

## 不同干扰强度下林分空间结构对灌草层物种多样性的影响

马刘乐,张梦弢\*

(山西农业大学 林学院森林资源系,山西 晋中 030801)

**摘要:**为了解不同干扰强度下林分灌草层植物物种多样性的关键因子,对关帝山柴禄沟内的不同干扰下林分空间结构进行分析,在 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数的 3 个物种多样性指数的基础上,利用 Pearson 相关系数与灰色关联度分析讨论不同干扰强度下林分空间结构与灌草层物种多样性的关系。结果表明:1)混交度与林下灌木的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数呈显著性相关( $P < 0.05$ )。2)林分内的大小分化度以及分布均匀程度,对 3 种林分灌木物种多样性的影响最大;林分内的分布均匀程度对 3 种林分草本物种多样性的影响最大。因此,在对柴禄沟林分的管理中,应培育针阔混交林,运用择伐、间伐调控林分内空间格局,适当砍伐大径阶林木,调整林分空间结构,为该地区灌草层植物物种多样性的增加提供一定的理论基础和参考依据。

**关键词:**植物物种多样性;林分空间结构;Pearson 相关系数;灰色关联度分析

**中图分类号:**S758.53

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)03-0063-07

### Effects of Stand Spatial Structure on Species Diversity in Shrub Grass Layer Under Different Disturbance Intensities

MA Liu-le, ZHANG Meng-tao\*

(College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to understand the key factors of plant species diversity in shrub-grass layer under different disturbance intensities, the spatial structure of the forest under different disturbance intensities in the Chailu Gully of Guandi Mountain was analyzed. Based on the three species diversity indexes (Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index), the relationship between stand spatial structure and shrub-grass layer species diversity under different disturbance intensities was discussed by using Pearson correlation coefficient and grey correlation analysis. The results showed that 1) there was a significant correlation between the mixing degree and the Shannon Wiener diversity index of understory shrubs and the Margalef richness index ( $P < 0.05$ ). 2) The degree of size differentiation and distribution uniformity in the stand had the greatest impact on the shrub species diversity of the three stands. The distribution uniformity in the stand had the greatest impact on the diversity of herbaceous species in the three stands. Therefore, in the management of the forest stand in Chailugou Gully, we can cultivate coniferous and broad-leaved mixed forest, use selective cutting and thinning to regulate the spatial pattern in the forest stand, and appropriately cut down large-diameter trees to adjust the spatial structure of the forest stand, so as to provide a certain theoretical basis and reference basis for the increase of plant species diversity in shrub and grass layer in this area.

收稿日期:2022-04-07 修回日期:2022-06-21

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(31901308)。

第一作者:马刘乐。研究方向:森林经营学。E-mail:1014351923@qq.com

\*通信作者:张梦弢,副教授,博士。研究方向:森林可持续发展。E-mail:zmt0411@163.com

**Key words:** plant species diversity; stand spatial structure; Pearson correlation coefficient; Grey correlation analysis

林下植物在维持森林的生物多样性、养分循环、能量流动以及其他森林生态系统服务等方面都发挥着不可替代的作用,直接影响到森林生态环境的结构稳定性和功能复杂性<sup>[1-2]</sup>。灌草层植物物种多样性作为森林生态系统的一环,不仅在乔木层幼苗更新、调节气候和维持碳平衡等方面发挥着重要的生态功能<sup>[3]</sup>,还制约着营养物质循环、生境异质性等诸多生态过程<sup>[4]</sup>。干扰作为自然生态系统演替过程中的一部分,与森林林下物种多样性之间的关系非常紧密<sup>[5]</sup>。不同强度的干扰会使森林内树种组成结构以及群落内物种或不同物种间关系发生变化,从而导致林分空间结构出现差异性。林分空间结构决定了森林多功能的发挥,是对林分发展过程的综合反映<sup>[6-7]</sup>。有学者发现林分空间结构与林下物种的多样性密切相关,不同的林分空间结构对林下光照、土壤质地、凋落物与林下小气候的差异性有着直接影响,进而影响着林下物种的生长、繁殖和死亡以及林下物种多样性<sup>[8]</sup>。

近年来,众多学者研究了林分空间结构对林下植物物种多样性的影响。如刘丽等<sup>[9]</sup>运用灰色关联法研究了金沟岭林场云冷杉混交林不同择伐强度林分空间结构和林下灌木物种多样性的关系;毛燕等<sup>[10]</sup>探究了不同密度柏木人工林林分空间结构与林下植物物种多样性的关系;张亚昊等<sup>[11]</sup>则研究了不同演替下马尾松人工林林分空间结构与物种多样性的变化规律;边更战等<sup>[12]</sup>以栎类天然次生林为研究对象,分析林分空间结构中影响灌木物种多样性的关键因子;陶观护等<sup>[13]</sup>则以不同密度油松飞播林为对象,研究灌草层物种多样性与林分空间结构的关系。综合来看,现阶段针对林分空间结构与林下物种多样性的研究已较多,但是对于不同干扰强度下林分空间结构所展现出的林下物种多样性的研究则相对较少。

基于此,本研究对关帝山柴禄沟内云杉(*Picea asperata*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)混交林进行干扰强度划分,详细计算林地的林分空间结构以及林下灌草层植物物种多样性指数的大小,分析不同干扰强度下林分空间结构及灌草层植物物种多样性的变化关系,解决不同干扰下空间分布格局对物种多样性的影响以及灌草层植物物种多样性对林分空间格局机制的反应和解释,为该地区保护并增加林下植物物种多样性提供合理的林分空间调整措施,提升林区的森林生态系统功能。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于山西省吕梁市交城县里的关帝山柴禄沟内(37.33°—38.33°N,110.30°—111.30°E),属于暖温带大陆性季风气候区的山地气候。其土壤类型呈垂直分布带,从低到高依次为:黄绵土、山地褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤和亚高山草甸土。主要岩石由石英岩、花岗岩、角闪岩和片麻岩等组成,具备透水性能小、抗腐蚀能力强等特点<sup>[14]</sup>。其内植被种类丰富,立地条件优越,植被覆盖率高达95%。地区内植被群落垂直分布显著,从低到高森林分布带类型依次为:针阔叶混交林带、亚高山灌丛草甸带、寒温性针叶林带<sup>[15]</sup>,群落分层明显,云杉次生天然林是山内优势森林植被类型。

### 1.2 样地设置与调查

2021年5月前往柴禄沟,在对云杉和落叶松的混交林全面调查基础上设置3块1 hm<sup>2</sup>标准地,利用相对影响法在关帝山柴禄沟林场内,按照不同郁闭度、不同林分平均密度和伐桩数量3个调查因子,计算每个因子的相对值,将林地分为轻度干扰、中度干扰、重度干扰3级<sup>[16]</sup>。例如,重度干扰样地的郁闭度最小,为0.63,设其相对值为1,则轻度干扰和中度干扰样地的郁闭度相对值为1.23(0.78/0.63)、1.12(0.71/0.63)。计算结果见表1。之后,在不同干扰样地内的四角以及中心分别设置5块30 m×30 m的乔木样地,记录样地的坡度、坡向、经纬度、海拔、郁闭度等基本样地信息(表2)。在每个乔木样地中测量样地内胸径大于5 cm的全部单木,记录每个乔木的种类、胸径、树高和地理坐标等因子;于每个乔木样方的四角以及中心位置设置5块5 m×5 m的灌木样方,并记录每个灌木植物的种类、数量、高度、覆盖度等;再于每个灌木样方的中心位置设置一块1 m×1 m的草本样方,记录每个草本植物的种类、数量、盖度等。

表1 干扰程度划分

Table 1 Division of interference degree

样地	相对郁闭度	相对林分平均密度	相对伐桩密度	总和	干扰强度
1	1.23	2.38	1.00	4.61	a
2	1.12	1.36	3.83	6.31	b
3	1.00	1.00	11.67	13.67	c

### 1.3 林分空间结构与格局指标计算

林分空间结构采用混交度(M)、角尺度(W)、大

小比数( $U$ )、开敞度( $B$ ) 4 个空间结构指数计算,取各自平均值进行分析,用丛生指数辅助角尺度进行林分空间格局分析,计算公式见表 3。惠刚盈等<sup>[17]</sup>在研究林分空间结构指数的计算中,提出最近邻木取值为 4 时,可满足林分空间结构分析的需求。

1.4 物种多样性指标计算

在分析林分下灌木和草本的物种多样性时采用重要值、Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数等来进行分析,计算公式如下。

表 2 样地基本信息特征

Table 2 Basic information characteristics of the sample sites

干扰程度	样地	乔木个数	坡度 /(°)	坡向 /(°)	海拔/m	郁闭度	断面积 /(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 /cm	密度 /(株·hm <sup>-2</sup> )	伐桩数 /株
轻度干扰	1 号样地	100	26	西 290	2 322	0.78	48.21	23.51	1 111.11	0
	2 号样地	71	21	西北 297	2 358	0.76	26.19	20.56	788.89	1
	3 号样地	105	20	西北 314	2 340	0.80	29.75	18.02	1 166.67	2
	4 号样地	132	17	西南 245	2 365	0.79	38.96	18.39	1 466.67	3
	5 号样地	89	20	西南 240	2 331	0.76	21.69	16.71	988.89	0
中度干扰	6 号样地	28	19	西 265	2 128	0.68	18.87	27.79	311.11	6
	7 号样地	41	23	西南 243	2 145	0.69	16.48	21.46	455.56	0
	8 号样地	54	23	西 271	2 136	0.72	35.46	27.43	600	11
	9 号样地	94	26	西 281	2 176	0.74	42.31	22.71	1 055.56	4
	10 号样地	66	24	西北 304	2 142	0.70	31.46	23.37	733.33	2
重度干扰	11 号样地	44	20	西北 334	1 991	0.57	25.56	25.80	488.89	18
	12 号样地	51	21	北 341	2 030	0.69	27.53	24.87	566.67	15
	13 号样地	30	25	西北 324	2 017	0.63	18.33	26.46	333.33	6
	14 号样地	48	21	西北 334	2 024	0.63	24.71	24.29	533.33	24
	15 号样地	36	16	西北 330	1 990	0.64	17.04	23.29	400	7

表 3 林分空间结构与格局计算公式

Table 3 Calculation formulas of stand spatial structure and pattern

名称	公式		
混交度	$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij}$	(1)	当参照树 $i$ 与相邻木 $j$ 为同一树种时 $v_{ij}=0$ ;反之,当参照树 $i$ 与相邻木 $j$ 为不同树种时 $v_{ij}=1$ 。
角尺度	$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij}$	(2)	当参照树 $i$ 与相邻木 $j$ 形成的夹角大于等于标准角 $72^\circ$ 时 $z_{ij}=0$ ;反之, $z_{ij}=1$ 。
大小比数	$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij}$	(3)	当参照树 $i$ 比第 $j$ 棵相邻木的胸径大时 $k_i=0$ ;反之,当参照树 $i$ 比第 $j$ 棵相邻木的胸径、小时 $k_i=1$ 。
开敞度	$B_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{D_{ij}}{H_{ij}}$	(4)	$D_{ij}$ 为参照树 $i$ 到第 $j$ 棵相邻树木的间距, $H_{ij}$ 为第 $j$ 棵相邻木的高度。
丛生指数	$I = (V/\bar{X}) - 1$	(5)	$V$ 为样本方差, $\bar{X}$ 为样本的平均值。

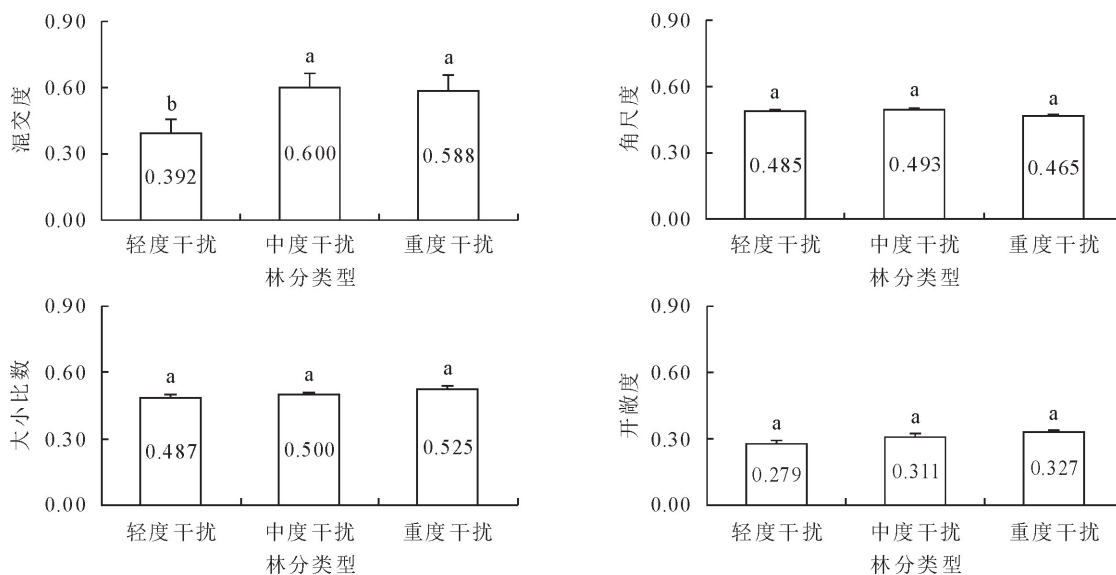
1)重要值计算  
重要值=(相对多度+相对盖度+相对频度)/  
3×100% (6)  
式中:相对多度=(某物种的个体数/群落中所有物种的个体总数)×100%  
相对盖度=(某物种的覆盖面积/群落中所有物种的覆盖总面积)×100%  
相对频度=(某物种的频度/群落中所有物种的频度总和)×100%  
2)多样性指数计算  
Shannon-Wiener 多样性指数:  $H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$  (7)  
3)均匀度指数计算

Pielou 均匀度指数:  $E = H / \ln S$  (8)  
4)丰富度指数计算  
Margalef 丰富度指数:  $D = (S - 1) / \ln N$  (9)  
上述式中:  $S$  为出现在样地内的物种个数,  $N$  为全部物种种的个体总数,  $P_i$  表示第  $i$  种植物的个体数量占全部植物种个体数量的百分比,即  $P_i = N_i / i, i = 1, 2, 3, \dots, S$ 。  
1.5 数据分析  
使用 Excel 2010 对林分非空间结构指标进行统计分析,用 Winkelmass 1.00 计算林分空间结构指数等。使用 SPSS AU 计算林分空间结构与林下物种多样性的 Pearson 相关系数分析与灰色关联度分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干扰下林分空间结构分析

根据黎芳等<sup>[18]</sup>对林分空间结构指数、类型的划分,从图 1 中可以看出 3 种林分的混交度分别为中度混交(0.392)、强度混交(0.600)和强度混交(0.588),轻度干扰林分与其余 2 种林分的混交度存在显著性差异。轻度干扰、中度干扰、重度干扰林分



注:图中字母相同表示二者无显著性差异,字母不同表示二者存在显著性差异。下同。

图 1 不同干扰下林分空间结构分析

Fig. 1 Analysis of stand spatial structure under different disturbance intensities

用丛生指数来配合角尺度分析不同干扰林分的空间格局(表 4),轻度干扰林分的空间格局为随机分布;中度干扰林分的空间格局为随机分布偏均匀分布;重度干扰林分的空间格局为均匀分布偏随机分布。

表 4 不同干扰林分空间格局指数计算

Table 4 Calculation of spatial pattern index of the stands with different disturbance intensities

空间格局指数	轻度干扰	中度干扰	重度干扰
丛生指数	0.060 6	-0.243 7	-0.045 2

### 2.2 不同干扰林分下灌草层物种多样性分析

从图 2 可以看出,轻度干扰、中度干扰、重度干扰林分下灌木的多样性指数和均匀度指数分别为 0.62、1.27、1.60 和 0.39、0.70、0.82,3 种不同干扰的林分灌木多样性指数和均匀指数均表现出重度干扰>中度干扰>轻度干扰的规律,且 3 种林分的灌木物种多样性和均匀度指数存在显著性差异。中度干扰和重度干扰林分与轻度干扰林分的灌木丰富度指数存在显著性差异。

从图 3 可以看出,中度干扰林分的草本多样性

下的角尺度分别为随机分布(0.485)、随机分布(0.493)和均匀分布(0.465);大小比数数值分别为 0.487、0.500 和 0.525,分别为亚优势向中庸过渡状态,中庸状态和中庸向劣势过渡状态;开敞度数值分别为 0.279、0.311、0.327,轻度干扰林分的开敞度最低,不充足,中度干扰和重度干扰林分下的开敞度基本充足。3 种林分之间的角尺度、大小比数、开敞度无显著性差异。

指数和草本均匀度指数数值最低,轻度干扰林分其次,二者与重度干扰林分的草本多样性指数和草本均匀度指数有显著性差异。

### 2.3 空间结构指数-林下灌草层物种多样性的 Pearson 相关分析

由表 5 可知,只有混交度与林下灌木的 Shannon-Wiener 多样性指数与 Margalef 丰富度指数呈显著性相关( $P < 0.05$ ),其余指标间不存在显著关系。因此,林下灌木的多样性主要与林分混交度指数显著相关,表现为林分的混交度越大,灌木的物种多样性越复杂。而林分空间结构指数与林下草本的物种多样性之间关系均未达到显著水平。

### 2.4 不同林分空间结构与林下灌草层物种多样性的灰色关联度分析

在 3 种不同的林分类型中,林分空间结构指标与林下的灌木物种多样性的关联度的差异性见表 6。根据不同干扰林分内的空间结构指标对物种多样性影响的排序,分别赋予其相应的权重值,如排序为 1 时权重值为 0.4;排序为 2 时权重值为 0.3;排序为 3 时权重值为 0.2;排序为 4 时权重值为 0.1,并计算其相应的权重之和。由表 6 可知,依据其权



重和,轻度干扰林分内林分的角尺度和大小比数,即林分的分布均匀程度与林木大小分化度对轻度干扰林分内灌木物种多样性最具有影响;在中度干扰林分内林木大小分化度对灌木物种多样性影响最具有影响;而在重度干扰林分中,分布均匀程度主要影响着灌木物种多样性。总的来看,林分内的大小分化度以及分布均匀程度,对 3 种林分灌木物种多样性的影响最大。

在 3 种不同的林分类型中,林分空间结构指标

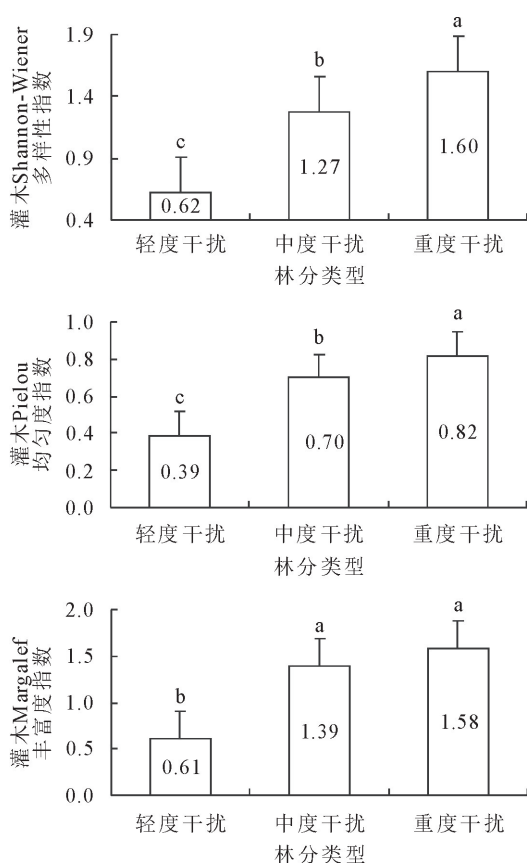


图 2 不同干扰下灌木物种多样性分析

Fig. 2 Analysis of shrub species diversity under different disturbance intensities

### 3 结论与讨论

#### 3.1 不同林分空间结构与林下灌草层物种多样性的灰色关联度分析

3 种不同干扰林分在灌木物种多样性方面上的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数都存在显著性差异,均表现为重度干扰林分>中度干扰林分>轻度干扰林分;轻度干扰林分与其他 2 种林分的 Margalef 丰富度指数存在显著性差异。在草本物种多样性方面上,重度干扰林分的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与其他 2 种林分存在显著性差异,轻度干扰林分和中度干扰林分间无差异。这与左政等<sup>[19]</sup>对不同密度下

与林下的草本物种多样性的关联度的差异性见表 7。依据其权重和,轻度干扰林分内林分的大小比数和角尺度,即林分大小分化度和林木分布均匀程度对草本物种多样性最具有影响;中度干扰林分内林分分布均匀程度和大小分化度主要影响着草本物种多样性。重度干扰林分内林分的大小分化度和林木混交程度主要影响着草本物种多样性。总的来看,林分内的分布均匀程度,对 3 种林分草本物种多样性的影响最大,其次是林分的大小分化程度。

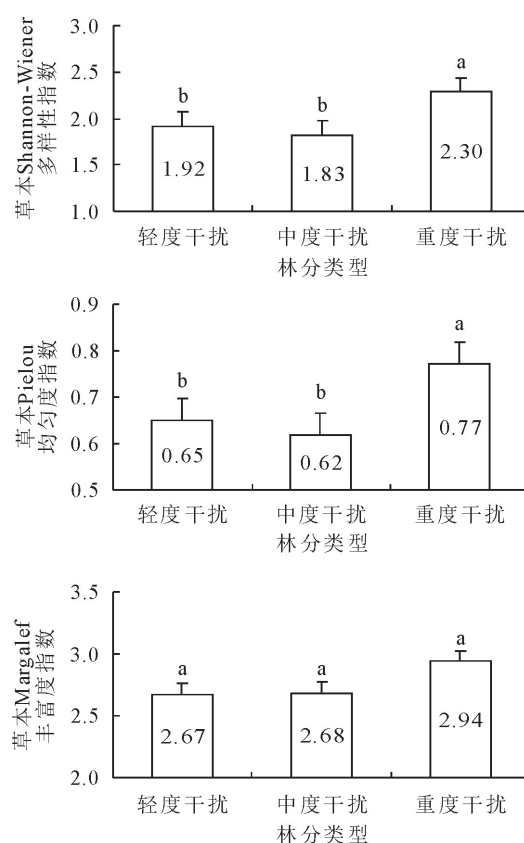


图 3 不同干扰下草本物种多样性分析

Fig. 3 Analysis of herb species diversity under different disturbance intensities

的植物多样性研究结论相似,其原因可能是随着干扰程度加大,林分密度会随之减小,林间透光率增加,为喜阳植物提供合适的环境,从而引起植物多样性增加。由 Pearson 相关系数分析结果可知,林下灌木物种多样性主要与林分混交度指数表现出正相关关系,林分混交度越大,灌木的物种多样性越复杂。这与朱光玉等<sup>[20]</sup>研究分析的结果相同,与边更战等<sup>[12]</sup>的林下灌木多样性与开敞度指数呈正相关的结论并不相同,其原因可能是因为本研究地区位于山的阴坡与半阴坡较多,光照难以透入林下,林中喜中性灌木较多有关。

在不同干扰林分空间结构与林下灌草层植物物种多样性的灰色关联方面,林分内的大小分化度以

及分布均匀程度对不同干扰林分内灌木物种多样性的影响最大,林分内的分布均匀程度对不同干扰林分内草本物种多样性的影响最大。这与毛燕等<sup>[10]</sup>研究结果相似,与陶观护等<sup>[13]</sup>和刘红民等<sup>[21]</sup>的结论不同,其原因可能是研究地区的主要树种为华北落叶松和云杉,都属于松科植物,其他类乔木占比较小,影响不如松科植物。与曹小玉等<sup>[3]</sup>研究中,除了林分混交程度,林分的分布均匀程度与大小分化程度同样对林下灌草层植物物种多样性存在显著影响的结论相同,其作用原理可能是林分内不同的水平

表 5 林分空间结构指数-林下物种多样性的 Pearson 相关分析

Table 5 Pearson correlation analysis of stand spatial structure index and understory species diversity

种类	空间结构指数	Shannon-Wiener 多样性指数		Pielou 均匀度指数		Margalef 丰富度指数	
		$D_S$	$P$	$D_P$	$P$	$D_M$	$P$
灌木	混交度	0.563	0.045	0.491	0.089	0.590	0.034
	角尺度	-0.298	0.323	-0.085	0.783	-0.279	0.357
	大小比数	0.230	0.450	0.280	0.354	0.124	0.686
	开敞度	0.215	0.480	0.077	0.802	0.202	0.508
草本	混交度	-0.164	0.593	-0.025	0.936	-0.304	0.312
	角尺度	-0.029	0.924	0.062	0.840	-0.304	0.312
	大小比数	0.062	0.839	0.127	0.678	0.031	0.919
	开敞度	-0.310	0.303	-0.207	0.497	-0.427	0.145

表 6 林分空间结构与灌木物种多样性的灰色关联度及其排序

Table 6 Correlativity and sort of the shrubby species diversity and stand spatial structure

林分类型	林分空间结构指标	Shannon-Wiener 多样性指标		Pielou 均匀度指标		Margalef 丰富度指标		权重和
		数值	排序	数值	排序	数值	排序	
轻度干扰	混交度	0.804	2	0.761	3	0.736	3	0.7
	角尺度	0.800	3	0.916	1	0.922	1	1
	大小比数	0.936	1	0.832	2	0.815	2	1
	开敞度	0.448	4	0.621	4	0.467	4	0.3
中度干扰	混交度	0.624	3	0.501	3	0.656	1	0.8
	角尺度	0.703	2	0.654	2	0.637	4	0.7
	大小比数	0.729	1	0.857	1	0.650	3	1
	开敞度	0.578	4	0.490	4	0.653	2	0.5
重度干扰	混交度	0.639	2	0.631	3	0.567	4	0.6
	角尺度	0.644	1	0.638	2	0.657	2	1
	大小比数	0.635	3	0.660	1	0.602	3	0.8
	开敞度	0.609	4	0.583	4	0.701	1	0.6

表 7 林分空间结构与草本物种多样性的灰色关联度及其排序

Table 7 Correlativity and sort of the herbaceous species diversity and stand spatial structure

林分类型	林分空间结构指标	Shannon-Wiener 多样性指标		Pielou 均匀度指标		Margalef 丰富度指标		权重和
		数值	排序	数值	排序	数值	排序	
轻度干扰	混交度	0.804	3	0.802	3	0.838	3	0.6
	角尺度	0.930	2	0.904	2	0.862	2	0.9
	大小比数	0.948	1	0.969	1	0.940	1	1.2
	开敞度	0.464	4	0.463	4	0.488	4	0.3
中度干扰	混交度	0.562	3	0.562	3	0.605	3	0.6
	角尺度	0.885	1	0.884	1	0.732	2	1.1
	大小比数	0.744	2	0.731	2	0.826	1	1
	开敞度	0.558	4	0.544	4	0.599	4	0.3
重度干扰	混交度	0.676	2	0.638	3	0.651	2	0.8
	角尺度	0.707	1	0.695	1	0.683	1	1.2
	大小比数	0.659	3	0.649	2	0.624	3	0.7
	开敞度	0.567	4	0.512	4	0.578	4	0.3

分布格局和其竞争态势,使得林内不同地区的光照、凋落物性质、微生物含量与土壤养分条件产生差异,从而间接地对林下灌草层植物物种多样性产生影响。

综上所述表明,对于关帝山柴禄沟内林下灌草层植物物种多样性的调控,可以更多地从林木分布格局方面入手,林内补植一些阔叶树种,如白桦、山杨,以林木混交程度为辅,适当砍伐大径阶林木,提升该林区的森林生态系统功能,为森林可持续经营模式提供可靠依据。

### 参考文献:

- [1] Herbaceous-Layer and Overstory Species in Clear-cut and Mature Central Appalachian Hardwood Forests[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(4): 947-955.
- [2] LUCIANA M, MÓNICA T, ROSINA S, *et al.* The influence of canopy-layer composition on understory plant diversity in southern temperate forests[J]. *Forest Ecosystems*, 2017, 4(2): 154-166.
- [3] 曹小玉, 李际平, 委霞. 亚热带典型林分空间结构与林下草本物种多样性的差异特征分析及其关联度[J]. *草业科学*, 2019, 36(10): 2466-2475.
- [4] 刘贵峰, 刘玉平, 额尔德木图, 等. 罕山自然保护区4种典型天然次生林林下草本植物物种多样性[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(2): 31-37.  
LIU G F, LIU Y P, ERDEMT, *et al.* Species Diversity of Herbal Plants Under Four Typical Natural Secondary Forests in Hanshan Nature Reserve[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(2): 31-37. (in Chinese)
- [5] 邱扬, 李湛东, 张玉钧, 等. 火干扰对大兴安岭北部原始林下层植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2863-2869.
- [6] 委霞, 曹小玉, 李际平, 等. 福寿林场天然次生林空间结构分析与评价[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(5): 146-151.  
WEI X, CAO X Y, LI J P, *et al.* Analysis and Evaluation of Spatial Structure of Natural Secondary Forests in Fushou Forest Farm[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(5): 146-151. (in Chinese)
- [7] 项佳, 杨素萍, 刘健, 等. 福建三明市金丝湾森林公园米槠林林分空间结构分析[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 230-236.  
XIANG J, YANG S P, LIU J, *et al.* Spatial structure analysis of castanopsis carlesii stand in Jinsiwan forest park of Sanming, Fujian[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(5): 230-236. (in Chinese)
- [8] ELIVANE S C, KELLIN L S, ELISABETE M Z, *et al.* Effects of forest structure on litter production, soil chemical composition and litter-soil interactions[J]. *Acta Botanica Brasilica*, 2016, 30(3): 329-335.
- [9] 刘丽, 王新杰, 和敬渊. 云冷杉林分空间结构对林下灌木物种多样性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(1): 27-32.  
LIU L, WANG X J, HE J Y. Effects of Stand Spatial Structure on Understory Shrub Species Diversity of Spruce-fir Forest[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50(1): 27-32. (in Chinese)
- [10] 毛燕, 林虎, 孙林山, 等. 柏木人工林林分空间结构对林下物种多样性的影响[J]. *广西林业科学*, 2021, 50(6): 639-645.
- [11] 张亚昊, 佃袁勇, 黄光体, 等. 不同演替阶段马尾松林林分空间结构对物种多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2357-2365.  
ZHANG Y H, DIAN Y Y, HUANG G T, *et al.* Effects of spatial structure on species diversity in Pinus massoniana plantation of different succession stages[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2357-2365. (in Chinese)
- [12] 边更战, 朱光玉. 八大公山栎类林分空间结构对林下灌木物种多样性影响分析[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(19): 39-43.
- [13] 陶观护, 卜元坤, 薛卫鹏, 等. 不同密度油松飞播林灌草多样性与林分空间结构关系[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 171-177.
- [14] 刘敏, 张潇月, 李晓丽, 等. 黄土高原林下草地模拟增温的短期响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6009-6024.  
LIU M, ZHANG X Y, LI X L, *et al.* Short-term responses of under-canopy grasslands to the experimental warming on the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 6009-6024. (in Chinese)
- [15] 韩晓丽, 黄春国, 张芸香, 等. 关帝山林区不同退化程度草地群落类型土壤细菌群落组成及生物多样性研究[J]. *激光生物学报*, 2020, 29(5): 446-452.
- [16] 崔玉华, 韩有志, 张梦翌, 等. 不同干扰强度下针阔混交林树种空间格局及种间关联性[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2053-2060.  
CUI Y H, HAN Y Z, ZHANG M T, *et al.* Spatial pattern and interspecific correlation of tree species in coniferous and broadleaved mixed forests under different interference intensities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2053-2060. (in Chinese)
- [17] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 基于相邻木关系的树种分隔程度空间测度方法[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(4): 131-134.  
HUI G Y, HU Y B, ZHAO Z H. Evaluating tree species segregation based on neighborhood spatial relationships[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(4): 131-134. (in Chinese)
- [18] 黎芳, 潘萍, 宁金魁, 等. 飞播马尾松林林分空间结构对林下植被多样性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(11): 31-35.
- [19] 左政, 郑小贤. 不同干扰等级下常绿阔叶次生林林分结构及树种多样性[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(1): 21-30.  
ZUO Z, ZHENG X X. Forest structure and tree species diversity across a disturbance gradient in evergreen broadleaved secondary forests[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(1): 21-30. (in Chinese)
- [20] 朱光玉, 徐奇刚, 吕勇. 湖南栎类天然次生林林分空间结构对灌木物种多样性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5404-5412.
- [21] 刘红民, 董莉莉, 高英旭, 等. 辽东山区典型次生林空间结构对草本物种多样性的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(6): 670-679.