

DOI: 10.5846/stxb202111153201

王佳佳, 贺涛, 张沂, 徐海量, 李丙文. 间伐强度对阿尔泰山天然林下植被的影响. 生态学报, 2022, 42(23): 9761-9768.

Wang J J, He T, Zhang Y, Xu H L, Li B W. Effects of thinning intensity on understory plant of natural forest in Altai Mountains, Xinjiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9761-9768.

## 间伐强度对阿尔泰山天然林下植被的影响

王佳佳<sup>1</sup>, 贺涛<sup>3</sup>, 张沂<sup>3</sup>, 徐海量<sup>2,\*</sup>, 李丙文<sup>2</sup>

1 新疆农业大学林学与风景园林学院, 乌鲁木齐 830052

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

3 新疆阿尔泰山国有林管理局布尔津分局, 布尔津 836600

**摘要:**以阿尔泰山天然林为研究对象,探究不同间伐强度(19%、33%、55%、62%)对林下植被的影响,为该区天然林的经营管理提供理论依据。运用样地调查法,对间伐 30 a 后的林木进行每木检尺,调查林下植被结构、物种多样性,对测定数据进行单因素方差分析和 LSD 多重比较检验。结果表明:(1)草本层物种丰富度随间伐强度的增大而增大,62%间伐强度显著大于其他处理;灌木层物种丰富度随间伐强度的增大呈先增后减的趋势,55%间伐强度最大( $P>0.05$ );不同间伐强度处理之间,林下植被的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数均无显著差异( $P>0.05$ ),草本植物优势种各间伐强度之间大致相同;(2)适当增加间伐强度可以明显提高灌木层和草本层密度,以 55%间伐强度为优( $P<0.05$ ),林下植被的盖度随着间伐强度的增大先增后减,间伐显著影响灌木植物盖度,而对草本层盖度则影响不显著( $P>0.05$ )。以上研究表明从恢复林地多样性的角度考虑,间伐强度选取 55%更合理。

**关键词:**间伐强度;植物多样性;阿尔泰山;森林更新

## Effects of thinning intensity on understory plant of natural forest in Altai Mountains, Xinjiang, China

WANG Jiajia<sup>1</sup>, HE Tao<sup>3</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>, XU Hailiang<sup>2,\*</sup>, LI Bingwen<sup>2</sup>

1 College of forestry and landscape architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2 Xinjiang Institute of ecology and geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

3 Burqin branch of Altai Mountain state owned Forest Administration, Burqin 836600, China

**Abstract:** This paper used the typical sampling in order to study the impact of four types of thinning intensities (19%, 33%, 55%, and 62%) on the species density, diversity and coverage of undergrowth vegetation, and provide a theoretical basis for the management in natural forest of Altai Mountains. In this study, taking the natural forest of Altai Mountains as object with 12 samples were set up to measure all trees of different sample plots after 30 years thinning, in the same time, undergrowth vegetation structure (coverage and density), plant composition, and diversity (richness index, Shannon-Wiener index, Simpson index, and Pielou index) in the disturbed communities were investigated. One-way analysis of variance (ANOVA) and Fisher's list significant difference (LSD) multiple comparisons were used for significance test and Pearson correlation analysis among under-story vegetation was conducted. The investigation of the plot showed that: (1) appropriate thinning improved the density of under-story plants. On the one hand, herb species richness increasingly improved with an increasing thinning intensity and it was significantly higher than that of other treatment at 62% thinning

**基金项目:**新疆阿尔泰山天然林保护局布尔津分局项目,天然林保护关键技术研究(森林抚育间伐技术试验研究)(E1400120)

**收稿日期:**2021-11-15; **网络出版日期:**2022-07-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuhl@ms.xjb.ac.cn

intensity. The species richness of shrub increased first and then decreased with increasing thinning intensity, which reached the highest with 55% thinning intensity layer, but the different thinning intensities had no significant effect on the shrub layer species richness. On the other hand, Simpson index, Shannon-Wiener index and Pielou evenness index, the thinning intensity value of each undergrowth vegetation layers reached the highest when with 55% thinning layers, while the different thinning intensities had no significant effects among the shrub layers in terms of Margalef richness index, Species richness index, Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou index and herb layer in terms of Species richness index, Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou index with different thinning intensities treatment ( $P > 0.05$ ). The dominant species in herb layer was *Poa nemoralis* L., which is similar with those among 4 different thinning intensities. (2) Appropriate increase of thinning intensity significantly promoted the density of shrub and herb layer under forest, and the result shows that 55% thinning intensity layer was the best ( $P < 0.05$ ). The shrub and herb layer coverage was increased first and then decreased with increasing thinning intensity, the increase of thinning intensity had obviously change on the coverage of shrub layer, while it had no significant effect on herb layer coverage ( $P > 0.05$ ). In conclusion, from the perspective of restoring forest land diversity and forest ecosystem stability, 55% thinning intensity is more reasonable than others.

**Key Words:** thinning intensity; vegetation diversity; Altai Mountain; forest regeneration

新疆阿尔泰山的森林是我国西伯利亚南泰加林生态系统的代表<sup>[1]</sup>,作为我国重要的天然林林区之一,阿尔泰山具有独特的生物多样性<sup>[2]</sup>。林下植被包括林下灌木和草本,是森林生态系统的重要组成部分<sup>[3]</sup>,一方面,林下植被可以增加生物多样性,形成群落结构,维持生态系统的稳定性。另一方面,林下植被的发育可以提高林下枯落物的分解速率,对养分循环起到关键作用<sup>[4-7]</sup>。抚育间伐作为重要的一项森林经营措施,可以通过调整林分组成结构,降低林分密度,改善林内光照和养分条件<sup>[8-11]</sup>,从而对林木生长发育和分布产生重要影响,提高林下植被的物种多样性,进而提高森林生态系统的稳定性。

国内外有关间伐对林下植被影响的研究有很多,包括对油松(*Pinus tabulaeformis*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等树种的研究,研究结果均表明抚育间伐后林下植被的种类、多样性、盖度及生物量显著增加<sup>[12-16]</sup>,也有研究表明,多样性指数随着间伐强度的增加呈现先增后降的趋势<sup>[17]</sup>。目前有关阿尔泰山植物多样性的研究主要集中在不同海拔梯度的变化<sup>[18]</sup>,而对于间伐对林下植被影响的研究还尚未见报道。因此,本研究以阿尔泰山中部落叶松阔混交林为研究对象,探讨分析不同间伐强度对林下植被的影响,揭示抚育间伐后林下植被的物种组成、林下植被结构、物种多样性的变化规律,以为阿尔泰山天然林的科学抚育和经营管理提供理论依据。

## 1 研究区概况

试验地位于阿尔泰山中部,该地区属于北温带大陆性寒冷气候区,气候特点是夏季干热,冬季严寒,昼夜温差大,光照充足,降水量小,蒸发量大,全年多季风,降雪多于降雨,且积雪时间随高度增加而延长,中高山积雪长达6—8个月,低山积雪5—6个月<sup>[19]</sup>,年平均气温 $-2—3$  °C<sup>[20]</sup>。林区土壤类型以山地栗钙土和山地灰色森林土为主,土层厚度为29—69 cm。林区主要乔木树种有西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、西伯利亚冷杉(*Abies sibirica*),同时伴生有西伯利亚云杉(*Picea obovata*)、西伯利亚红松(*Pinus sibirica*)、疣枝桦(*Betula pendula*)等;林下灌木植物主要有金丝桃叶绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、黑茶藨子(*Ribes nigrum*)、圆叶桦(*Betula rotundifolia*)、多刺蔷薇(*Rosa spinosissima*)等;草本植物主要有林地早熟禾(*Poa nemoralis*)、圆叶鹿蹄草(*Pyrorla rotundifolia*)、阿尔泰羽衣草(*Alchemilla pinguis*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调查

试验林地选择在天然林保护工程实施以前的 80 年代的采伐迹地,主要以成熟落叶松为采伐对象,保留云杉、冷杉树种。于 2021 年 8 月—10 月,在阿尔泰山选择有代表性的不同采伐强度的林地设置样地进行调查。利用样地内保留的伐桩,结合树木测龄,将样地内林龄小于 30 a(从间伐开始到现在)的林木剔除,以复原间伐之前的林木株数,并按照伐桩占当年样地内林木株数的比率划分为 19%、33%、55%、62% 4 个等级,可视为 4 个间伐强度。为了保证调查的准确性,尽可能选择地形、土壤等环境条件相似的研究样地(表 1),样地大小为 20 m×20 m,每个处理设置 3 个重复。在每块样地中采用相邻网格法将其划分为 4 个 10 m×10 m 的乔木样方,沿对角线设置 3 个 5 m×5 m 的灌木样方,同时每个灌木样方内各设置 1 个 1 m×1 m 的草本样方。记录乔木层 DBH≥5 cm 的个体树高、胸径、冠幅和枝下高;灌木(包括高度小于 3 m 的乔木)和草本的种类、株数、高度和盖度,同时记录样地的基本信息,如坡度、坡向、海拔、郁闭度等。

表 1 样地基本概况

Table 1 General situation of sample plots

间伐强度 Thinning intensity/%	伐桩数量 Number of stumps	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height /m	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope direction	郁闭度 Canopy	复原林分密度 Pre cutting stand density/ (株/hm <sup>2</sup> )	现有林分密度 Existing stand density/ (株/hm <sup>2</sup> )
19	14±9	19.9±1.56	10.4±1.31	1962	22	西北	0.91	1550	1575
33	15±8	18.7±3.57	13.4±1.12	1860	20	北	0.82	1600	1025
55	64±8	19.6±4.48	10.7±1.41	1983	18	北	0.7	1008	975
62	27±7	31.9±2.75	17±2.73	2002	20	西北	0.41	1075	625

### 2.2 植物多样性的测定

本研究采用 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数对林下物种多样性进行评价<sup>[21]</sup>。各指数公式如下:

$$\text{Margalef 物种丰富度为: } M = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (2)$$

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

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J_{sw} = H' / \ln S \quad (4)$$

式中, $P_i$ 为物种  $i$  的个体数  $N_i$  占个体总数  $N$  的比例; $S$  为样方中出现的物种数, $N$  为样方中所有物种个体总数。

$$\text{灌草植物的重要值(IV): } IV = (RA + RF + RS) / 3 \quad (5)$$

式中, $RA$  为相对密度; $RF$  为相对频度; $RS$  为相对盖度。

相对多度 = (种  $i$  的株数/所有种的总株数) × 100%; 相对频度 = (种  $i$  在总样方中出现的次数/所有种出现的总次数) × 100%<sup>[22]</sup>

为了方便统计分析,本研究对所有计算得到的重要值均乘以 100<sup>[23]</sup>。

### 2.3 数据处理与分析

所有数据采用 Excel 2019 进行整理和初步计算,在 SPSS 25 软件中进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验不同间伐强度下物种多样性的差异显著性,采用 Origin 2018 作图。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同间伐强度林下物种组成及重要值

不同物种所适应的生存环境有所不同,间伐等人为干扰对林下环境的改变会引起构成群落的物种发生变化<sup>[24]</sup>。在所调查的 12 个样地中,共发现灌草植物 31 种,隶属于 24 科 30 属,其中草本植物 17 科 26 属 26 种,木本植物 4 科 5 属 5 种,在所调查的 31 种植物中,禾本科最多,占总物种数的 55.4%,其次是蔷薇科、忍冬科的植物,分别占总物种数的 13% 和 10.5%(表 2)。各间伐强度林下草本层重要值排在第一位的均是林地早熟禾,灌木层各间伐强度的优势种组成较为复杂,在 19%、33% 间伐强度为金丝桃叶绣线菊,55% 间伐强度为阿尔泰忍冬,62% 间伐强度为西伯利亚刺柏(*Juniperus sibirica*)。随着间伐强度的增大,林下透光率增加,出现一些适应新环境的物种,如北极花(*Linnaea borealis*)、阿尔泰蒲公英(*Taraxacum altaicum*)、卷茎蓼(*Fallopia convolvulus*)等耐阴植物逐渐衰退,而一些喜温热环境的植物如阿尔泰羽衣草、白花老鹳草(*Geranium albiflorum*)、白喉乌头、青蒿(*Artemisia carvifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、西伯利亚刺柏逐渐增加。

表 2 不同间伐强度林下植物种类及重要值

Table 2 Understory herb layer species and its important value with different thinning intensities

物种名称 Species name	不同间伐强度下的重要值(IV) Important value in different thinning intensities			
	19%	33%	55%	62%
草本层 The herb layer				
林地早熟禾 <i>Poa nemoralis</i>	59.9	61.9	77.7	75.3
达乌里卷耳 <i>Cerastium dahuricum</i>	16.3	20.1	39.8	13.8
白花老鹳草 <i>Geranium albiflorum</i>	12.7	5.6	22.9	21.3
白喉乌头 <i>Aconitum leucostomum</i>	1.8	12.5	36.2	19.4
石生堇菜 <i>Viola rupestris</i>	18.8	0.7	7.3	
北极花 <i>Linnaea borealis</i>	17.5	20.3		
阿尔泰蒲公英 <i>Taraxacum altaicum</i>	1.7	1.3		
卷茎蓼 <i>Fallopia convolvulus</i>	2.4	1.6		0.5
石生悬钩子 <i>Rubus saxatilis</i>	7.3	8.9		7.4
阿尔泰羽衣草 <i>Alchemilla pinguis</i>	2.2		5.5	26.3
青蒿 <i>Artemisia carvifolia</i>	9.3		10.6	17.3
厚叶岩白菜 <i>Bergenia crassifolia</i>	4.1			6.9
单侧花 <i>Orthilia secunda</i>	3.4			22.8
多裂委陵菜 <i>Otentilla multifida</i>	1.7	18.1		47.5
蝶须 <i>Antennaria dioica</i>	8.1			
亚欧唐松草 <i>Thalictrum minus</i>	1.2			1.8
新疆黄精 <i>Polygonatum roseum</i>		7.1	9.1	1.3
大苞点地梅 <i>Androsace maxima</i>		7.4		6.9
野草莓 <i>Fragaria vesca</i>		8.9		
圆叶鹿蹄草 <i>Pyrrola rotundifolia</i>			35.2	
红果越桔 <i>Vaccinium koreanum Nakai</i>			11.5	
欧亚多足蕨 <i>Polypodium vulgare</i>			5.2	
新疆野豌豆 <i>Vicia costata</i>			11.8	
母菊 <i>Matricaria chamomilla</i>			3	1.7
地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>			1.1	5.4
新疆缬草 <i>Valeriana fedtschenkoi</i>				10.7
灌木层 The shrub layer				
金丝桃叶绣线菊 <i>Spiraea hypericifolia</i>	22.8	11.9	5.2	12.4
西伯利亚刺柏 <i>Juniperus sibirica</i>	18.9	8		19.6
刺蔷薇 <i>Rosa acicularis</i>	0.5			
圆叶桦 <i>Betula rotundifolia</i>			26	
阿尔泰忍冬 <i>Lonicera caerulea</i>			38.6	

### 3.2 不同间伐强度林下植物多样性

不同间伐强度林下植物种类、数量发生的变化如图 1 所示,林下灌木和草本层丰富度指数均表现为间伐强度 62% > 55% > 33% > 19%, 方差分析结果显示,草本层物种丰富度指数在 62% 间伐强度时为 2.169, 显著大于其他强度 ( $P < 0.05$ ), 分别是各间伐强度的 1.8 倍、2.2 倍和 2.3 倍, 灌木层物种丰富度指数随间伐强度的增大先增大后减小, 但各间伐强度之间不具有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 其值随着间伐强度的增大依次为 0.57、0.67、0.688、0.543。间伐以后林下灌木和草本植被的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数分布较为一致, 即随间伐强度的增大先增加后减小, 且均在 55% 间伐强度时达到转折点, 方差分析结果表明各间伐强度之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 相比较灌木植物, 草本层多样性指数变化幅度更大, 这可能是由于草本植物种类多、生长周期短, 对环境的变化较敏感。

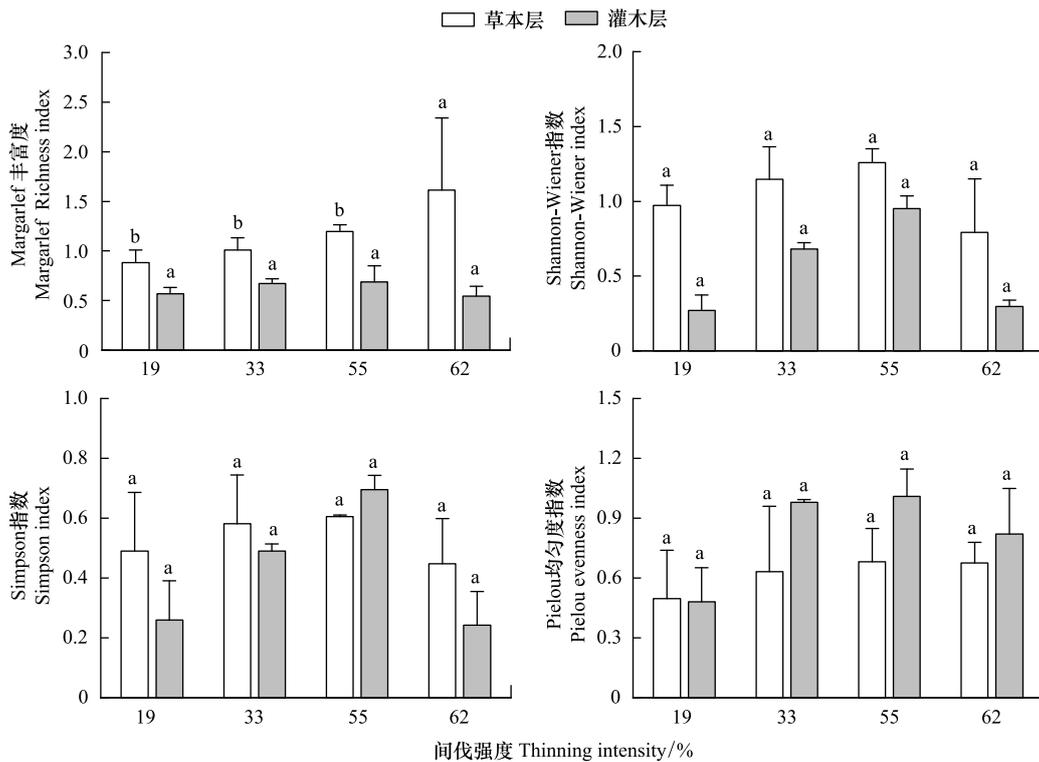


图 1 不同间伐强度林下物种多样性指数

Fig.1 Species diversity index of herbs and shrubs with different thinning intensities

图中不同小写字母表示不同间伐强度之间差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 3.3 不同间伐强度林下植被结构变化

#### 3.3.1 不同间伐强度林下植被盖度状况

不同间伐强度林下灌木和草本植被的盖度具有相同的变化趋势, 即随着间伐强度的增大均表现为先增大后减小的趋势 (图 2), 林下草本植被的盖度随间伐强度的增大其值为 47.9%、51.2%、84.1%、57.9%, 方差分析结果表明各间伐强度之间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 灌木层植被盖度 55% 间伐强度显著大于其他各间伐强度 ( $P < 0.05$ ), 在 55% 间伐强度下灌木本植被的盖度为 74.6%, 分别是 19%、33%、62% 间伐强度的 9.75 倍、3.39 倍、2.74 倍。

#### 3.3.2 不同间伐强度林下植被密度状况

将不同间伐强度林下草本植物的密度 (图 3) 和灌木植被的密度 (图 4) 按照高度划分为 4 个等级, 林下草本层不同间伐强度各高度级植被的总密度分别为 6.1、36.3、107.8、77.5 万株/hm<sup>2</sup>。在 55% 间伐强度林下物种的总密度显著大于其他强度 ( $P < 0.05$ ); 同时在 55% 间伐强度林下草本出现了高度 > 40 cm 的物种, 植被分布

范围扩大,垂直结构明显。灌木层植被的总密度 55% 间伐强度下达到最大为 1061.7 株/hm<sup>2</sup>, 分别是 19%、33%、62% 间伐强度的 9.1 倍、5.4 倍和 9.7 倍,且不同间伐强度之间存在显著差异( $P < 0.05$ )。55% 间伐强度林下灌木植被存在高度 >80 cm 的物种,植被垂直结构明显。

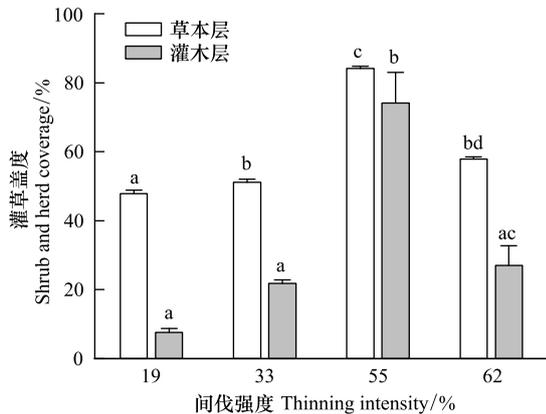


图2 不同间伐强度林下灌木的盖度

Fig. 2 Coverage of understory herb and shrub in different thinning intensities

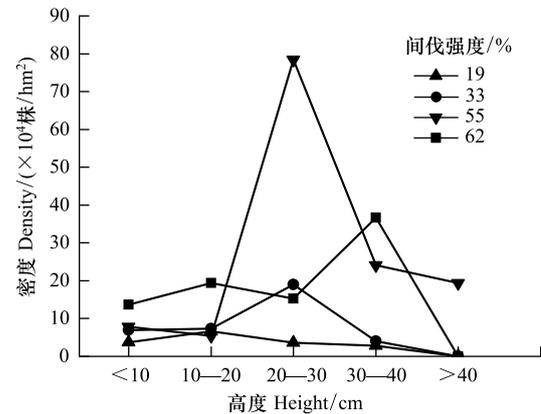


图3 不同间伐强度林下草本的密度变化

Fig. 3 Density of herb with different thinning intensities

## 4 讨论

### 4.1 抚育间伐对林下物种组成的影响

重要值作为一个综合数量指标,可以体现物种在群落中的地位,也能反映种群中的优势物种组成<sup>[24]</sup>。本研究中,虽然 33% 和 62% 间伐强度的样地海拔高度有所差异,林下草本植被优势种均为林地早熟禾,可见海拔并不是主要影响因素,灌木层各间伐强度优势物种组成较丰富,这可能是因为灌木相较于草本生长周期更长,各适宜物种均能得到充分发展,也有可能是海拔高度的影响结果。林分密度是林下植被多样性的重要影响因素<sup>[25]</sup>,间伐以后林分密度迅速降低,林内空间增大,光照条件得到改善,林下草本、灌木植物的种类发生变化。一方面,林下灌木植物的竞争导致了在不同间伐强度之间物种发生变化,这与张洋洋等<sup>[6]</sup>研究林分密度对马尾松林下植被多样性影响的结果相同。另一方面,间伐改变了林下光照条件,喜光植物逐渐增多,如在 19% 间伐强度下耐阴物种北极花占绝对优势,而随着间伐强度的增大,喜光物种白花老鹳草、青蒿等逐渐增多,在 62% 间伐强度下阿尔泰羽衣草等喜光植物占据主导地位,成为优势物种。这与王祖华等<sup>[26]</sup>研究红松人工林下植被多样性得出的结论相似,不同间伐强度的植物重要值不同可能是由于不同的植物生长发育对于光照、养分等的需求不同,间伐有利于喜光物种的生长,而不利于喜阴的植物生长。

### 4.2 抚育间伐对林下植物多样性的影响

间伐作为森林经营管理的重要措施之一,不仅可以降低林分密度,调节森林内部环境,改善森林结构<sup>[27]</sup>,同时可以促进林木生长,对生物多样性起到重要作用<sup>[23]</sup>,大多数研究表明间伐可以提高林下植被的多样性<sup>[13, 28-29]</sup>,本研究得出间伐可以提高林下草本和灌木植被的多样性,但是各间伐强度之间无显著差异,这与

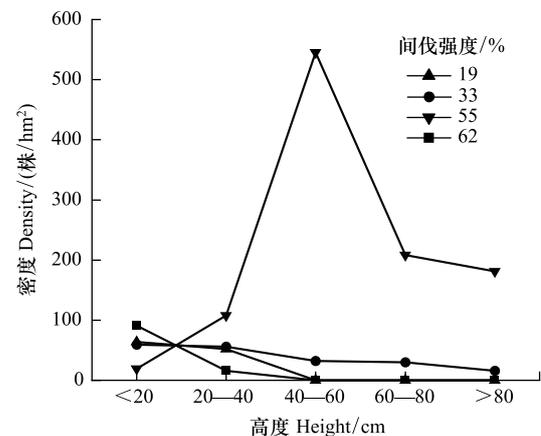


图4 不同间伐强度林下灌木的密度变化

Fig. 4 Density of shrub with different thinning intensities

前人的研究结果有很多相似之处<sup>[30-32]</sup>,究其原因可能是间伐年限较长,林分郁闭度等多种因素影响的结果,孙千惠<sup>[33]</sup>等发现林下草本层物种丰富度随着间伐强度的增大而增加,本文也得出相同的结论,主要是由于间伐降低了林分密度,减小了灌草植被的竞争压力,林下微环境得到改善,促进了草本植物生长发育,因此丰富度有所增加。也有研究表明弱度间伐和中度间伐可以增加林下植被多样性,而强度间伐则降低林下植被多样性<sup>[34]</sup>,这是由于在高强度的间伐条件下,林分郁闭度过低,林内微环境较为均匀,适宜新环境的喜光物种入侵并占据了其他物种的生存空间,抑制了其生长发育<sup>[35]</sup>,植物多样性降低,同时林内环境异质性增加,造成均匀度指数减小<sup>[22]</sup>,这与本文研究结果相同。刘思泽等<sup>[17]</sup>在研究马尾松人工林间伐初期林下植被群落物种组成和多样性时提出灌木层物种丰富度高的梯度相对于草本植物具有一定的滞后性,本研究也得出相似的结果,这是由于灌木植物对生长空间要求更高,间伐强度大的林地内环境更空旷,灌木植被能够更好的生长。

#### 4.3 抚育间伐对林下植被结构的影响

有关抚育间伐对林下植被密度和盖度的影响研究表明,抚育方式和强度对植物的密度和盖度具有显著影响,一般情况下间伐强度越大,植物的密度和盖度也越大<sup>[32]</sup>。于立忠等<sup>[4]</sup>研究发现林下植物盖度随着间伐强度的增加而增大,秦燕燕等研究表明不同间伐强度林下植物高度显著高于对照<sup>[36]</sup>,由于间伐改变了林下土壤环境,使得林下植物迅速更新,林下植被密度和盖度增加<sup>[37]</sup>,本研究中,林下灌草植物的盖度和密度均随间伐强度的增大先增加后减少,这与前人的研究结果略有不同,62%间伐强度林下植被的密度和盖度之所以会降低,这可能是随着间伐强度的进一步增大,林下裸露的空间扩大,喜光物种大量繁衍,耐阴植物减少,植物总盖度会下降。

## 5 结论

通过对阿尔泰山针阔混交林不同间伐强度林下植物多样性的调查研究,可以得出如下结论:

(1) 间伐改变了林下物种组成,草本层和灌木层植物种类增加,随着间伐强度的增大,林下灌木层和草本层植物中喜光物种逐渐增多并取代耐阴物种成为优势种。间伐提高了林下植被的多样性,灌木层物种多样性随间伐强度的增大先增大后减小,但各间伐强度之间差异不显著。

(2) 间伐提高了林下植被的结构,灌木及草本植物的盖度随着间伐强度的增大呈现先增后减的趋势,且55%间伐强度与其他各处理之间存在显著差异。不同高度级林下植被的密度在不同间伐强度下差异显著,55%间伐强度林下植被垂直结构明显。

#### 参考文献 (References):

- [1] 邹卓颖,潘存德,李贵华,余戈壁,张帆,刘博,郭珂. 喀纳斯泰加林火成演替群落多样性及其测度指标. 新疆农业科学, 2019, 56(5): 785-796.
- [2] 白志强,李缓,王文栋,刘端,韩燕梁,刘华. 阿尔泰山优势树种的生物量模型构建及其生物量分配特征. 林业资源管理, 2018, (4): 34-40.
- [3] 井学辉,曹磊,臧润国. 阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律. 生态学报, 2013, 33(9): 2886-2895.
- [4] 于立忠,朱教君,孔祥文,胡万良,谭学仁. 人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响. 生态学报, 2006, 26(11): 3757-3764.
- [5] 龚固堂,牛牧,慕长龙,陈俊华,黎燕琼,朱志芳,郑绍伟. 间伐强度对柏木人工林生长及林下植物的影响. 林业科学, 2015, 51(4): 8-15.
- [6] 张洋洋,周清慧,许骄阳,陈继豪,魏鸣,何伟,王鹏程,晏召贵. 林分密度对马尾松林下植物与土壤种子库多样性的影响. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2355-2362.
- [7] Lee S H, Kim S, Kim H J. Effects of thinning intensity on understory vegetation in *Chamaecyparis obtusa* stands in South Korea. Forest Science and Technology, 2018, 14(1): 7-15.
- [8] 张贾宇,余婷,鄂晓伟,唐罗忠,田野. 杨树人工林幼林阶段林下植被管理对土壤微生物生物量碳、氮酶活性的影响. 生态学报, 2021, 41(24): 9898-9909.
- [9] 刘红炎,陈东莉,柳杰,赵宇,张芸香,郭晋平. 华北落叶松人工林不同间伐水平下林下植物多样性研究——以山西关帝山龙兴林场为

- 例. 林业资源管理, 2017, (1): 50-56.
- [10] 姜俊, 刘宪钊, 贾宏炎, 明安刚, 陈贝贝, 陆元昌. 杉木人工林近自然化改造对林下植被多样性和土壤理化性质的影响. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 170-177.
- [11] 马双娇, 王庆成, 崔东海, 朱凯月, 张勇, 徐立清, 胡建文. 抚育间伐对水曲柳天然林群落结构及植物多样性的影响. 东北林业大学学报, 2019, 47(2): 1-7.
- [12] 赵苏亚, 王瑞辉, 刘凯利, 董凯丽, 龚映匀, 张斌, 周钰淮. 抚育间伐对不同年龄杉木人工林生长及林下植被多样性的影响. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(12): 34-43, 82-82.
- [13] 董凯丽, 张国湘, 王瑞辉, 刘凯丽, 赵苏亚, 龚映匀. 抚育间伐对湿地松人工林生长及林下植被多样性的影响. 林业资源管理, 2019, (4): 59-68.
- [14] Willms J, Bartszevige A, Schwilk D W, Kennedy P L. The effects of thinning and burning on understory vegetation in North America: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2017, 392: 184-194.
- [15] 段劫, 马履一, 贾黎明, 贾忠奎, 公宁宁, 车文瑞. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响. 生态学报, 2010, 30(6): 1431-1441.
- [16] 王丽娟, 王孝安, 原志坚, 韩兵兵, 李静. 抚育对黄土高原人工油松林林下植被的影响. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1301-1309.
- [17] 刘思泽, 尹海锋, 沈逸, 康文斯, 罗艳, 范川, 李贤伟. 间伐强度对马尾松人工林间伐初期林下植被群落物种组成和多样性的影响. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2866-2874.
- [18] 井学辉, 臧润国, 丁易, 张炜银, 张新平, 白志强, 郭仲军. 新疆阿尔泰山小东沟北坡植物多样性沿海拔梯度分布格局. 林业科学, 2010, 46(1): 23-28.
- [19] 张帆, 刘华, 方岳, 白志强, 叶高, 韩燕梁. 新疆阿尔泰山地天然针叶林林分空间结构特征. 安徽农业大学学报, 2014, 41(4): 629-635.
- [20] 周鹏, 黄建国, 梁寒雪, 黎敬业. 不同海拔温度和降水对新疆阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的影响. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(6): 623-632.
- [21] 温晶, 张秋良, 李嘉悦, 魏玉龙. 间伐强度对兴安落叶松林林下植被多样性及生物量的影响. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 95-100, 118-118.
- [22] 陈丝露, 赵敏, 李贤伟, 范川, 肖宝茹. 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. 生态学报, 2018, 38(1): 143-155.
- [23] 李萌, 陈永康, 徐浩成, 尤业明, 温远光, 朱宏光, 蔡道雄, 黄雪蔓. 不同间伐强度对南亚热带杉木人工林林下植物功能群的影响. 生态学报, 2020, 40(14): 4985-4993.
- [24] Dang P, Gao Y, Liu J L, Yu S C, Zhao Z. Effects of thinning intensity on understory vegetation and soil microbial communities of a mature Chinese pine plantation in the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 171-180.
- [25] 舒韦维, 卢立华, 李华, 农友, 何日明, 陈海, 黄彪. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [26] 王祖华, 李瑞霞, 王晓杰, 关庆伟. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2778-2782.
- [27] 董莉莉, 张慧东, 毛沂新, 魏文俊, 王睿照, 颜廷武, 尤文忠. 间伐对红松 *Pinus koraiensis* 针阔混交林冠层结构及林下植被的影响. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2): 159-165.
- [28] 刘文, 王敏增, 兰欣, 温静, 王奇峰. 抚育间伐强度对侧柏林及林下植被生长的影响. 东北林业大学学报, 2016, 44(7): 4-7, 18-18.
- [29] 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. 生态环境学报, 2012, 21(5): 807-812.
- [30] 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. 生态学报, 2013, 33(19): 6154-6162.
- [31] Reader R J, Bricker B D. Value of selectively cut deciduous forest for understory herb conservation: An experimental assessment. *Forest Ecology and Management*, 1992, 51(4): 317-327.
- [32] 成向荣, 徐金良, 刘佳, 虞木奎. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及其营养元素现存量影响. 生态环境学报, 2014, 23(1): 30-34.
- [33] 孙千惠, 吴霞, 王媚臻, 张柳桦, 姚小兰, 齐锦秋, 郝建锋. 林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. 应用生态学报, 2018, 29(3): 732-738.
- [34] Buongiorno J, Dahir S, Lu H C, Lin C R. Tree size diversity and economic returns in uneven-aged forest stands. *Forest Science*, 1994, 40(1): 83-103.
- [35] 伏成秀, 杨济达, 张庆, 曾贞, 董云峰, 史君怡. 间伐和不同引种植物对刺槐林下群落的影响. 西南农业学报, 2021, 34(7): 1534-1539.
- [36] 秦燕燕, 蒋斌, 曹秀文, 冯宜明, 李丹春, 杨萌萌, 向梅, 陈蓉, 李波, 车宗全. 间伐强度对白龙江林区云杉人工林下植物多样性及其更新的影响. 草业科学, 2014, 31(4): 599-606.
- [37] 詹美春, 官凤英, 晏颖杰, 张美曼, 郑亚雄. 带状采伐对毛竹林林下植被物种多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(12): 4169-4179.