

长白山地区白桦红松混交林结构特征分析

孙明港,王新杰*

(北京林业大学 林学院,北京 100083)

摘要:以长白山地区白桦红松混交林为对象,对林分结构特征进行研究,为森林结构调整优化提供参考。于金沟岭林场设立一块 100 m×100 m 的白桦红松混交林标准地,对样地内的整个林分以及白桦、红松直径结构运用负指数函数、三参数 Weibull 函数进行拟合,对于空间结构特征,采用混交度、角尺度、大小比、密集度 4 个结构参数进行描述。结果表明:1)林分中树种种类较多,直径大部分分布在 6~12 cm 径阶,大径材林木较少。2)对直径进行拟合时,三参数 Weibull 函数对红松和整体林分的直径拟合效果较好,负指数函数对白桦直径拟合较好。3)零元分布和一元分布中,白桦红松混交林中大多林木处于随机分布状态,中等程度混交,树冠较为密集,各个优势等级上林木数量分布均匀。从林分结构多元分布来看,无论参数如何组合,混交林各树种均表现出不同结构组合下大多数林木树冠分布密集或林木随机分布的格局。多元分布能够直观地描述各个树种多个结构参数组合的频率分布,为森林可持续经营、科学管理提供重要的参考信息。

关键词:林分结构;树种组成;直径结构;四元分布

中图分类号:S718.542

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)05-0018-10

Structure Characteristics of Mixed Forest of *Betula platyphylla* and *Pinus koraiensis* in Changbai Mountains

SUN Ming-gang, WANG Xin-jie*

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Precise description and analysis of forest structure can provide a theoretical basis for the formulation of forest management plans. The mixed forest of *Betula platyphylla* and *Pinus koraiensis* occurring in the Changbai Mountains area was taken as the research object, the structure characteristics of the forest stand were examined to provide a reference for forest structure adjustment and optimization. A 100 m×100 m standard plot of *B. platyphylla* and *P. koraiensis* mixed stand was established in Jingouling Forest Farm, and the diameter structures of the entire stand, as well as *B. platyphylla* and *P. koraiensis* in the sample plot were fitted with negative exponential function and three-parameter Weibull function. The spatial structure characteristics were described by using four structural parameters: mingling degree, uniform angle index, neighborhood comparison and crowding degree. 1) There were many tree species in the stand, most of which were in 6 to 12 cm diameter class, and there were few large-diameter timber trees. 2) When fitting the diameter, satisfactory results were achieved when Weibull function with three parameters was used to fit the diameter of *P. koraiensis* and the overall stand, while the negative exponential function was found to be suitable to fit the diameter of the *B. platyphylla*. 3) In zero-variate distribution and the univariate distribution, most trees in the mixed forests were in random distribution, moderate mixing degree, and dense canopy. The number of trees was evenly distributed on each dominant level. From the perspective of

收稿日期:2020-10-09 修回日期:2020-11-09

基金项目:国家重点研发项目;东北天然次生林抚育更新技术研究与示范(2017YFC050410101)。

作者简介:孙明港。研究方向:森林可持续经营。E-mail:2441415544@qq.com

*通信作者:王新杰,博士,教授,硕士生导师。研究方向:森林生长收获预估。E-mail:xinjiew@bjfu.edu.cn

the multivariate distribution of the stand structure, no matter how the parameters were combined, each tree species in the mixed forest showed a pattern of densely distributed tree crowns or random distribution of forest trees under different structural combinations. The multivariate distribution can intuitively describe the frequency distribution of multiple structural parameter combinations of various tree species, which can provide important reference information for sustainable forest management and scientific management.

Key words: stand structure; tree species composition; diameter structure; quadrivariate distribution

森林结构是林木个体之间分布格局以及其属性的连接方式^[1-2],作为森林生长以及森林生态过程中重要的驱动因子,也是森林动态和物理过程的结果,影响着森林生态系统物种多样性、生物栖息地以及生物量的产出等,直接与森林的生态系统功能紧密相关^[3],同时也决定了森林生态系统的质量^[4]。

分析森林结构有助于人们对森林的历史、现状以及未来生态系统的发展方向有一定的了解^[5-6]。对当前森林结构的合理分析和调整有利于持续发挥森林的生态功能,为森林经营措施的制定提供准确的信息^[7]。林分结构作为森林结构的基本单元,可分为空间结构和非空间结构。林分的非空间结构通常包括树种组成、物种多样性、直径分布、林分密度等^[8],而针对空间结构的分析,惠刚盈^[8]提出的角尺度、混交度、大小比、密集度来分别描述林分的林木个体的水平分布格局、树种空间隔离程度、林木个体竞争状态的大小以及树冠密集程度。在过去的研究中,林分空间结构的一元分布被广泛运用来描述林分整体和单方面的特征,但无法与林分的其他属性建立联系^[9-10]。近些年国内研究学者在认识到一元结构的这些缺陷之后开始以二元结构、三元结构来描述林分的结构特征^[11-12],结构参数的二元分布利用任何2种参数组合的频率从2个不同方面来刻画林分结构特征^[13-14];在二元分布的基础之上,白超^[15]将角尺度、混交度、大小比3个结构参数进行混合,利用这3个参数在林分结构频率表达上的优势,提出了新的空间参数的表达方式——结构参数三元分布,该分布涵盖了所有一元分布、二元分布的信息,以更直观的方式呈现林分结构信息。在二元、三元结构被广泛运用时,张岗岗等^[16]采用空间结构4元分布对小陇山锐齿栎天然混交林的林分结构进行系统、全面地分析,探索更加高效、直观的可视化方式来描述林分的结构特征,为林分结构的精准调控提供理论基础。

本研究对林分的非空间结构特征树种组成和直径分布进行分析,同时采用空间结构的零元、一元和多元分布对金沟岭林场白桦红松混交林的空间结构进行分析,为该地区森林的林分结构调整以及伐木的选择提供一定的理论参考。

1 研究区概况

金沟岭林场位于吉林省汪清县境内东北部130°10'E,43°22'N,距县城59 km,属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,四面环山。本区属于季风型气候,全年平均气温3.9℃;1月气温最低,平均气温-32℃;7月气温最高,平均22℃;年降水量600~700 mm,且多集中在7月;早霜从9月中旬开始,晚霜期至翌年5月末,生长期为120 d。研究区内主要乔木树种为白桦(*Betula platyphylla*)、红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、枫桦(*Betula costata*)等(表1)。草本主要有蚊子草(*Filipendula palmata*)、毛缘藁草(*Carex pilosa*)、唐松草(*Thalictrum aquilegiifolium* var. *sibiricum*)。

2 研究方法

2.1 样地调查

2020年7月20日在金沟岭林场设置100 m×100 m的白桦红松混交林固定样地,平均海拔668 m,东北坡向,平均坡度为5°,林分的郁闭度为0.8,树种组成为6白桦1红松1冷杉+1枫桦+山杨+椴树+落叶松+杂木(表1)。以样地内西南角为原点,用皮尺对林分内每株树木坐标 x 、 y 进行记录,对样地内所有胸径 ≥ 5 cm的林木进行记录,每株树木东西和南北方向的冠幅平均值作为平均冠幅,在该样地四周设置5 m的缓冲区,在缓冲区外的林只作为邻近木,不计算各种林分参数,在缓冲区内的林木需要计算各种林分参数。

2.2 非空间结构参数

2.2.1 直径分布 采用负指数分布和三参数Weibull分布对整体林分、白桦以及红松进行直径拟合。

$$\text{负指数: } f(x) = a e^{-bx} \quad (1)$$

三参数 Weibull 分布:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{c}{b} (c-1) e^{\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right]}, & x \geq a, b > 0, c > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为对应的径阶直径; $f(x)$ 为对应各径阶株数百分比。负指数中 a 、 b 、 c 为模型的参数。三参数 Weibull 函数中, a 为最小径阶, 本研究取 4 cm, b 、 c 分别与平均直径位置和拟合曲线形状有关。

表 1 样地调查因子

Table 1 Survey factors of sample plot

树种	蓄积比例/%	断面积比例/%	平均胸径/cm	平均树高/m	密度/(株·hm ⁻²)
暴马丁香(<i>Syringa reticulata</i> var. <i>amurensis</i>)	0.59	0.82	6.2	7.55	54
紫椴	4.10	3.46	9.46	8.47	71
枫桦	5.10	4.61	8.59	10.2	119
红松	12.10	14.35	8.68	7.48	404
臭冷杉	6.69	6.10	12.04	10.87	92
杂木	2.06	3.02	7.22	8.25	138
白桦	55.23	54.39	13.89	12.8	665
山杨(<i>Populus davidiana</i>)	4.84	4.66	13.48	12.36	56
山桃(<i>Amygdalus davidiana</i>)	4.18	4.18	10.1	9.27	99
落叶松(<i>Larix gmelinii</i>)	3.41	2.10	16.15	13.29	22
青楷槭(<i>Acer tegmentosum</i>)	0.01	0.02	7.08	7.66	6
色木(<i>Acer mono</i>)	0.05	0.05	9.18	9.36	33
云杉(<i>Picea asperata</i>)	0.55	0.65	8.86	7.05	19
大青杨(<i>Populus ussuriensis</i>)	0.96	0.94	13.17	12.74	12
山丁子(<i>Malus baccata</i>)	0.04	0.53	11.11	10.62	10
榆树(<i>Ulmus pumila</i>)	0.04	0.06	8.5	10.25	2
水曲柳	0.04	0.07	7.33	7.86	3
总计	1	1			1 805

对于各个模型的拟合效果采用偏差(Bias)、均方根误差(RMSE)、调整后的决定系数来评价。相关公式如下:

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-r}} \quad (4)$$

$$\text{adj-}R^2 = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{(n-r) \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (5)$$

式中, r 为参数个数, n 为样本数量, y_i 为胸径的实测值, \hat{y}_i 、 \bar{y}_i 分别表示胸径的预测值和平均值。

2.3 林分空间结构参数

“结构化森林经营理念”是在没有人为经营干扰或者轻度干扰的情况下,使林分恢复到天然林分结构的经营理念,该理念能够为森林的生长提供更科学的经营技术方案^[17]。在对林分空间结构进行评价时,4种空间结构参数(混交度、角尺度、大小比、密集度)可以作为评价林分经营效果的有效指标^[16]。本研究基于1株参照树与邻近的4株对照木构成一个空间单元去计算林分的结构参数。为全面描述白桦红松混交天然林的林木竞争大小分化程度、林木空间隔离程度、林木水平分布格局、树冠密

集程度,分别选用4个林分结构参数(大小比、混交度、角尺度、密集度)的不同组合分布图来说明林分的空间结构情况。

2.3.1 角尺度 角尺度^[18]是指林分在水平方向上的分布格局,即小于标准角的树木数量占最近相邻木的比例,在邻近木的数量先择为4时,标准角 $\alpha_0 = 72^\circ$,计算方法为:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \quad (6)$$

参照木2个近邻木之间的夹角为 α ,当 $\alpha < 72^\circ$ 时, $\alpha_{ij} = 1$,否则 $\alpha_{ij} = 0$ 。 $W_i = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ 时分别代表的意义为:林分的分布格局为很均匀分布、均匀分布、随机分布、不均匀分布、很不均匀分布。

2.3.2 混交度 混交度^[19]用来表示参照木与邻近木种类不同的概率,表示树种的隔离程度,计算方法为:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (7)$$

当参照木 i 和邻近木 j 是同种树种时, $V_{ij} = 0$,否则 $V_{ij} = 1$ 。 $M_i = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ 时分别代表:林木属于零度、弱度、中度、强度和极强度混交。

2.3.3 大小比数 大小比数^[20]表示在 n 株近邻木中,某调查因子的值大于参照木的个数占全部相邻木个数的比值,计算公式为:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (8)$$

若参照木比邻近木小, $K_{ij} = 0$, 否则, $K_{ij} = 1$ 。 $U = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ 时分别表示参照木为优势木、亚优势木、中庸木、劣势木、绝对劣势木。

2.3.4 密集度 密集度^[21]表示树木之间的冠幅与水平距离的关系, 计算公式为:

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (9)$$

当邻近木与参照木树冠投影有重叠时, $y_{ij} = 1$, 否则 $y_{ij} = 0$, 密集度的高低反映了林木之间的竞争与否, 当 $C_i = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ 时分别表示非常稀疏、稀疏、中等密集、比较密集、非常密集。

2.4 数据处理与分析

利用 Excel2013 对数据进行初步处理, 采用 R3.6.3 对林分结构的零元分布、一元分布、二元分布、三元分布以及四元分布的 4 个参数进行统计, 并计算出各个分布中 4 个结构参数组合的林木分布频率, 利用 origin2019 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 白桦红松混交林树种组成特征

1 hm² 白桦红松混交林样地的基本情况见表 1, 样地中共有 17 个树种, 林分的总密度为 1 805 棵 · hm⁻², 其中白桦和红松的密度分别为 665 棵 · hm⁻²、404 棵 · hm⁻²。白桦的蓄积量和断面积分别占到了总蓄积量和断面积的 55.23% 和 54.39%, 山丁子、榆树、水曲柳蓄积量较小。林分整体平均胸径较小, 除落叶松外, 平均直径都 < 15 cm, 白桦的平均胸径、树高相对于红松较大, 优势程度较高。

3.2 直径结构分布特征

采用 2 cm 的径阶, 对样地的红松和白桦以及全部树种的径阶分布作图。从图 1 中可以看出, 红松的径阶分布在 4~36 cm, 在 6 cm 径阶和 8 cm 径阶分布较多, 分别占到了红松总株数的 37.13% 和 30.20%, 在 12 cm 径阶之后数量急剧减小; 白桦的径阶分布在 4~28 cm, 6~12 cm 径阶范围的数量比红松和整体林分的数量少, 14~20 cm 径阶的数量较红松和整体林分较多, 20 cm 径阶之后数量急剧减小; 整体林分的径阶范围分布在 4~36 cm, 大部分分布在 6、8、10 cm 径阶, 12 cm 径阶之后数量急剧减少。

本研究对整体林分、红松以及白桦的直径分布采用了 Weibull 分布、负指数函数进行拟合, a 、 b 、 c 代表 2 个模型中的参数。分别运用评价指标偏差 (Bias)、均方根误差 (RMSE)、调整后的决定系数

(adj- R^2) 对 2 个模型的精度进行评价 (表 2)。可以看出, 整个混交林、红松和白桦的负函数模型的 Bias 和 RMSE 都比三参数 Weibull 分布的小。除白桦外, 模型显著性以及调整后的 R^2 , 三参数 Weibull 分布比负指数模型要拟合的好。

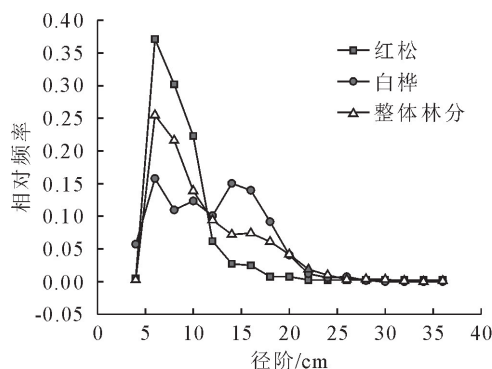


图1 林分主要树种直径分布

Fig. 1 Diameter distribution of the main tree species in forest stand

3.3 白桦红松混交林空间结构参数零元分布

零元分布是指用林分内 4 个林分结构参数 (U 、 M 、 W 、 C) 各自的均值来分别描述林分某方面结构的状态。白桦红松混交林 \bar{M} 为 0.499, 说明整个林分处于中度混交状态; \bar{C} 为 0.836, 表明整个林分各个林木之间比较密集; \bar{W} 为 0.530, 表明整个林分呈现随机分布的格局; \bar{U} 为 0.499, 说明整体林木的优势程度中庸。

3.4 白桦红松混交林空间结构参数一元分布

4 个结构参数 (角尺度、大小比、密集度、混交度) 均以 5 个值 (0、0.25、0.5、0.75、1) 的林木所占的相对频率来表示各自等级。图 2 为白桦红松混交林结构参数的一元分布图。林分空间隔离程度从弱到强数量逐渐增多, 其中极强度混交和强度混交数量分别占到了 30.2%、32.5%; 对于密集度而言, 林分中很密集的林木以及密集的林木分别占据了 61.67% 和 20% 的比例, 可见林分中无竞争压力的林木较少; 在该天然混交林中, 58.33% 的林木分布格局为随机分布, 很均匀和很不均匀的分布格局占据比例很小, 分别只占 0.76%、1.97%; 各大小比数林木的相对频率基本相同, 即林分中每种优势程度的树木分别占总数的 20%。

3.5 白桦红松混交林空间结构参数二元分布

二元分布是将 4 种结构参数的任意 2 种分别对应的 5 个值 (0、0.25、0.5、0.75、1) 进行交叉组合, 得到 25 种参数组合。在白桦红松混交林中, 生长很密集、较为密集的林木大多混交状态良好, 很少有零度或者弱度混交 (图 3a); 处于同一混交等级的林分大

多都是随机分布,分布格局很均匀、很不均匀的林木所占比例极小(图 3b);处于不同大小比数 58.33% 的林木都为随机分布状态,同一分布格局的林木在各个优势等级上所占比例基本相同(图 3c);不同优势等级的林木大多林冠密集,其中很密集的优势木所占比例达到 15.27%(图 3d);同一优势程度的林木在不同混交状况下的占比情况有所不同,绝对劣势的林木有 8.75% 极强度混交,而优势木、亚优势

木中混交度为 0.75 林木所占比例最大,分别为 7.36% 和 6.39%,不同优势等级混交状态很差的林木数量很少(图 3e);在角尺度和密集度二元分布中,仅 $W_i=0.50$ 且 $C_i=0.75$ 、 $W_i=0.50$ 且 $C_i=1.00$ 、 $W_i=0.25$ 且 $C_i=1.00$ 这 3 个参数组合所占比例最大,分别为 10.97%、36.53%、10.76%,其他参数组合所占比例极小(图 3f)。

表 2 各林分直径拟合模型评价

Table 2 Evaluation of the fitting model of each stand diameter

树种	模型	参数	估计值	标准差	<i>t</i>	<i>P</i>	偏差	均方根误差	调整后决定系数
整体林分	负指数函数	<i>a</i>	0.221 7	0.082 9	2.673 0	0.019 1 *	-0.004 10	0.017 51	0.376 20
		<i>b</i>	0.074 5	0.033 8	2.207 0	0.045 9 *			
	Weibull 函数	<i>a</i>	4.000 0	—	—	—			
		<i>b</i>	4.182 3	0.574 0	7.286 0	6.13e-06 ***	0.032 34	0.046 34	0.643 44
		<i>c</i>	1.959 0	0.492 6	3.976 0	0.001 58 **			
红松	负指数函数	<i>a</i>	0.347 1	0.160 4	2.164 0	0.047 0 *	-0.008 09	0.035 51	0.369 83
		<i>b</i>	0.103 8	0.050 5	2.054 0	0.057 9			
	Weibull 函数	<i>a</i>	4.000 0	—	—	—			
		<i>b</i>	3.618 6	0.484 0	7.539 0	1.78e-06 ***	0.032 97	0.065 63	0.685 71
		<i>c</i>	2.357 5	0.709 7	3.322 0	0.004 65 **			
白桦	负指数函数	<i>a</i>	0.169 8	0.051 9	3.272 0	0.007 43 **	0.002 25	0.008 81	0.350 06
		<i>b</i>	0.052 5	0.024 5	2.143 0	0.055 36			
	Weibull 函数	<i>a</i>	4.000 0	—	—	—			
		<i>b</i>	8.796 2	2.184 2	4.027 0	0.001 99 **	0.003 84	0.057 05	0.056 30
		<i>c</i>	1.883 3	0.687 9	2.738 0	0.019 3 *			

注: * 的数量代表模型的相关程度,数量越多,相关程度越大。

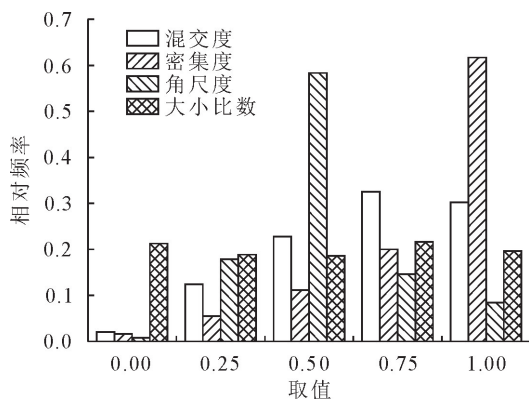


图 2 一元分布

Fig. 2 Univariate distribution

3.6 白桦红松混交林空间结构参数三元分布

三元分布是将 4 种结构参数的任意 2 种的可能的 5 个取值(0、0.25、0.5、0.75、1)和第 3 种的参数的 5 个取值进行交叉组合,一共得到 125 种参数组合分布,即为林分结构的三元分布。同一密集度和大小比数的林木大多混交良好(包括极强度混交、强度混交),其中很密集、混交良好的各个优势等级的林木共占到了 38.47%(图 4a);同一优势等级和同一混交状态的林木大多处于随机分布的格局,其中

有 5.20% 极强度混交的绝对劣势木(图 4b);同一密集度、优势度的林木大多处于随机分布状态,其中有 8.54% 的优势且很密集的林木(图 4c);同一密集度和混交程度的林木大多处于随机分布状态,其中 $M_i=0.50$ 、 $C_i=1.00$ 的中度混交且很密集的林木占到了 10.97%;同一混交度、角尺度的林木大多数很密集或者比较密集,其中混交良好、随机分布且很密集的林木占到了总数的 23.33%(图 4d)。

3.7 白桦红松混交林结构参数的四元分布

将 4 个结构参数中的任意一对参数的 25 种组合和剩下的一对参数的 25 种组合进行两两交叉组合,共得到 625 种结构参数的组合,即为四元分布。在不分树种的情况下白桦红松混交天然林中(图 5a),同一密集度大小比的林木,分布格局相同时,混交良好的林木占据多数,零度混交的林木只占了 2.01%。密集度和优势程度不同的混交良好且随机分布的林分占比 37.22%;在整个混交林分中,最常见的林木为周围很密集地随机分布 3 种其他树种的亚优势木($M_i=0.75$ 、 $C_i=1$ 、 $W_i=0.5$ 、 $U_i=0.25$),占总株数的 2.99%;其次是极强混交状态下随机分布的很密集的绝对劣势木,占总株数的 2.91%,然

后是强度混交状态下随机分布的很密集的优势木, 占总株数的 2.70%。

研究选取混交林中 4 个主要树种(白桦、红松、臭冷杉、枫桦)进行四元结构分析(图 5b)。白桦在

样地中 174 个结构组合上有频率值, 平均角尺度为 0.477, 平均混交度为 0.373, 平均大小比数为 0.270, 平均密集度为 0.848。白桦中最常见的是周围很密集地随机分布有其他 3 种树种的绝对劣势

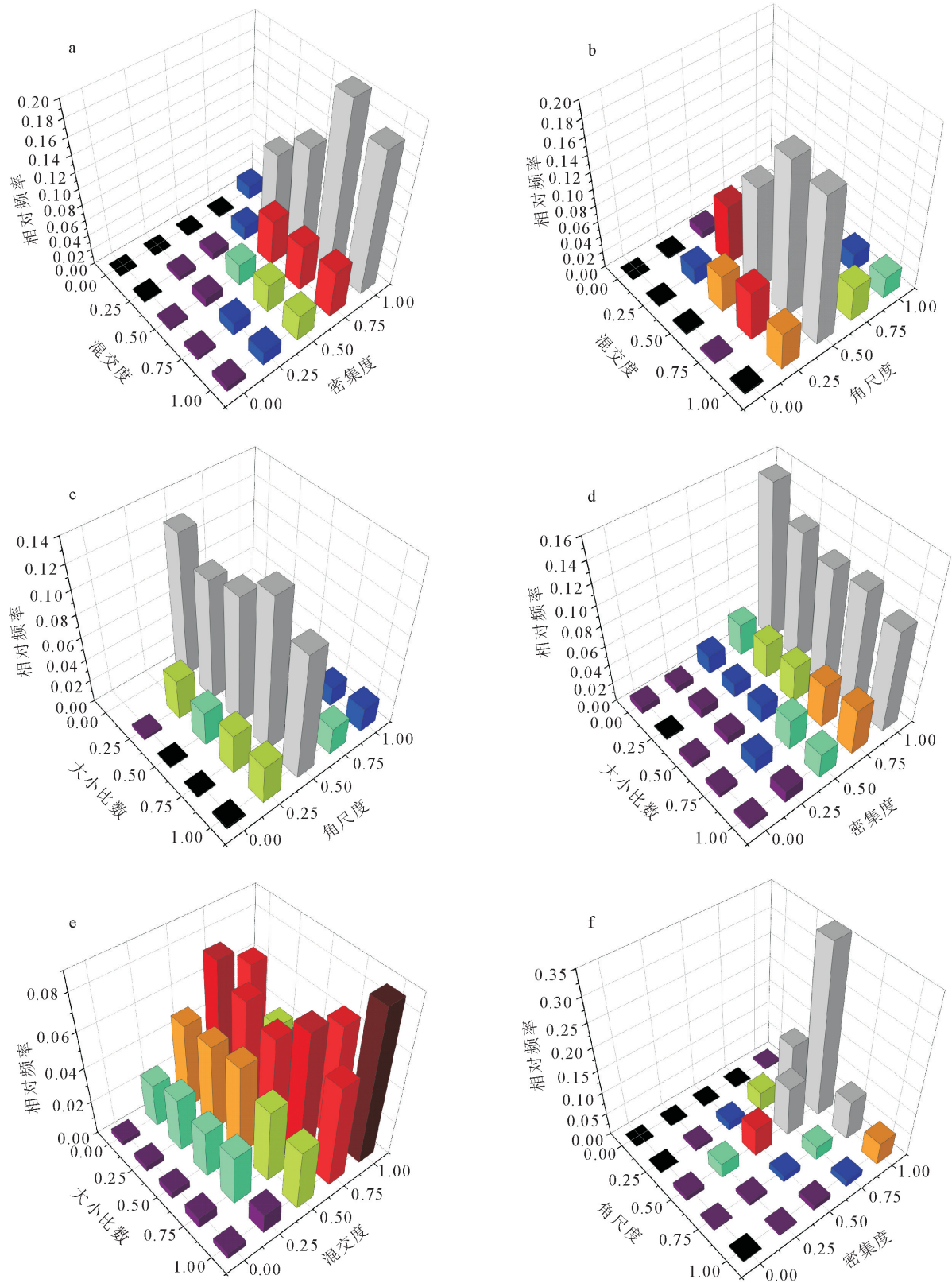


图 3 二元分布

Fig. 3 Bivariate distribution

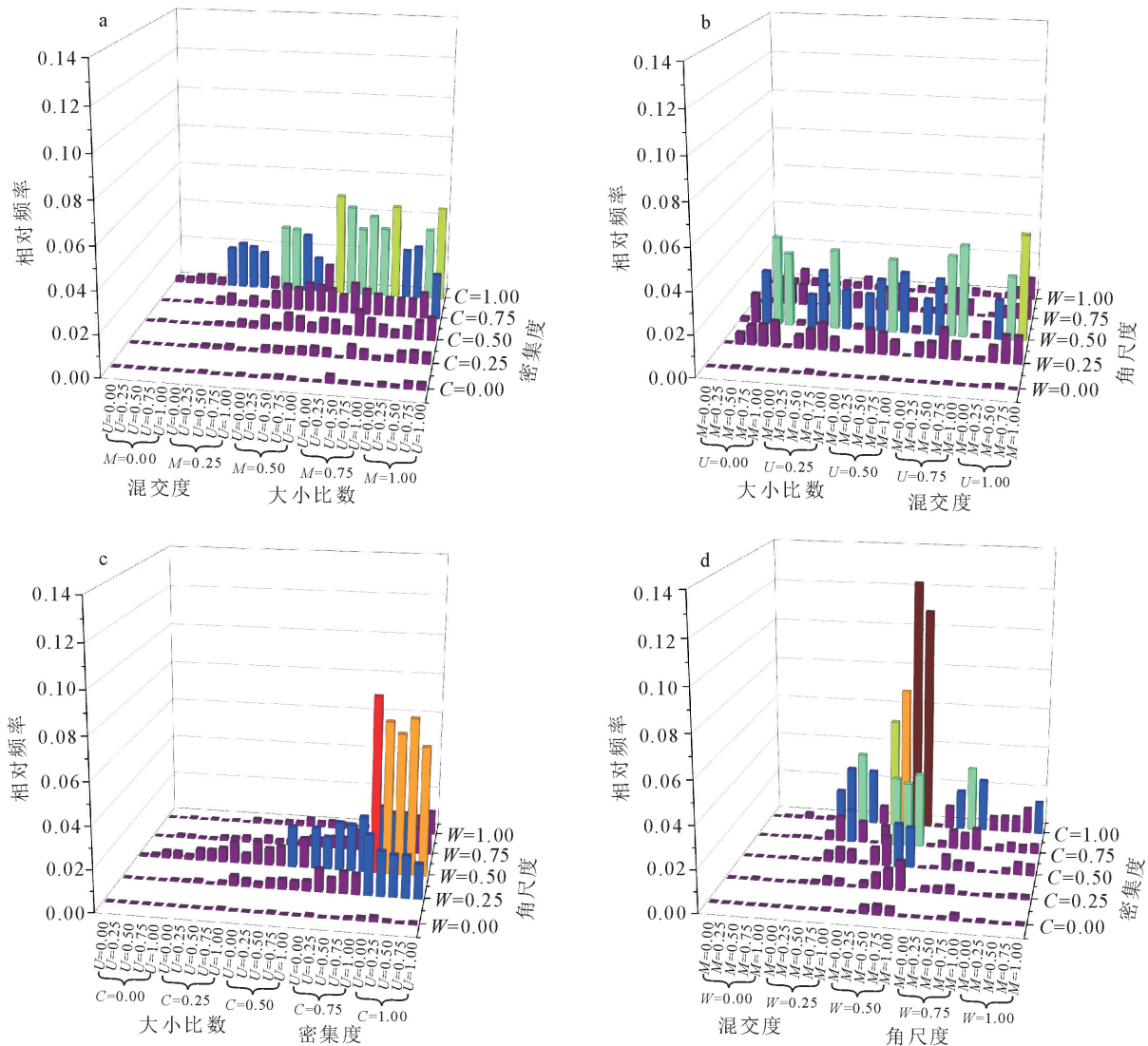


图 4 三元分布

Fig. 4 Trivariate distribution

木、劣势木以及优势木,分别占白桦总株数的 5.10%、4.55%、4.00%,再者是在极强混交的情况下,很密集随机分布的优势木占总株数的 3.1%。

红松在样地中 143 个结构组合上有频率值,平均角尺度为 0.677,平均混交度为 0.373,平均大小比数为 0.270,平均密集度为 0.848。红松最常见的是周围很密集地随机分布其他 3 个树种的绝对劣势木和劣势木,均占红松总株数的 5.12%,其次是强度混交状态下很密集随机分布的中庸木,占 3.01%,再者是有 3.31%的极强混交状态下很密集随机分布的绝对劣势木;冷杉中最常见的是周围很密集随机分布其他 4 个树种的亚优势木和周围很密集其他 4 个树种的劣势木,均占总株数的 5%;

枫桦在样地中 63 个结构组合上有频率分布。白桦最常见的是周围很密集地随机分布有其他 4 个树种的劣势木,占总数的 7%,其次是周围很密集分布有其他 2 个树种的亚劣势木,占总数的 5%,再者

是周围很密集分布有其他 3 个树种的中庸木,也是占总数的 5%。在图 4 中也可看见当 $W_i=0$ 时各个结构组合上均没有枫桦分布,可见枫桦中没有很均匀的分布格局。同样,零度混交和弱度混交在白桦中基本见不到。

臭冷杉在样地中 49 个结构组合上有频率分布。臭冷杉最常见的是周围很密集地随机分布其他 3 个树种的亚优势木,占总数的 5%;其次是周围很密集地随机分布有其他 4 个树种的劣势木;再者是周围很密集地随机分布有其他树种的劣势木或者中庸木,占臭冷杉总株数的 3.33%。在臭冷杉中见不到处于零度混交($M_i=0$)或者很均匀分布($W_i=0$)的林木。

4 结论与讨论

4.1 结论

以长白山地区金沟岭林场 1hm² 白桦红松混

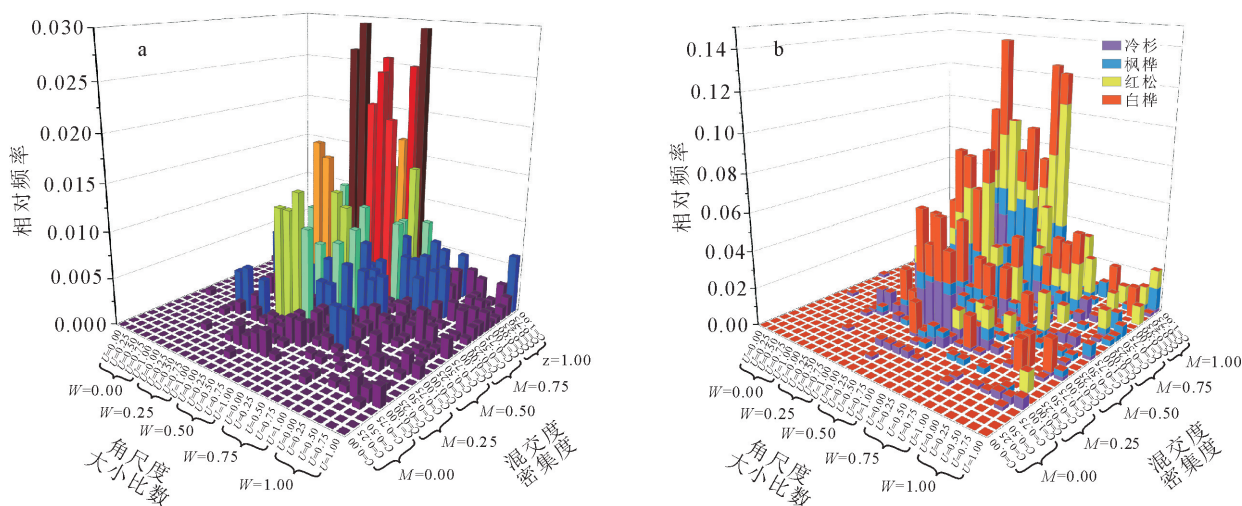


图 5 四元分布

Fig. 5 Quadrivariate distribution

交林为对象,对混交林的树种组成、直径分布的非空间结构进行分析,以角尺度、大小比、混交度、密集度对林分的空间结构的多元结构进行可视化处理,对林分的微环境有了更加细微的刻画^[16,21]。其中,整个林分的树种种类较多,但白桦和红松在数量上占据了多数。直径结构上大多数直径分布在 6~10 cm 径阶,白桦的平均直径相对于其他树种较大,且在 12 cm 径阶分布较多。运用负指数函数和三参数 Weibull 分布对白桦、红松以及整个林分进行拟合时发现,红松和整个林分的三参数 Weibull 函数拟合效果相对于负指数函数效果较好。

从林分空间结构中零元分布和一元分布中可知,大多数林木处于随机分布的格局,这点符合天然林的发展趋势^[22]。林分中树冠密集的林木较多,各个优势等级树木的数量基本一致,强度混交和极强度混交的林木较多。二元分布中,不同优势等级的林木大多林冠密集或者处于不同分布格局的比例相同,同一优势等级的林木混交状况有所不同,生长密集以及很密集的林木大多处于强度和极强度混交,同一混交等级的林分大多都是随机分布;三元分布中,同一密集度和大小比数的林木大多周围生长有其他 3 个或 4 个树种或者处于随机分布格局,同一混交度和密集度或者同一混交度和优势等级的林木大多都处于随机分布状态;四元分布通过各个变量的交叉组合涵盖了前面零元、一元、二元、三元分布的所有信息。在分树种的四元分布中,白桦、枫桦作为先锋树种出现,枫桦在空间结构上较白桦差,原因在于在同一混交度和密集程度的情况下,枫桦大多为处于不均匀分布的劣势木。随着群落的演替,臭冷杉和红松逐渐会成为主要树种,在该林分中,红松

和臭冷杉空间结构较为合理,但树种分布较为密集。

4.2 讨论

本研究利用多元分布对白桦红松混交林的空间结构进行分析,在此之前也有很多研究学者对金沟岭地区的天然林林分结构进行零元、一元、二元以及三元结构的分析^[7,23],但并没有涉及林冠的结构信息,四元结构中的结构参数密集度很好地解决了这个弊端,并在更多参数组合上提供了林分的空间结构信息。四元分布的解译同时也为林分空间结构的调整以及森林经营措施的制定提供了理论依据。

在白桦红松混交林中各个树种的大径材树种较少,小径材的比例较高,林分年龄较小,合理的经营措施有利于群落的稳定性和演替进展。四元结构包含了其他各个分布的所有结构信息,在四元分布中白桦红松混交林整体林分水平分布格局良好,混交程度中等,树冠比较密集,从而导致种间的竞争强度加大,应给予适当的抚育择伐、补植改造来减小树冠间的竞争,增大林分的混交度^[24]。在四元分布基础上增加树种分类,可更加清楚地了解林分中不同树种的结构信息,针对不同树种在演替中出现的先后顺序,对伐木有针对性的选择,制定更加有目的性的森林经营方案,加快生态群落的演替。在选择伐木的过程中,根据林分结构的特征,林分中结构组合 ($C_i=1, M_i=0, W_i=1, U_i=0$) 为最差的林分结构组合,应作为首选的采伐对象,其次选择只有某一方面结构合理,其他结构不合理的林木作为采伐对象,再结合该林分的结构情况,即大部分林木分布格局较为合理且树冠较为密集,所以在选择伐木时,可以优先考虑树冠密集度这个指标,对于树冠密集的林木可以优先伐除,例如,占总数 0.182% 的极强度混

交、聚集分布且树冠密集的劣势木。同时在选择伐木时,若考虑到群落的演替,可对先锋树种的结构进行分析,在本研究中即为白桦和枫桦,选择这2个树种中结构最差的林木为优先采伐对象,例如白桦中占总株树0.182%的周围没有其他树种、树冠密集且随机分布的劣势木。择伐的过程可以分少量多次进行,尽量选择先锋树种进行伐除,逐渐使当前林分结构向优势木数量增多,大径材比例扩大,树种种类丰富的方向发展,加速该地区的群落演替过程,从而使得林分结构的稳定性增强^[25]。

空间结构参数在林分中的运用分析已成为一种常见的重要手段,通过不同结构参数的组合分布将传统的零元、一元结构向三元、四元结构转变,从而能够从“点、线、面、体”多层次多角度地去分析林分的微环境特征^[16]。多元结构丰富的可视化结构信息一方面体现出林分各树种林分结构和分布格局的多样性,另一方面也能直观而简易地选择采伐木,具有实际的操作性^[26]。在此基础上,制定相应的森林经营方案,对林分的空间结构进行优化,使得林分结构趋于低密集度、高混交度、随机分布、优势木居多的方向发展,提高森林质量^[27-28]。

参考文献:

- [1] 张君钰,杨培华,李卫忠,等.油松林林分空间结构分析及评价指标构建[J].西北林学院学报,2020,35(5):166-172.
ZHANG J Y, YANG P H, LI W Z, *et al.* Analysis of stand spatial structure and construction of evaluation index of *Pinus tabulaeformis* forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 166-172. (in Chinese)
- [2] 赵中华,袁士云,惠刚盈,等.经营措施对林分空间结构特征的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(7):135-142.
ZHAO Z H, YUAN S Y, HUI G Y, *et al.* Impacts of different management measures on spatial structure characteristics [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(7): 135-142. (in Chinese)
- [3] 惠刚盈,赵中华,陈明辉.描述森林结构的重要变量[J].温带林业研究,2020,3(1):14-20.
HUI G Y, ZHAO Z H, CHEN M H. Important variables describing forest structure [J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2020, 3(1): 14-20. (in Chinese)
- [4] GAMFELDT L, SNALL T, BAGCHI R, *et al.* Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species [J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 59-67.
- [5] FRANKLIN J F, THOMAS SPIES T, PELT R V, *et al.* Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 155(1): 399-423.
- [6] STAUDHAMMER C L, LEMAY V M. Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity [J]. Christina Lynn Stauhammer; Valerie Marie Lemay, 2001, 31(7): 1105-1115.
- [7] 吴晓永,杨华,吕延杰,等.云杉-白桦混交林结构特征分析[J].北京林业大学学报,2019,41(1):64-72.
WU X Y, YANG H, LÜ Y J, *et al.* Analysis of structure characteristics in *Picea asperata*-*Betula platyphylla* mixed forests [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(1): 64-72. (in Chinese)
- [8] 惠刚盈.基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究[J].北京林业大学学报,2013,35(4):1-9.
HUI G Y. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 1-9. (in Chinese)
- [9] 刘恩斌,施拥军,李永夫,等.基于非空间结构的浙江省毛竹林固碳潜力[J].林业科学,2012,48(11):9-14.
LIU E B, SHI Y J, LI Y F, *et al.* Carbon sequestration potential of Moso Bamboo forest in Zhejiang Province based on the non-spatial structure [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(11): 9-14. (in Chinese)
- [10] 胡艳波,惠刚盈,戚继忠,等.吉林蛟河天然红松阔叶林的空间结构分析[J].林业科学研究,2003,16(5):523-530.
HU Y B, HUI G Y, QI J Z, *et al.* Analysis of the spatial structure of natural Korean pine broad leaved forest [J]. Forest Research, 2003, 16(5): 523-530. (in Chinese)
- [11] 和敬渊,王新杰,郭韦韦,等.金沟岭林场两种天然起源的杨桦次生林空间结构特征[J].东北林业大学学报,2020,48(9):1-7.
HE J Y, WANG X J, GUO W W, *et al.* Spatial structure of two natural origin Poplar-Birch secondary forests in Jingouling forest farm [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(9): 1-7. (in Chinese)
- [12] 红玉,王耀,金鑫,等.抚育经营对杨桦次生林林分结构及土壤性质的影响[J].西北林学院学报,2018,33(3):61-66.
HONG Y, WANG Y, JIN X, *et al.* Effects of tending managements on stand structure and soil properties of poplar-birch secondary forests [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 61-66. (in Chinese)
- [13] LI Y F, HUI G Y, ZHAO Z H, *et al.* Spatial structural characteristics of three hardwood species in Korean pine broad-leaved forest—Validating the bivariate distribution of structural parameters from the point of tree population [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 314.
- [14] LI Y F, HUI G Y, ZHAO Z H, *et al.* The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest [J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(6).
- [15] 白超.空间结构参数及其在锐齿栎天然林结构动态分析中的应用[D].北京:中国林业科学研究院,2016.
- [16] 张岗岗,刘瑞红,惠刚盈,等.林分空间结构参数N元分布及其诠释——以小陇山锐齿栎天然混交林为例[J].北京林业大学学报,2019,41(4):21-31.
ZHANG G G, LIU R H, HUI G Y, *et al.* N-variate distribution and its annotation on forest spatial structural parameters: a case study of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural

- mixed forest in Xiaolong Mountains, Gansu Province of north-western China[J]. Beijing Forestry University Journal, 2019, 41(4): 21-31. (in Chinese)
- [17] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 结构化森林经营研究进展[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 85-93.
HUI G Y, HU Y B, ZHAO Z H. Research progress of structure-based forest management[J]. Forest Research, 2018, 31(1): 85-93. (in Chinese)
- [18] 惠刚盈. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. 林业科学, 1999, 35(1): 3-5.
- [19] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23-27.
- [20] 惠刚盈, von Gadow K, Albert M. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学研究, 1999, 13(1): 3-5.
- [21] 胡艳波, 惠刚盈. 基于相邻木关系的林木密集程度表达方式研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(9): 1-8.
HU Y B, HUI G Y. How to describe the crowding degree of trees based on the relationship of neighboring trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(9): 1-8. (in Chinese)
- [22] 徐美玲, 农明川, 欧光龙. 思茅松天然林林分空间结构分析[J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2020, 40(3): 122-130.
XU M L, NONG M C, OU G L. Spatial structure analysis of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* natural forest[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Science, 2020, 40(3): 122-130. (in Chinese)
- [23] 韩金, 王新杰, 段皓赞. 金沟岭云冷杉针阔混交林林分结构研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(1): 58-63.
HAN J, WANG X J, DUAN H Y. Study on forest structure of coniferous and broad-leaved mixed forest in Jingouling forest farm of Wangqing County of Jilin Province[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2019, 39(1): 58-63. (in Chinese)
- [24] 刘燕, 李春旭, 王子纯, 等. 大兴安岭两种主要天然次生林林分空间结构特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(6): 128-134.
LIU Y, LI C X, WANG Z C, et al. Stand spatial structure characteristics of two main natural secondary forests in Daxing'an Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(6): 128-134. (in Chinese)
- [25] 张岗岗, 王得祥, 柴宗政, 等. 小陇山2种典型天然林空间结构参数分布特征[J]. 林业科学研究, 2015, 28(4): 531-537.
ZHANG G G, WANG D X, CHAI Z Z, et al. Distribution characteristics of two typical natural forest spatial structure parameters in Xiaolongshan[J]. Forest Research, 2015, 28(4): 531-537. (in Chinese)
- [26] 陈亚南. 落叶松云冷杉林空间结构多样性及择伐模型的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [27] 万盼, 刘文帧, 刘瑞红, 等. 结构化经营对栎松混交林林分结构及稳定性的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(4): 35-45.
WAN P, LIU W Z, LIU R H, et al. Effects of structure-based forest management on stand space structure and its stability of mixed oak-pine forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(4): 35-45. (in Chinese)
- [28] 胡中洋, 刘锐之, 刘萍. 不同尺度天山云杉活立木空间结构分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 153-159.
HU Z Y, LIU R Z, LIU P. Spatial structure on *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* standing tree at different scales[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 153-159. (in Chinese)

(上接第17页)

- [17] LE HÉNANFF GALLE, CAMILLE P, BARBARA C, et al. Grapevine NAC1 transcription factor as a convergent node in developmental processes, abiotic stresses, and necrotrophic/biotrophic pathogen tolerance. [J]. Journal of Experimental Botany, 2013(16): 4877-4893.
- [18] 黄娟, 邓娇, 朱丽伟, 等. 植物种子发育相关 NAC 家族转录因子研究进展[J]. 种子, 2017, 36(11): 54-58.
HUANG J, DENG J, ZHU L W, et al. Research progress of NAC family transcription factors related to plant seed development [J]. Seeds, 2017, 36(11): 54-58. (in Chinese)
- [19] 郭文芳, 刘德春, 杨莉, 等. 柑橘抗逆基因 NAC83 的克隆与表达[J]. 园艺学报, 2015, 42(3): 445-454.
GUO W F, LIU D C, YANG L, et al. Cloning and expression of stress resistance gene NAC83 in *Citrus*[J]. Acta Horticulture Sinica, 2015, 42(3): 445-454. (in Chinese)
- [20] 贾东峰. 苹果 NAC 转录因子调控干旱胁迫响应和矮化性状的研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [21] 吴庚锦, 程殿君, 贺琳, 等. 玉米 *ZmNAC62* 调控低温渗透胁迫的反应[C]//中国作物学会. 2019 年中国作物学会学术年会论文摘要集, 2019. 1.
- [22] 段奥其, 冯凯, 刘洁霞, 等. 芹菜 NAC 转录因子基因 *AgNAC1* 的克隆及其对非生物胁迫的响应[J]. 园艺学报, 2018, 45(6): 1125-1135.
DUAN A Q, FENG K, LIU J X, et al. Cloning of the NAC transcription factor gene *AgNAC1* from celery and its response to abiotic stress[J]. Acta Horticulture Sinica, 2018, 45(6): 1125-1135. (in Chinese)