

DOI: 10.20103/j.stxb.202501030012

郭芙,王亚飞,段文标,牟森先,付琰芮,杨凤姣,邓逸飞,刘伟庆,李树龙,王鑫.张广才岭不同针阔比天然林林分空间结构特征.生态学报,2025,45(19): - .

Guo F, Wang Y F, Duan W B, Mu M X, Fu Y R, Yang F J, Deng Y F, Liu W Q, Li S L, Wang X. Stand spatial structure characteristics of natural forests with different needle-width ratios in Zhangguangcailing Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): - .

## 张广才岭不同针阔比天然林林分空间结构特征

郭 芙<sup>1</sup>, 王亚飞<sup>1</sup>, 段文标<sup>1,\*</sup>, 牟森先<sup>1</sup>, 付琰芮<sup>1</sup>, 杨凤姣<sup>1</sup>, 邓逸飞<sup>1</sup>, 刘伟庆<sup>2</sup>,  
李树龙<sup>2</sup>, 王 鑫<sup>3</sup>

1 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150199

2 牡丹江市大海林林业有限公司, 长汀 157125

3 牡丹江市杨明绿化所, 牡丹江 157000

**摘要:** 针叶和阔叶树的比例是生物和非生物因素长期作用的结果,也是林分管理时重要的指示因子。探究不同针阔比天然林生态系统结构和功能的稳定性与多样性,可为科学预测林分的演替趋势以及未来应采取的抚育措施提供理论依据。以张广才岭柳河林场 3 种不同针阔比天然林林分类型(暗针叶林、云冷杉针阔混交林和山地杨桦林)为研究对象,各设置 4 块样地(面积均为 50 m×50 m),共 12 块。基于本底调查,利用 Winklmass1.0 软件分析林分空间结构参数,包括角尺度、混交度、大小比数,对不同林分进行空间结构分析。结果表明:(1)所选林分的空间结构参数特征零元分布表明,不同林分类型均为轻度聚集分布,处于混交较好的中等生长状态,而云冷杉针阔混交林较其他两种林分树种隔离程度较高,该林分混交度比山地杨桦林高出 0.9%,比暗针叶林高出 4.1%;(2)一元分布表明,不同林分类型中树木多数呈现强度混交和大小比数相近的随机分布状态。山地杨桦林与其他两种林分相比,林分空间优势程度较高;(3)二元和三元分布表明,空间结构参数在进行多种组合时,不同林分类型中林木大多数表现为随机分布状态。其中在同一分布格局下,暗针叶林、山地杨桦林均以高度混交的亚优势随机分布为主,而云冷杉针阔混交林以高度混交的优势随机分布为主。综上,张广才岭林分结构整体状况较为一般,但是云冷杉针阔混交林林分空间结构相比于暗针叶林、山地杨桦林更好,群落稳定性最高,垂直梯度分布更为复杂,生物量及物种多样性更加丰富,并且在促进优势树种生长方面具有更为显著的优势。为使森林生态功能得到有效发挥,利用多元分布选择林木采伐方式优化林分空间结构,我们建议对林分中处于同种非常聚集的绝对劣势木( $M=0, W=1, U=1$ )进行择伐,对处于同种随机分布的绝对劣势木( $M=0, W=0.5, U=1$ )进行卫生伐。

**关键词:** 张广才岭; 针阔比; 天然林; 空间结构特征; 多元分布; 森林经营措施

## Stand spatial structure characteristics of natural forests with different needle-width ratios in Zhangguangcailing Mountains

GUO Fu<sup>1</sup>, WANG Yafei<sup>1</sup>, DUAN Wenbiao<sup>1,\*</sup>, MU Miaoxian<sup>1</sup>, FU Yanrui<sup>1</sup>, YANG Fengjiao<sup>1</sup>, DENG Yifei<sup>1</sup>,  
LIU Weiqing<sup>2</sup>, LI Shulong<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>3</sup>

1 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150199, China

2 Mudanjiang Dahailin Forestry Limited, Changting 157125, China

3 Mudanjiang Yangming Greening Institute, Mudanjiang 157000, China

**Abstract:** The proportion of coniferous and broad-leaved trees result of long-term effects of biotic and abiotic factors, and is also an important indicator of stand management. Exploring the stability and diversity of the structure and function of the

**基金项目:** 国家自然科学基金(31670627)

**收稿日期:** 2025-01-03; **网络出版日期:** 2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dwbiao88@163.com

ecosystem of different coniferous and broad-leaved natural forests in Zhangguangcailing Mountains can provide a theoretical basis for scientifically predicting the succession trend of the stand and the tending measures that should be taken in the future. In this study, three natural forest types with different conifer-broadleaf ratios (dark coniferous forests, spruce-fir mixed forest, and mountain poplar-birch forest) in Liuhe Forest Farm of Zhangguangcailing Mountains were taken as the research objects. Four plots were set up in each stand, a total of 12 plots (50 m×50 m). Based on the background investigation, Winklmass 1.0 software was used to analyze the spatial structure parameters of the stand, including uniform angle index, mingling degree, and neighborhood comparison, and the spatial structure of different stand types was analyzed. Results demonstrated that: (1) The zero-element distribution of the spatial structure parameters of the selected stand showed that different stand types were mildly clustered and in a well-mixed medium growth state, while the spruce-fir mixed forest had a higher degree of isolation than the other two stand species. The mingling degree of this stand was 0.9% higher than that of the mountain poplar-birch forest and 4.1% higher than that of the dark coniferous forest. (2) The univariate distribution showed that most trees in different forest types showed a random distribution with strong mixing and a similar size ratio. (3) Binary and ternary distributions showed that most trees in different forest types were randomly distributed when the spatial structure parameters were combined. Under the same distribution pattern, the dark coniferous forest and mountain poplar-birch forest are dominated by the sub-dominant random distribution of highly mixed, while the spruce-fir mixed forest is dominated by the dominant random distribution of highly mixed. In summary, the overall situation of forest structure in Zhangguangcailing Mountains is relatively general, but the spatial structure of spruce-fir mixed forest is better than that of dark coniferous forest and mountain poplar-birch forest. The community stability of spruce-fir mixed forest is the highest, the vertical gradient distribution is more complex, the biomass and species diversity are more abundant, and it has more significant advantages in promoting the growth of dominant tree species. In order to make the forest's ecological function play an effective role, we suggest that we should use multivariate distribution to select forest harvesting methods and optimize the spatial structure of stands. At the same time, we should selection felling the absolute inferior trees ( $M=0$ ,  $W=1$ ,  $U=1$ ) that are very concentrated in the same species in the stands, and carry out sanitary cutting on the absolute inferior trees ( $M=0$ ,  $W=0.5$ ,  $U=1$ ) that are randomly distributed in the same species.

**Key Words:** Zhangguangcailing Mountains; needle-width ratios; natural forests; spatial structure characteristics; multivariate distribution; forest management measures

森林演替的最终方向是以地带性优势树种所主导的森林群落结构,但是由于气候、土壤等因素的差异性,其演替速率和演替过程会有所不同,主要表现于针叶树和阔叶树在林分结构中的状态等<sup>[1]</sup>。林分内针叶树和阔叶树的比例是森林结构稳定性以及功能多样性的影响因素之一。多项研究证明针阔混交林的生态系统结构相较于纯针叶林和纯阔叶林更加稳定<sup>[2]</sup>。例如针阔混交林的土壤有效养分含量高于针叶林、阔叶林<sup>[3]</sup>,且在不同林分中,细根生物量的分布在阔阔混交林、针阔混交林、阔叶纯林、针叶纯林中逐步递减<sup>[4]</sup>。东北地区人工林大多属于单一针叶林,且东北地区存在很多过熟林,通过分析天然林林分的空间结构,利用近自然经营理念建议我们遵循天然林发展规律来制定相应的抚育措施,因而针对不同针阔比天然林林分稳定性的研究十分必要。

森林中树种组成、大小、林分空间结构和空间点格局等是对森林结构稳定性最直观和最常用的评估指标<sup>[5-6]</sup>。森林空间结构与森林生态系统功能紧密相连<sup>[7]</sup>,它不仅能够反映出林分的稳定性,还可以预测林分的发展趋势<sup>[8]</sup>。而林分空间结构特征是惠刚盈<sup>[9]</sup>提出的一种通过分析对象木与邻木之间的关系来描述林分空间结构的方法,映射了森林中树木空间分布状态以及种间关联多样性<sup>[10]</sup>。并且它能够对森林生态系统结构和功能的稳定性与多样性进一步的评价,助力森林可持续发展<sup>[11]</sup>。其参数主要包括角尺度,混交度,大小比数,并且空间结构参数的多元分布可以获得更多的森林空间结构信息<sup>[12]</sup>。在目前对于空间结构的研究发

现,一元及二元分布的结构参数并不能够得到林分整体的状况,三元分布的结构参数可以更加深入了解林分的空间结构。因而空间结构特征是评价森林结构稳定性和预测森林未来发展方向的有效指标体系<sup>[13-17]</sup>。

本研究以张广才岭柳河林场 3 种不同针阔比天然林林分类型,即针叶林(暗针叶林)、阔叶林(山地杨桦林)和针阔混交林(云冷杉针阔混交林)为研究对象,采用角尺度,混交度,大小比数 3 种空间结构参数的多元分布,阐释不同针阔比天然林林分生态系统结构稳定性,并提出相应的抚育建议,为科学预测林分的演替趋势及可持续经营提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究地点位于黑龙江省牡丹江海林市柳河林场,地理坐标为 130°31'—130°50'E,48°3'—48°21'N。该地区属于长白山系张广才岭东南坡,平均海拔 801.03m。气候为温带大陆性季风气候,年平均气温 2.0℃,年平均降水量 560mm,植被类型是以红松(*Pinus koraiensis*)和臭冷杉(*Abies nephrolepis*)为主要优势树种的针阔混交林,其他树种有鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*),白桦(*Betula platyphylla*),花楷槭(*Acer ukurunduense*),青楷槭(*A. tegmentosum*),色木槭(*A. mono*),山杨(*Populus davidiana*),紫椴(*Tilia amurensis*),钻天柳(*Salix arbutifolia*),榆树(*Ulmus pumila*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置及调查

2024 年 5 月,根据大海林林业局提供的基础资料以及全面踏查,筛选了红松(*Pinus koraiensis*)占比大于 30%的柳河林场 340 林班的天然林设置样地。踏查选择暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林的区域,在区域内分别设置 4 个 50m×50m 的样地,共计 12 块样地。对样地内胸径 $\geq 2$ cm 的乔木进行每木检尺,使用超声波测高测距仪(Vertex IV,瑞典,hagolf 公司)测定树高,利用网格法记录每棵树在样地中的坐标,并记录树种、胸径等信息。使用 GPS 测定海拔等指标。样地概况见表 1。

表 1 研究样地基本概况

Table 1 Basic characteristics of the three sampling plots

林分类型 Forest type	样地号 Plot number	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	林分密度 Stand density/ (株/hm <sup>2</sup> )	树种组成 Tree species composition	针阔比例 Needle-width ratio
暗针叶林 Dark coniferous forests	1	786.52±3.1	30—36	东北	11.18	11.7	1700	3 冷 2 白 1 红 1	6.1:3.9
	2				8.67	9.4	1668	云 1 紫 1 落+枫	
	3				10.33	11.17	1664	+糠+槭-榆	
	4				10.22	11.2	1700		
云冷杉针阔混交林 Spruce-fir mixed forest	1	801.62±4.9	38—46	东北	9.34	9.78	2284	2 糠 2 冷 1 白 1	5.1:4.9
	2				9.45	9.2	1960	云 1 红 1 槭+紫	
	3				9.09	9.21	2144	+落+杨-枫-楸	
	4				9.01	10.28	2380		
山地杨桦林 Mountainous poplar-birch forest	1	815.53±3.37	42—53	东北	8.08	8.47	2888	2 糠 2 白 2 冷 1	2.4:7.6
	2				7.87	8.65	2472	杨 1 枫 1 紫+云	
	3				8.71	8.58	2620	+红+紫-楸-柳	
	4				7.72	7.9	2896		

红:红松 *Pinus koraiensis*;冷:臭冷杉 *Abies nephrolepis*;白:白桦 *Betula platyphylla*;云:红皮云杉 *Picea koraiensis*;紫:紫椴 *Tilia amurensis*;落:落叶松 *Larix gmelinii*;枫:枫桦 *Betula costata*;糠:糠椴 *Tilia mandshurica*;槭:青楷槭 *Acer tegmentosum*;榆:榆树 *Ulmus pumila*;杨:山杨 *Populus davidiana*;楸:胡桃楸 *Juglans mandshurica*;柳:钻天柳 *Salix arbutifolia*

### 2.2 林分空间结构参数计算

为了更加清晰地描述张广才岭不同针阔比天然林林分空间结构特征,本文以林分内任意树木为目标树,

将其与周围 4 株最近相邻树组成一个林分空间结构单元,将其定为基本林分空间结构单元<sup>[18]</sup>,通过分析角尺度( $W$ )<sup>[19]</sup>,混交度( $M$ )<sup>[20]</sup>,大小比数( $U$ )<sup>[21]</sup>来描述林分空间结构特征。其中  $i$  为目标树, $j$  为相邻树。具体计算公式见表 2。

### 2.3 数据处理

本文利用林分空间分析软件 Winklmass 1.0,将样地内不同针阔比天然林林分空间结构参数进行计算。应用 Excel 2021 软件进行数据分析,运用 SPSS 22.0 对不同针阔比例林分的空间结构参数进行单因素方差分析,使用 Origin 2024 进行绘图。显著性水平  $\alpha$  设为 0.05。

表 2 空间结构参数公式及其等级划分

参数 Parameter	公式 Formula	等级 Classification				
		0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
角尺度 $W$ Uniform angle index	$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 Z_{ij}$	非常均匀	均匀	随机	聚集	非常聚集
混交度 $M$ Mingling degree	$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 Z_{ij}$	零度	弱度	中度	强度	极强度
大小比数 $U$ Neighborhood comparison	$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 Z_{ij}$	优势	亚优势	中庸	劣势	绝对劣势

$W$ :角尺度 Uniform angle index; $M$ :混交度 Mingling degree; $U$ :大小比数 Neighborhood comparison; $i$ :目标树 Goal tree; $j$ :相邻树 Adjacent tree

## 3 结果与分析

### 3.1 零元分布

不同针阔比天然林林分类型空间结构,即平均角尺度、混交度和大小比数均处于相似水平(表 3)。角尺度值均偏离最适经营范围(0.475—0.517),说明不同林分类型整体呈现轻度聚集分布。混交度值介于 0.50—0.75 之间,表明林分处于中度与强度混交状态,且偏向强度混交。大小比数接近 0.5,说明林分整体处于中等生长状态。这些结果共同揭示了不同针阔比天然林在结构上的相似性及整体生长状况。

表 3 不同针阔比天然林林分的零元分布

林分类型 Forest type	空间结构参数 Spatial structure parameter		
	$W$	$M$	$U$
暗针叶林 Dark coniferous forests	0.5883	0.6724	0.4987
云冷杉针阔混交林 Spruce-fir mixed forest	0.5581	0.7134	0.5042
山地杨桦林 Mountainous poplar-birch forest	0.5400	0.7041	0.497

### 3.2 一元分布

#### 3.2.1 角尺度

不同针阔比天然林林分类型在空间结构分布上呈现相似的趋势(图 1),其角尺度均服从相对正态分布,在角尺度取值为 0.5 时,不同林分类型占比频率均达到峰值,暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林的占比分别为 55.46%,56.59%,53.34%;在  $W=0$  时,不同林分类型占比频率均不足 1%,表明林分中林木大多处于随机分布状态,另外,当  $W$  取值为 0.25,0.75 和 1 时,不同林分类型聚集程度有所差异,暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林的占比频率分别为 44%,42.9%,46.33%,呈现一种先下降后上升的趋势。进一步说明了生态系统中林木分布的复杂性和非随机性。

#### 3.2.2 混交度

不同针阔比天然林林分类型混交状态比例较为相近(图 1),随着混交度数值的增加,不同林分类型的占比

频率也呈现出增长的趋势,其混交状态大都处于强度与极强度,占比分别为 60.11%,66.25%,65.81%,此分布格局不仅表明了林分空间结构参数与林分类型之间的变化,也进一步呈现出树种多样性与林分类型之间的关系。

### 3.2.3 大小比数

不同针阔比天然林林分类型生长状态比例较为相似(图 1),整体趋势呈现均衡性,其中大小比数取值为 0 时,各个林分类型有所差异,暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林所占据的比例分别为 19.85%,19.83%,29.74%,山地杨桦林数值显著高于其他林分类型林木占比,这一现象体现了植物在海拔相对较高区域在特定条件下具有一定的生长优势。

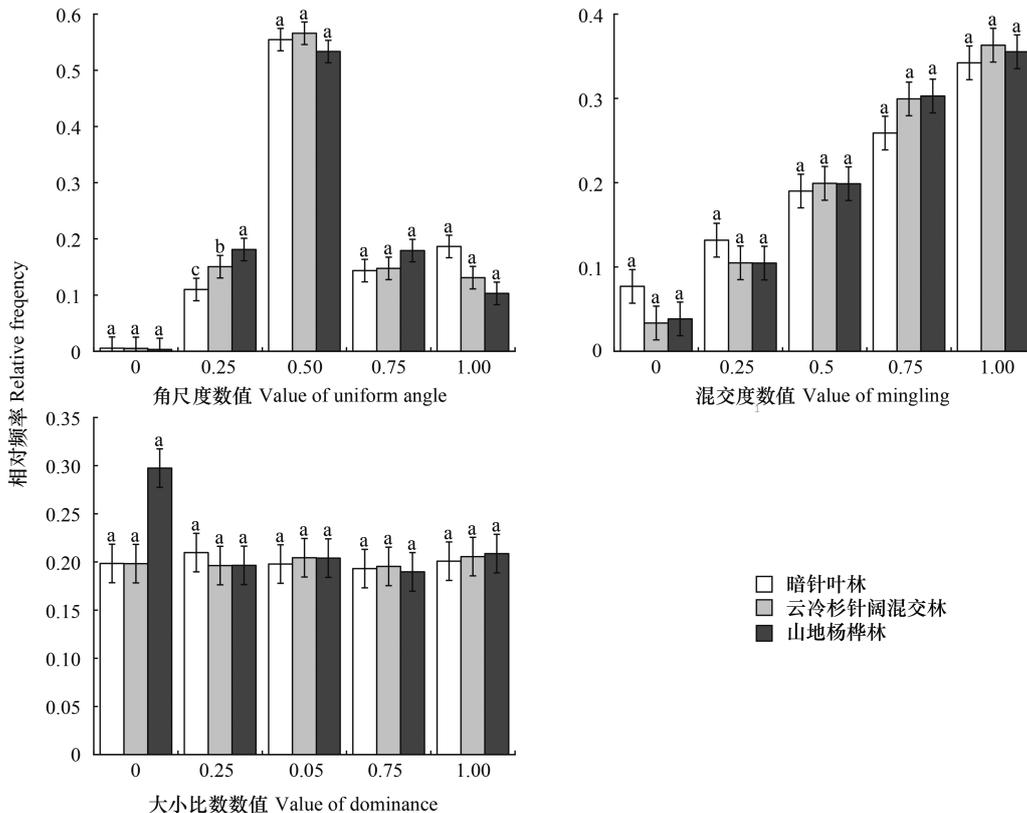


图 1 不同针阔比天然林林分角尺度、混交度、大小比数的一元分布

Fig.1 Unary distribution of stand angle scale, mingling degree and neighborhood comparison of natural forests with different coniferous-broadleaved ratios

不同针阔比天然林林分在同一等级的林分空间结构差异比较,不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

### 3.3 二元分布

将 3 个空间结构参数中的 2 个结构参数合并,得到均匀角度-优势指数( $W-U$ )、混合-优势指数( $M-U$ )、均匀角度-混合指数( $W-M$ )3 个指标。为了得到空间结构参数的双变量分布,将每种组合中树木的相对频率作为 Z 轴,将两种组合的两个结构参数的值作为 X 轴和 Y 轴(图 2)。

#### 3.3.1 角尺度——大小比数

角尺度与大小比数二元分布,不同针阔比天然林林分类型在大小比数数值保持不变的情况下,频率随着角尺度的取值先升高后降低,在  $W=0.5$  时,频率达到最高,符合相对正态分布,在角尺度为某一固定值时,频率随大小比数的升高呈现上升趋势,暗针叶林、山地杨桦林在  $W=0.5$  时, $U$  的变化为先升高再降低再升高,云冷杉针阔混交林在  $W=0, 0.25$  时, $U$  的变化为先下降后上升,其他取值范围均呈现先上升后降低,暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林中处于随机分布( $W=0.5$ )以及优势木较高( $U=0$ )的占比分别为 9.86%, 11.26%, 10.29%。

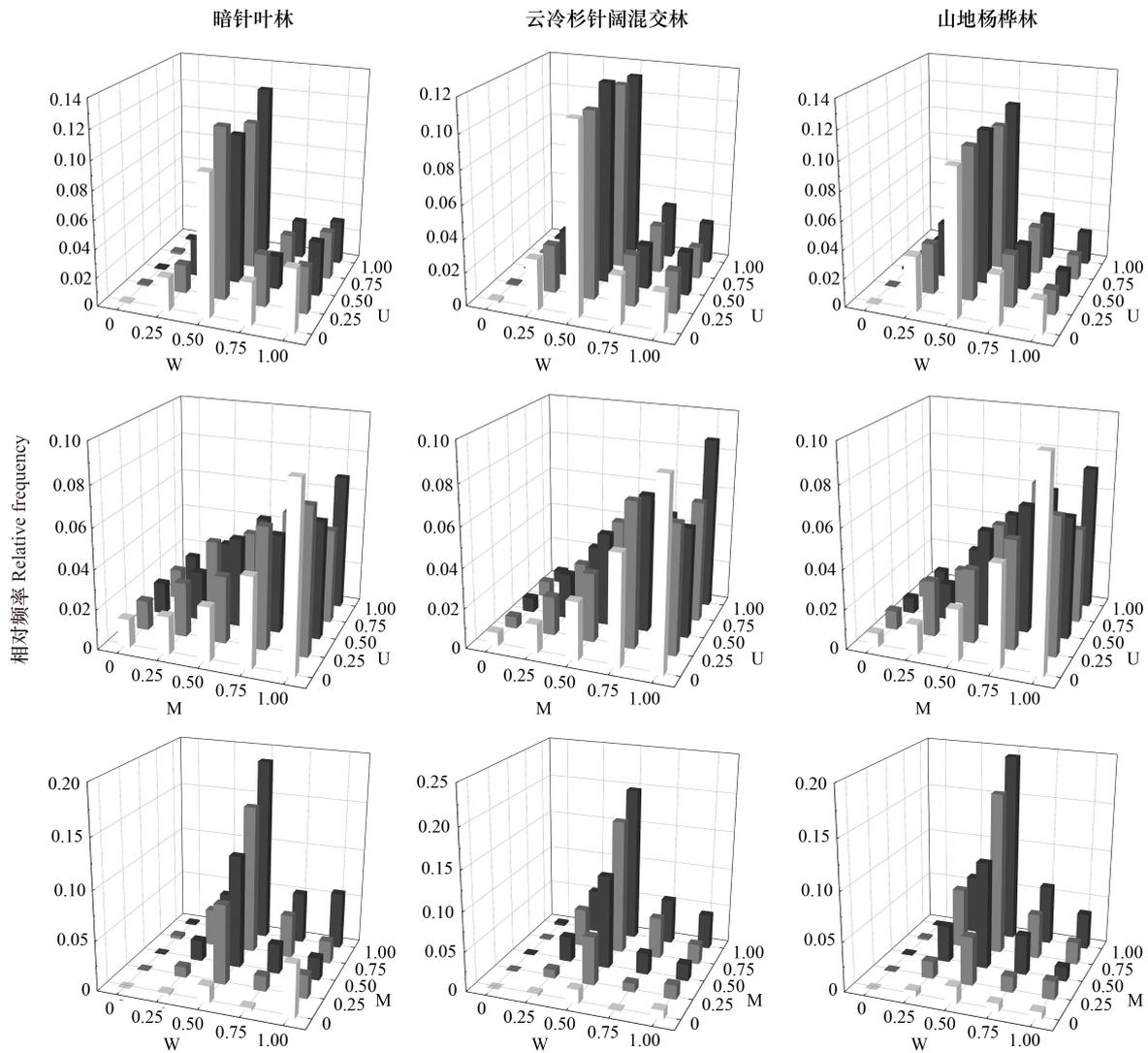


图2 不同针阔比天然林林分角尺度、混交度、大小比数的二元分布

Fig.2 Binary distribution of stand angle scale, mingling degree and neighborhood comparison of natural forests with different coniferous-broadleaved ratios

### 3.3.2 混交度——大小比数

混交度与大小比数二元分布,不同针阔比天然林林分类型林木在大小比数数值保持不变的情况下,频率随着混交度的取值逐渐升高,在混交度取值为1时,不同林分类型占比频率随着大小比数的增加均呈现先降低再升高的趋势,其他取值范围内呈现先上升后下降再升高的趋势,暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林中处于高度混交( $M=1$ )以及优势木较高( $U=0$ )的占比分别为9.2%,9.3%,10.29%。

### 3.3.3 角尺度——混交度

角尺度与混交度二元分布,暗针叶林混交度取值为0时,角尺度呈现先上升后下降再上升的趋势,其他取值范围均呈现先上升后下降趋势,云冷杉针阔混交林、山地杨桦林的混交度频率随着角尺度的数值增加而呈现先增加后降低的趋势,不同林分类型均在 $W=0.5$ 时,达到最高。在角尺度取值相同的情况下,混交度等级呈现逐渐上升趋势,不同林分类型所占频率最高的组合均为( $W=0.5, M=1$ ),暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林所占频率分别为18.83%,19.93%,19.41%。

### 3.4 三元分布

由图3可知,在角尺度和大小比数取值不变的情况下,不同林分类型林木均随着混交度的升高呈现上升

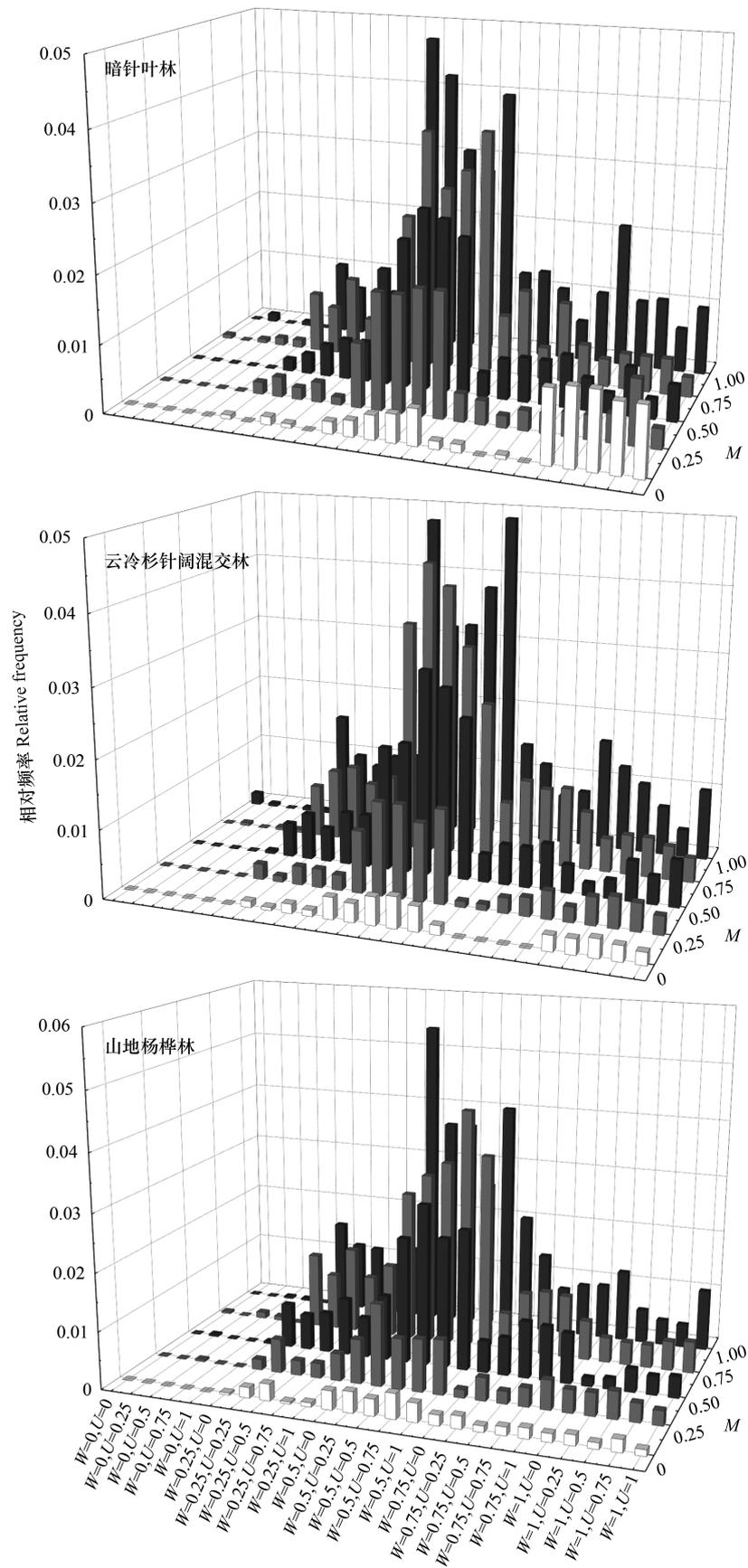


图 3 不同针阔比天然林分角尺度、混交度、大小比数的三元分布

Fig.3 Ternary distribution of stand angle scale, mingling degree and neighborhood comparison of natural forests with different coniferous and broad-leaved ratios

趋势;在角尺度和混交度取值不变的情况下,不同林分类型林木在不同大小比数下基本相同;在混交度和大小比数取值不变的情况下,不同林分类型林木均随着角尺度的升高呈现先上升后下降的趋势,并且树木处于随机分布( $W=0.5$ )时,处于优势状态的混交株树占比最大,林分所占频率最高组合均为( $W=0.5, U=0$ ),暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林占比分别为 4.75%, 5.4%, 4.79%。

#### 4 讨论

林分空间结构特征不仅对森林资源的分配有着重要的影响,也与树种的生长有着密切的联系<sup>[22-23]</sup>。向钦<sup>[24]</sup>等利用空间结构参数分析空间尺度对林分空间结构以及物种多样性的变化,最终得出不同空间尺度的空间结构参数与物种多样性的联系,能够进一步提升林分的质量,促进林分的演替。而传统的零元分布与一元分布只能够从宏观的角度对林分空间结构进行分析,无法得到更加全面,直观的结果<sup>[25]</sup>。有些研究使用二元分布<sup>[26-29]</sup>来进行分析,也存在局限性,因为林分空间结构特征三个参数分别描述了不同林分结构特征,其中大小比数能说明林木分化程度<sup>[21]</sup>,角尺度能说明林木个体分布格局<sup>[19]</sup>,混交度能说明不同树种间的隔离程度<sup>[20]</sup>。零元及一元分布仅仅从一个空间结构参数进行分析,二元分布也只能将两个参数进行结合。基于此本研究采用空间结构参数的零元到三元分布对林分进行研究,以求更加直观全面地了解林分的空间结构。

针阔比例的不同会导致林木空间生态位及生长竞争动态有较大差异,这主要是由林分空间结构所决定<sup>[30]</sup>。本研究对张广才岭柳河林场 3 种不同针阔比天然林林分类型空间结构参数进行详细分析,从零元分布特征来看,不同林分类型整体上处于中度与强度混交之间,呈中等轻度聚集分布状态。该结论与韩金<sup>[31]</sup>、和敬渊<sup>[8]</sup>等研究结果一致,这是由于本研究与其他两位学者的研究对象均为天然林,在资源的介导下,物种的生物学特性及其在林分内的生态位决定了林分结构的复杂性。综上,可以认为中强度混交和轻度聚集是天然林的常见零元空间结构特征。零元分布从整体上说明了林分的空间结构特征,而一元分布可以从个体水平上的情况对林分空间结构特征分析。从一元分布特征来看,不同林分类型树木以随机分布为主,且各个林分的混交状态均在取值为 1 时,达到最高,说明林分趋于强度混交,这与我们在零元分布结论一致。林分林木在随机分布( $W=0.5$ )时达到峰值,且相对频率均大于 55%,聚集分布与非聚集分布的比例为 6:4,该结论与柏云龙等<sup>[32]</sup>研究结果一致,这可能是因为林木在生长发育期间生存策略不同<sup>[33]</sup>,林木聚集分布区域水源、土壤营养含量较为肥沃,此时物种间竞争较为激烈,促进了林木间的共生关系。从二元分布特征来看,不同林分类型均以高度混交且优势木较高的状态为主,林木分布状态则以随机分布最为常见,此外,在同一生长状态下,云冷杉针阔混交林林分随机分布且高度混交树木( $W=0.5, M=1$ )的比例最高,说明该林分垂直梯度分布较为复杂,除优势木外,还存在较多的林冠下层木,生物量及物种多样性较为充足。并且该林分优势树种尚未形成明显的主导地位,林分群落竞争强度更加激烈。从三元分布特征来看,不同林分类型林木在相同混交度,同一生长状态的情况下,多以随机分布为主,而在同一分布格局下,暗针叶林、山地杨桦林均以高度混交的亚优势随机分布状态为主,而云冷杉针阔混交林以高度混交的优势随机分布为主。因此云冷杉针阔混交林的森林群落稳定性最高,并且在促进优势树种生长方面可能具有更为显著的优势,该结论与张梦弢等<sup>[34]</sup>研究结果一致,基于前人研究,针阔混交林中具有更高的土壤养分有效性,更为复杂和稳定的空间结构<sup>[2-3]</sup>。

通过对张广才岭柳河林场 3 种不同针阔比天然林林分类型空间结构参数进行多元分布分析,能够对其林分空间结构进行评价。从森林群落稳定性角度出发,在进行森林经营时,应参考林分空间结构参数对林分制定相应的抚育措施,对林分结构进行优化调整<sup>[35-37]</sup>,促进林分天然更新。本研究结果显示,林分密集程度为山地杨桦林>云冷杉针阔混交林>暗针叶林,暗针叶林属于演替后期阶段,其密集程度与山地杨桦林、云冷杉针阔混交林相比来说较低,原因可能是在演替过程中发生林分自疏,使得林分冠层结构发生改变,导致密集程度降低。该结论与王宇<sup>[38]</sup>等研究结果一致。而山地杨桦林属于演替先锋阶段,云冷杉针阔混交林属于演替中期阶段,两种林分类型密集程度均较高,即上层树冠连接紧密,导致光照资源利用不充分,影响下层木生长。建议对林分内山地杨桦林及云冷杉针阔混交林的上层木进行合理疏伐,改善林分结构,调整林分密度,优化森

林内部垂直分布格局。这样可以获得较多的光照辐射,调控植物生理节律,促进植物生长发育<sup>[39]</sup>。空间结构参数组合为零度混交,非常聚集,绝对劣势( $M=0, W=1, U=1$ )的林分空间结构最不合理,应对上述组合单元的林木进行择伐,而我们所选择的暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林中该组合占据比例分别为 1.01%、0.18%、0.98%。对林分中处于结构参数组合为零度混交,随机分布,绝对劣势( $M=0, W=0.5, U=1$ )的林木进行卫生伐,其中暗针叶林、云冷杉针阔混交林、山地杨桦林中该组合占据比例分别为 0.53%、0.36%、0.48%。同时,还应对林分密度较大的林木进行透光伐,促进林冠下层木生长发育,采伐工作要遵循少量多次,达到调整林分密度,优化林分结构的目的。

## 5 结论

基于对张广才岭不同针阔混交比例林分类型空间结构特征分析,该区域林分空间结构整体来说较为一般,空间结构优势程度为云冷杉针阔混交林>山地杨桦林>暗针叶林。鉴于此,需要对该林分进行抚育管理,建议对林分中处于同种非常聚集的绝对劣势木( $M=0, W=1, U=1$ )进行择伐,对处于同种随机分布的绝对劣势木( $M=0, W=0.5, U=1$ )进行卫生伐。此研究也证明森林通过空间结构特征对维持森林稳定性提出了具体的抚育措施,应在林业措施中得到进一步的推广和应用。

## 参考文献(References):

- [1] 宋永冒,王祥荣. 浙江天童国家森林公园的植被和区系. 上海:上海科学技术文献出版社,1995.
- [2] 陈睿,汤孟平. 天目山针阔混交林与常绿阔叶林的空间结构比较. 林业科学, 2023, 59(5): 21-31.
- [3] 李鹏,刘晓君,刘苑秋,张志坚,莫兴悦,肖廷琦. 退化红壤区不同植被恢复模式的土壤养分空间分布特征. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 113-124.
- [4] 王帅康,栾军伟,王树梅,尤业明,贺名霞,黄海梅,黄雪蔓. 不同树种混交模式对南亚热带人工林细根生物量的影响. 广西科学, 2024, 31(4): 808-820.
- [5] Zhang G Q, Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, Wang H X, Liu W Z, Zang R G. Composition of basal area in natural forests based on the uniform angle index. Ecological Informatics, 2018, 45: 1-8.
- [6] Lei X D, Wang W F, Peng C H. Relationships between stand growth and structural diversity in spruce-dominated forests in New Brunswick, Canada. Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(10): 1835-1847.
- [7] 张岗岗,刘瑞红,惠刚盈,张弓乔,赵中华,胡艳波. 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. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 21-31.
- [8] 和敬渊,王新杰,王开,郭韦韦,刘丽,王福增. 杨桦次生林林分空间结构参数多元分布研究. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 22-33.
- [9] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 1-9.
- [10] 赵中华,惠刚盈. 林分结构多样性研究进展. 林业科学, 2020, 56(9): 143-152.
- [11] Dangal S P, Das A K, Paudel S K. Effectiveness of management interventions on forest carbon stock in planted forests in Nepal. Journal of Environmental Management, 2017, 196: 511-517.
- [12] 张慧东,毛沂新,王睿照,朱健,夏杭,于大炮,尤文忠. 辽东山区次生蒙古栎成熟林空间结构及个体竞争特征. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2492-2500.
- [13] 武秀娟,奥小平,赵育鹏,崔雪晴. 芦芽山阴坡华北落叶松-云杉天然次生林林分空间结构特征. 浙江农林大学学报, 2021, 38(1): 58-64.
- [14] 黄晓霞,尤美子,徐伟涛,赖敏华,林嘉源,赖日文. 目标树经营对杉木人工林林分空间结构的影响. 森林与环境学报, 2022, 42(2): 131-140.
- [15] 张利利,谭新建,姚甲宝,李翱翔,葛晓宁. 间伐强度对萌芽杉木——木荷混交林空间结构的影响. 东北林业大学学报, 2022, 50(1): 1-6.
- [16] 袁梓馨,郭秋菊,艾训儒,姚兰,朱江,王蕾,向钦. 金子山国有林场 4 种典型林分空间结构综合评价. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 928-938.
- [17] 王亚飞,蒋乙东,段文标,朱海嫒,王秋宇. 小兴安岭南部分 2 种红松天然林优势树种的空间结构和生态位特征. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(10): 117-128.
- [18] Wang H X, Peng H, Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H. Large trees are surrounded by more heterospecific neighboring trees in Korean pine broad-

- leaved natural forests. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9149.
- [19] 惠刚盈. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数. *林业科学*, 1999, 35 (1): 37-42.
- [20] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究. *林业科学研究*, 2001, 14 (1): 23-27.
- [21] 惠刚盈, Klaus von Fadow, Matthias Albert. 一个新的林分空间结构参数——大小比数. *林业科学研究*, 1999, 12 (1): 1-6.
- [22] 万盼, 刘文楨, 刘瑞红, 王鹏, 王宏翔, 惠刚盈. 结构化经营对栎松混交林林分空间结构及稳定性的影响. *林业科学*, 2020, 56 (4): 35-45.
- [23] 张向龙, 王冰, 张秋良. 内蒙古大兴安岭白桦次生林空间结构特征. *林业资源管理*, 2021, 50 (5): 80-86.
- [24] 向钦, 郭秋菊, 艾训儒, 姚兰, 朱江, 薛卫星, 周云, 赵免敦, 吴举扬. 林分空间结构与物种多样性随空间尺度变化的规律研究. *林业科学研究*, 2022, 35 (3): 151-160.
- [25] Pommerening A, Biber P, Pretzsch H, Stoyan D. Neue methoden zur analyse und charakterisierung von bestandesstrukturen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt Vereinigt Mit Tharandter Forstliches Jahrbuch*, 2000, 119 (1): 62-78.
- [26] Li Y F, Ye S M, Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H. Spatial structure of timber harvested according to structure-based forest management. *Forest Ecology and Management*, 2014, 322: 106-116.
- [27] 彭辉, 周红敏, 惠刚盈. 萌生杉木林空间结构的二元分布特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41 (4): 136-140.
- [28] 张岗岗, 王得祥, 柴宗政, 朱红燕, 张丛珊. 秦岭中段华北落叶松人工林空间结构的二元分布特征. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2014, 42 (9): 33-40.
- [29] 赖阿红, 巫志龙, 周新年, 周成军, 刘富万, 苏春敏. 杉阔混交林择伐空间结构二元分布特征. *森林与环境学报*, 2015, 35 (4): 337-342.
- [30] 郑丽凤, 周新年, 江希钿, 官印生, 杨荣耀, 巫志龙. 松阔混交林林分空间结构分析. *热带亚热带植物学报*, 2006, 14 (4): 275-280.
- [31] 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. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39 (1): 58-63.
- [32] 柏云龙, 刘华, 白志强, 刘贵峰, 郭仲军, 韩燕梁. 天山云杉天然林群落空间结构异质性分析. *植物科学学报*, 2012, 30 (6): 552-557.
- [33] 余泉, 欧阳勋志, 潘萍, 邓文平, 彭松立, 臧颢, 胡茸茸. 庐山常绿阔叶林不同生长阶段林木空间结构特征及其评价. *北京林业大学学报*, 2022, 44 (12): 32-40.
- [34] 张梦弢, 张青, 亢新刚, 杨应军, 徐光, 张立新. 长白山云冷杉林不同演替阶段群落稳定性. *应用生态学报*, 2015, 26 (6): 1609-1616.
- [35] 姜明华, 杨同辉, 王卫兵, 毛建方, 徐婧, 章建红. 四明山黄山松针阔混交林林分空间结构参数多元分布特征. *林业与环境科学*, 2023, 39 (4): 12-20.
- [36] 魏红洋, 董灵波, 刘兆刚. 大兴安岭主要森林类型林分空间结构优化模拟. *应用生态学报*, 2019, 30 (11): 3824-3832.
- [37] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 刘兆刚. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素. *应用生态学报*, 2021, 32 (8): 2763-2772.
- [38] 王宇, 王冬梅, 王彦辉, 云慧雅, 张梦棋, 张莹莹. 黄土高原退耕刺槐中龄林密度和空间结构对灌草多样性的影响. *生态学报*, 2025, 45 (2): 822-836.
- [39] 张志, 张梦弢, 申欢欢, 张煜苑. 关帝山云杉次生林冠层结构对天然更新的影响. *生态学杂志*, 2023, 42 (5): 1043-1048.