of the shrub and herbage under different canopy density of *Pinus massoniana* plantations. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$.

2.3 不同郁闭度马尾松人工林林下植物多样性指数

如图2所示, 林下灌木Simpson优势度指数4个郁闭度控制过的林分都较对照林分有显著升高, 但他们之间差异不显著, 整体呈先升高再降低再升高趋势, 在0.5郁闭度为最大值; 草本Simpson指数则随郁闭度减小呈增大趋势, 4个较高郁闭度差异不显著, 0.5郁闭度较前4个梯度有显著升高. 灌木Shannon-Wiener多样性指数则在0.5郁闭度才表现出与对照林分有显著增加, 规律大致与Simpson指数一致; 草本Shannon-Wiener指数变化规律与Simpson指数一致.

2.4 不同郁闭度马尾松人工林林下植物均匀度指数

如图3所示, 5个郁闭度林分灌木、草本Pielou均匀度指数变化趋势大致相同, 无显著差异. 5个郁闭度林分草本Alatato均匀度指数差异较小, 灌木Alatato均匀度指数在0.6郁闭度中最高, 0.5郁闭度较0.6郁闭度又相对降低.

2.5 不同郁闭度马尾松人工林林下植物群落相似性

表5中反映了不同郁闭度林分林下植物群落相似系数和共有物种数以差异约10%呈区间性分布. 由于原始林分物种数较少, 其他各林分与原始林分群落相似系数都较低, 0.7郁闭度林分与原始林分群落相似系数最高, 达61.11%. 0.6、0.7郁闭度林分与0.8郁闭度林分群落相似系数都在75%左右, 说明在这种抚育间伐强度下, 群落物种更替减缓, 处于相对稳定, 0.8与0.5郁闭度林分群落相似系数则为66.67%, 说明在0.5郁闭度条件下相对0.8郁闭度又适应许多新的物种更新. 0.5、0.6、0.7郁闭度林分之间群落相似系数都超过70%, 且相近, 这说明在0.7郁闭度左右物种类别较稳定.

表5 马尾松人工林林下植物群落相似系数(SO/%)和共有物种数

Table 5 The community similarity coefficient (SO/%) and the number of common species of the understory vegetation under *Pinus massoniana* plantations

郁闭度 Canopy density	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
0.9		9	11	11	10
0.8	54.55		16	18	17
0.7	61.11	74.42		18	21
0.6	55.00	76.60	72.00		22
0.5	45.45	66.67	75.93	75.86	

3 结论与讨论

本研究结果显示, 各郁闭度林下植物物种重要值分配较

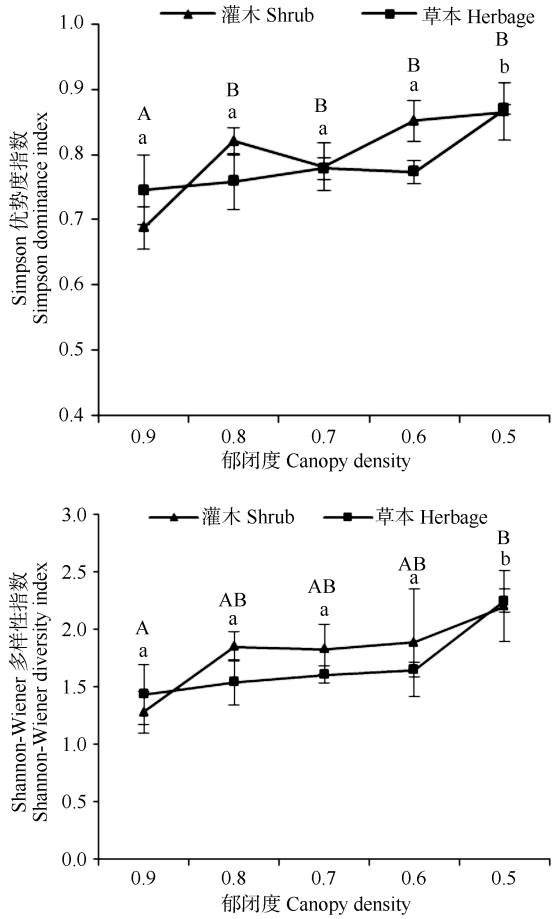


图2 不同郁闭度马尾松林下灌草Simpson优势度指数和Shannon-Wiener物种多样性指数（平均值±准偏差）. 不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）. 大写字母表示灌木，小写字母表示草本.

Fig. 2 The Simpson dominance index and Shannon-wiener species diversity index (mean ± SD) of the shrub and herbage under different canopy density of *Pinus massoniana* plantations. Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$; capital letters mean herbage; lowercase letters mean shrub.

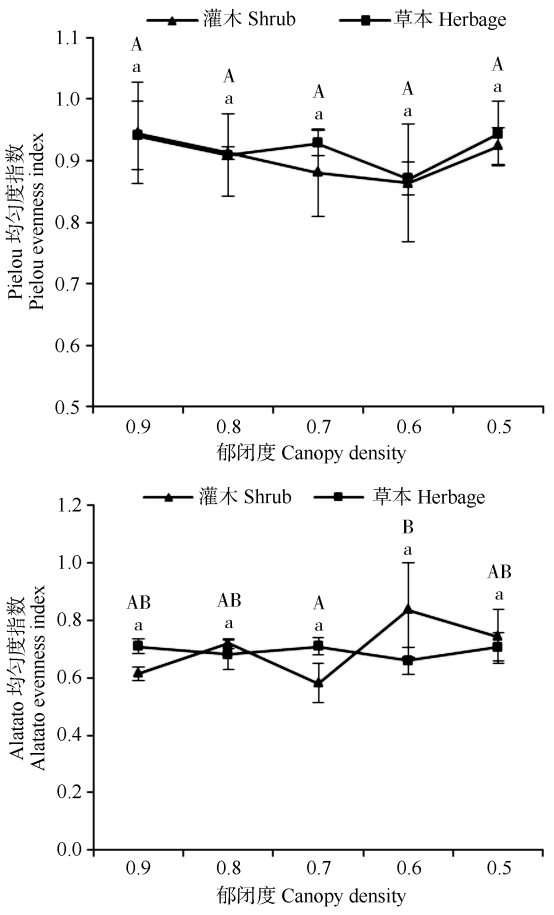


图3 不同郁闭度马尾松林下灌草 Pielou 均匀度指数，Alatato 均匀度指数（平均值±标准偏差）. 不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）. 大写字母表示灌木，小写字母表示草本.

Fig. 3 The Pielou evenness index and Alatato evenness index (mean ± *SD*) of the shrub and herbage under different canopy density of *Pinus massoniana* plantations. Different letters indicate significant difference at P <0.05; capital letters mean herbage; lowercase letters mean shrub.

为平均，灌木中枹栎、毛桐、黄牛奶较高，草本中铁芒萁、金星蕨、狗脊蕨、山菅兰较高，在各郁闭度都占主要优势. 随郁闭度减小，林下植物物种数、Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-wiener多样性指数都有增大的趋势，多是在0.6或0.5郁闭度较0.9郁闭度才有显著增加，但在0.5郁闭度灌木物种数有减小. 各郁闭度林下灌木、草本Pielou均匀度指数差异都不显著，5个郁闭度林分草本Alatato均匀度指数差异较小，灌木Alatato均匀度指数在0.6郁闭度中最高，0.5郁闭度较0.6郁闭度又相对降低. 各郁闭度林下植物生活型都是以高位芽为主，百分比均为50%-60%，在0.6、0.7郁闭度中出现了地上芽植物，0.6、0.5郁闭度林分中出现了一年生植物、大型高位芽植物，地下芽植物百分比在0.5郁闭度有明显升高. 0.9郁闭度林分与其他各郁闭度林下植物群落相似系数都较低，0.5、0.6、0.7郁闭度林分之间群落相似系数相近且较高，都超过70%，在0.7、0.6郁闭度左右物种类别有稳定的趋势，0.5与0.8郁闭度林分群落相似系数有所下降，有许多新物种更新.

在0.9郁闭度林分中，由于初植密度较大、结构简单，林冠郁闭程度高，对林下的光照、水分拦截较多，耐阴性较弱的物种和需水较多的物种难以生存；林分密度、郁闭度大，林下凋落物丰富，积累的黄酮类、单宁等物质较多，化感作用较强，对植物生长也有较大影响[23]. 0.9郁闭度林下分布较多是枹栎、黄牛奶、金星蕨、狗脊蕨、山菅兰等适应性较强的物种，这些物种几乎在各个郁闭度中都占主要优势. 各郁闭度林分林下植物物种重要值分配都较为平均，最大重要值不超过0.30，优势种的重要值随郁闭度减小有降低的趋势. 在较高郁闭度林分中，光照、水分等生存资源相对有限，物种间的竞争也较为激烈，物种数稀少，适宜生存的物种优势更加突出，随着郁闭度的减小，光照、水分较为充裕，物种间竞争相对缓和，适宜生存的物种数量增加，优势种优势反而相对减弱.

随郁闭度减小，林下植物物种数、Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-wiener多样性指数都有增大的趋势，多是在较高郁闭度林分之间差异不显著，在0.5或0.6郁闭度才显著高于对照林分. 灌木物种数对郁闭度减小的变化较敏感，在0.8郁闭度就有明显增多，在0.6郁闭度增加到17种，但0.5郁闭度又减少到15种，草本则在中间3个郁闭度相

近, 在0.5郁闭度才有较明显增多. 这可能是因为随着郁闭度减小, 光照、水分条件更充裕有利于植物种子萌发, 林分郁闭度、密度降低也利于植物种子的传播, 大量喜光的先锋植物、随机种(如香樟、盐肤木、商陆)迁入较小郁闭度林分定居, 但光照增强到一定值, 物种大量增加, 物种间竞争也愈加激烈, 有植物种在竞争中被淘汰(如阴生植物), 导致物种数减少[29]. 灌木Alatato均匀度指数在0.6郁闭度中最高, 0.5郁闭度较0.6郁闭度又相对降低, 有研究表明, 在强度间伐干扰下, 林冠被彻底打破, 影响阴生物种生存, 有些阳生性的草本植物如铁芒萁等迅速占据了各类资源, 大量发展, 从而会导致林下植物多样性、均与度的相对较低[30]. 各郁闭度林下植物生活型都是以高位芽为主, 占比都在50%-60%, 在0.6、0.7郁闭度中出现了地上芽植物, 0.6、0.5郁闭度林分中出现了一年生植物、大型高位芽植物, 各类生活型在0.6郁闭度中都有分布, 地下芽植物百分比在0.5郁闭度有明显升高. 在较低郁闭度林分中, 林下植物可以利用的空间、水热资源也更加充裕, 林下植物生活型的结构层次更复杂, 更复杂的生活型层次, 有利于充分利用各类生活资源积累养分和生物量, 增强人工林生态系统的稳定性. 可能是因为对照林分物种数较少, 与其他各林分林下植物群落相似系数都较低, 0.5、0.6、0.7郁闭度林分之间群落相似系数相近且较高, 都超过70%, 这说明在0.7、0.6郁闭度左右物种类别有稳定的趋势, 可能是因为0.5郁闭度草本物种数的明显增加导致0.5与0.8郁闭度群落相似系数相对较低.

本研究的整体结果与前人报道的轻度、中度、重度间伐对林下植物的影响呈先增大后减小的趋势的结果[15]相似, 多是在0.5或0.6郁闭度林下植物的丰富度和多样性有显著增加, 且在0.6郁闭度左右群落植物种类也较为稳定, 群落生活型层次更复杂, 更有利于林下植物养分和生物量的积累及增强人工林生态系统的稳定性. 本研究设置的0.6郁闭度林分密度在2 400株/hm^{2}左右, 也符合抚育间伐后较优保留密度[21]. 0.5郁闭度相对0.6郁闭度灌木物种数有减少, 生活型缺少了地上芽植物, 较低郁闭度林下阳生性物种如铁芒萁等优势更加突出, 林下灌草均匀度指数也显著降低, 可能会导致林下植物多样性、稳定性相对较低, 过低的经营郁闭度、密度, 目的树种的生产力较低, 也不利于林地水土保持, 难以实现人工林的可持续经营.

参考文献 [References]

1 崔国发. 人工林地力衰退机理及其防止对策[J]. 世界林业研究, 1996, **9** (5): 61-69 [Cui GF. Depletion mechanism of forest plantation productivity and preventive strategy [J]. *Wor For Res*, 1996, **9** (5): 61-69]

2 张昌顺, 李昆. 人工林地力的衰退与维护研究综述[J]. 世界林业研究, 2005, **18** (1): 17-21 [Zhang CS, Li K. Advance in research on soil degradation and soil improvement of timber plantations [J]. *Wor For Res*, 2005, **18** (1): 17-21]

3 刘庆, 尹华军, 程新颖, 林波, 胡蓉, 赵春章, 尹春英. 中国人工林生态系统的可持续更新问题与对策[J]. 世界林业研究, 2010, **23** (1): 71-75 [Liu QY, Hua J, Cheng XY, Lin B, Hu RZ, Chun Z, Yin CY. Problems and strategies of sustainable regeneration of plantation ecosystem in China [J]. *Wor For Res*, 2010, **23** (1): 71-75]

4 朱教君, 康宏樟, 胡理乐. 应用全天空照片估计林分透光孔隙度(郁闭度) [J]. 生态学杂志, 2005, **24** (10): 1234-1240 [Zhu JJ, Kang HZ, Hu LL. Estimation on optical porosity or canopy closure for a forest stand with hemispherical images [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24** (10): 1234-1240]

5 Alessandro P, Vittorio T. Canopy cover and canopy closure: comparison of assessment techniques [J]. *Eur J For Res*, 2005, **128**: 265-272

6 潘惠均. 林分郁闭度对杉木林下浙江楠和红豆树幼苗生长的影响[J]. 浙江农业科学, 2005 (8): 1206-1208 [Pan HJ. Influence of canopy density on the seeding of *Phoebe bournei* and *Ormosia hosiei* in Chinese fir plantation [J]. *Zhejiang Agric Sci*, 2005 (8): 1206-1208]

7 王永杰, 张首军. 不同郁闭度下天然白皮松林更新的研究[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2008, **22** (4): 83-85 [Wang YJ, Zhang SJ. The study of regeneration of natural *Pinus bungeana* in different forest canopy closure [J]. *J Shanxi Nor Univ Nat Sci Ed*, 2008, **22** (4): 83-85]

8 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 郭文福, 卢立华, 温远光. 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 YH, Sun DJ, Lin JY, Guo WF, Lu LH, Wen YG. Effect of close-to-nature management on the natural regeneration and species diversity in a *Masson pine* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (19): 6154-162]

9 李双喜, 朱建军, 张银龙, 叶正文, 黄启忠, 高君辉. 人工马褂木林下草本植物物种多样性与林分郁闭度的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2009, **25** (2): 20-24 [Li SX, Zhu JJ, Zhang YL, Ye ZW, Huang QZ, Gao JH. Diversity of understory herbaceous species and canopy density of *Liriodendron chinenes* stand [J]. *J Ecol Rur Environ*, 2009, **25** (2): 20-24]

10 Weidenfalk O, Weslien J. Plant species richness in managed boreal forests-Effects of stand succession and thinning [J]. *For Ecol Manage*, 2009, **257** (5): 1386-1394.

11 Nagai M, Yoshida T. Variation in understory structure and plants species diversity influenced by silvicultural treatments among 21-to 26-year old *Picea glehnii* plantations [J]. *J For Res*, 2006, **11** (1): 1-10

12 段劼, 马履一, 贾忠奎, 公宁宁, 车文瑞. 抚育强度对侧柏人工林林下植物生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2010, **25** (5): 128-135 [Duan J, Ma LY, Jia ZK, Gong NN, Che WR. Effects of thinning intensity on the undergrowth vegetation under the *Platycladus orientalis* young plantation [J]. *J NW For Univ*, 2010, **25** (5): 128-135]

13 李瑞霞, 马洪靖, 闵建刚, 郝俊鹏, 关庆伟. 间伐对马尾松人工林林下植物多样性的短期和长期影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21** (5): 807-812 [Li RX, Ma HJ, Min JG, Hao JP, Guan QW. Short-term and Long-term effects of thinning on the undergrowth diversity in the *Pinus massoniana* plantation [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, **21** (5): 807-812]

14 谌红辉, 丁贵杰, 温恒辉, 陆毅. 造林密度对马尾松林分生长与效益的影响研究[J]. 林业科学研究, 2011, **24** (4): 470-475 [Chen HH, Ding GJ, Wen HH, Lu Y. Effects of planting density on growth and economic benefit of *Masson pine* plantation [J]. *For Res*, 2011, **24** (4): 470-475]

15 鲍斌, 丁贵杰. 抚育间伐对马尾松林分生长与植物多样性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33** (3): 30-34 [Bao B, Ding GJ. Effects of thinning on growth and vegetation diversity of *Pinus massoniana* plantation [J]. *J Cen S Univ For Technol*, 2013, **33** (3): 30-34]

16 李瑞霞, 闵建刚, 彭婷婷,刘娜,郝俊鹏,王东,关庆伟. 间伐对马尾松人工林植被物种多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, **41** (3) 61-68 [Li RX, Min JG, Peng TT, Liu N, Hao JP, Wang D, Guan QW. Effects of thinning on understory species diversities of *Pinus massoniana* forests [J]. *J N Agri For Univ (Nat Sci)*, 2013, **41** (3) 61-68]

17 李明军, 杜明凤, 聂朝俊. 马尾松人工林地力维护研究进展[J]. 世

界林业研究, 2014, **27** (5): 32-36 [Li MJ, Du MF, Nie CJ. Research advances in soil improvement of *Pinus massoniana* plantation [J]. *Wor For Res*, 2014, **27** (5): 32-36]

18 Xu XN, Hirata E. Forest floor mass and litterfall in *Pinus luchuensis* plantations with and without broad-leaved trees [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **157** (1/3): 165-173.

19 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 张健, 杨万勤, 欧江, 张捷, 宋小艳, 殷睿. 马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态[J]. 植物生态学报, 2014, **38** (5): 477-490 [Cui NJ, Zhang DJ, Liu Y, Zhang J, Yang WQ, Ou J, Zhang J, Song XY, Yin R. Plant diversity and seasonal dynamics in forest gaps of varying sizes in *Pinus massoniana* plantations [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2014, **38** (5): 477-490]

20 陆元昌, 张守攻, 雷相东, 宁金魁, 王懿祥. 人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J]. 世界林业研究, 2009, **22** (1): 20-27 [Lu C, Hang SG, Lei XD, Ning JK, Wang YX. Heoretical basis and implementation techniques on close-to-nature transformation of plantations [J]. *Wor For Res*, 2009, **22** (1): 20-27]

21 谌红辉, 方升佐, 丁贵杰, 许基煌, 温恒辉. 马尾松间伐的密度效应[J]. 林业科学, 2010, **46** (5): 84-91 [Chen HH, Fang SZ, Ding GJ, Xu JH, Wen HH. Thinning density effects on masson pine plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46** (5): 84-91]

22 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 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 KP, Huang JH, Yu SL, Chen LZ. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: species richness, evenness and species diversity [J]. *Acta Ecol Sin*, 1995, **15** (3): 268-277]

23 汪超, 王孝安, 王玲. 不同种植年代油松林植物多样性及土壤养分变化[J]. 生态学杂志, 2007, **26** (8): 1182-1186 [Wang C, Wang XA, Wang L. Plant species diversity of different age *Pinus tabulaefoanis* plantations and its relations with soil fertility [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26** (8): 1182-1186]

24 温远光, 元昌安, 李信贤. 大明山中山植被恢复过程植物物种多样性的变化[J]. 植物生态学报, 1998, **22** (1): 33-40 [Wen GY, Yuan CA, Li XX. Development of species diversity in vegetation resiuration process in Mid-Mountain region of Damingshan [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1998, **22** (1): 33-40]

25 Li XH, Yin XM, Xia B, Li WL, Li Y. Effects of bird seed dispersal on diversity of the invaded plants in several hedge types [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (6): 1657-1666

26 马克平, 刘灿然, 于顺利, 王巍. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅲ. 几种类型森林群落的种-多度关系研究[J]. 生态学报, 1997, **17** (6): 573-583 [Ma KP, Liu CR, Yu SL, Wang W. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China Ⅲ. Species-abundance relations of several types of forests communities [J]. *Acta Ecol Sin*, 1997, **17** (6): 573-583]

27 Sun J, Li XZ, Wang XW, Lü JJ, Li ZM, Hu YM. Latitudinal changes in species diversity of permafrost wetland plant communities in Great Xing'an Mountain valleys of Northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (5): 272-277

28 邵彬, 邓坤枚. 长白山北坡亚高山云冷杉林的植物种类组成及重要值[J]. 自然资源学报, 2000, **15** (1): 66-73 [Shao B, Deng KM. The composition and important value of plant species in subalpine *Spruce-fir* forest on the northern slope of Changbai Mts [J]. *J Nat Res*, 2000, **15** (1): 66-73]

29 赵成章, 石福习, 董小刚, 任珩, 盛亚萍, 高福元, 杨文斌. 祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化[J]. 生态学报, 2011, **31** (1): 115-122 [Zhao CZ, Shi FX, Dong XG, Ren H, Sheng YP, Gao FY, Yang WB. Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (1): 115-122]

30 何友均, 梁星云, 覃林, 李智勇, 邵梅香, 谭玲. 南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2013, **33** (8): 2484-2495 [He YJ, Liang XY, Qin L, Li ZY, Shao MX, Tan L. Community characteristics and soil properties of coniferous plantation forest monocultures in the early stages after close-to-nature transformation management in southern subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (8): 2484-2495]