

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210280

# 长白山天然云冷杉针阔混交林主要树种胸径生长与林分空间结构的关系

谢伊 杨华

(北京林业大学林学院, 北京林业大学国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心, 北京 100083)

**摘要:**【目的】混交林的稳定性、发展的可能性与空间结构密切相关, 探究空间结构对林分生长量的影响对促进林分良性发展有着重要作用。本研究以天然云冷杉针阔混交林为对象, 分析混交度( $M$ )和大小比数( $U$ )对单木生长量的影响, 以期为该地区天然林分结构调整提供科学依据和指导。【方法】选用2块云杉蓄积占总蓄积比例分别为0.1~0.2(1成云, 1P)和0.4(4成云, 4P)固定样地的5期监测数据, 采用4株相邻木法计算空间结构三参数, 绘制多元分布图, 分析了1P和4P内各径级云杉、臭冷杉和红松在不同混交度和大小比数的胸径生长量变化规律。【结果】1P和4P均介于中度和强度混交( $M$ 分别为0.625和0.657)且呈随机分布; 臭冷杉和红松的生长介于亚优势至中庸状态间( $U=0.25\sim0.50$ ), 云杉在4P内介于亚优势至中庸状态间( $U=0.48$ ), 在1P内介于中庸至劣势状态间( $U=0.70$ )。云杉和臭冷杉的年胸径生长量随径级的增大而增大( $P<0.05$ ); 随对象木混交度的增大而增大, 其中小径级云杉和大中小径级臭冷杉与混交度呈显著相关( $P<0.05$ ); 云杉、臭冷杉和红松的年胸径生长量随对象木大小比数的增大而减小, 其中中径级木与大小比数呈显著相关( $P<0.05$ )。云杉在1P内的年胸径生长量低于4P, 红松相反。【结论】不同径级下林木的生长具有显著差异, 降低大小比数的同时适当提高混交度有利于林木的胸径生长。不同生长阶段的竞争不同导致了不同径级林木对混交度和大小比数响应的差异, 故针对不同生长阶段的林木应采取不同的经营措施调整优化林分结构, 促进林分长期的稳定发展。

**关键词:** 云冷杉林; 胸径生长量; 空间结构; 径级; 大小比数; 混交度

中图分类号: S758.5\*2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2022)09-0001-11

引文格式: 谢伊, 杨华. 长白山天然云冷杉针阔混交林主要树种胸径生长与林分空间结构的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(9): 1-11. Xie Yi, Yang Hua. Relationship between stand spatial structure and DBH increment of principal species in natural spruce-fir mixed forest in Changbai Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(9): 1-11.

## Relationship between stand spatial structure and DBH increment of principal species in natural spruce-fir mixed forest in Changbai Mountains of northeastern China

Xie Yi Yang Hua

(School of Forestry, Research Center of Forest Management Engineering Technology, National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The stability and development possibility of mixed forest are closely related to its spatial structure. Exploring the influence of spatial structure on stand growth plays an important role in promoting the benign development of forest. [Method] Based on the 5 periods of monitoring data of two fixed sample plots, the proportion of spruce (*Picea jezoensis*) accumulation in the sample plot was 0.1-0.2

收稿日期: 2021-07-29 修回日期: 2021-08-22

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0504101)。

第一作者: 谢伊。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: 876073632@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者: 杨华, 教授。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: huayang8747@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

and 0.4, respectively, which were recorded as 1P and 4P. The three parameters of spatial structure were calculated by 4 adjacent tree methods, and the multivariate distribution map was drawn. The changes of DBH increment of spruce, fir (*Abies nephrolepis*) and Korean pine (*Pinus koraiensis*) under different diameter classes, mingling degrees and neighborhood comparison in 1P and 4P were compared and analyzed. [Result] 1P and 4P were both medium and strong mixed ( $M$  was 0.625 and 0.657, respectively) and randomly distributed. The growth of fir and Korean pine was between sub-dominant state and median state ( $U = 0.25 - 0.50$ ), the growth of spruce was between sub-dominant state and median state ( $U = 0.48$ ) in 1P, and was between median state and inferior state in 4P ( $U = 0.70$ ). The annual DBH increment of spruce and fir increased with the increase of DBH class ( $P < 0.05$ ) and the mingling degree of subject trees, and the DBH increment of small-diameter spruce and large, medium and small diameter's fir was significantly correlated with mingling degree ( $P < 0.05$ ). The annual DBH increment of spruce, fir and Korean pine decreased with the increase of subject trees' neighborhood comparison, and the correlation between the DBH increment of mid-diameter tree and dominance was significant ( $P < 0.05$ ). The annual DBH increment of spruce in 1P was lower than that in 4P cloud, while that of Korean pines was opposite. [Conclusion] There are significant differences in the growth of trees under different diameter classes. Reducing the neighborhood comparison and appropriately increasing the mingling are beneficial to the DBH growth of trees. The competition in different growth stages leads to the difference in the response of different diameter classes to mingling degree and neighborhood comparison. Therefore, different management measures should be taken to adjust and optimize the stand structure to promote the long-term stable development of stand.

**Key words:** spruce-fir forest; DBH increment; spatial structure; DBH class; neighborhood comparison; mingling degree

林分空间结构指林木个体在水平空间的分布格局及其属性在空间上的排列方式<sup>[1-2]</sup>,影响着林木间的竞争态势及其空间生态位,是林分的稳定性、经营空间的大小和演替方向的表征<sup>[3]</sup>。空间结构决定了林分内光和温度的分布以及气体运动<sup>[4]</sup>,对林木的生长和稳定性等都具有十分重要的影响<sup>[5]</sup>。因此,了解林分动态发育过程,调整林分结构,评价一个林分的空间结构优劣、判断林分质量高低,生长量是一个重要指标之一。研究空间结构对林木生长的影响有助于认识林木生长特征、林木间相互作用,正确描述两者的关系,对合理优化林分结构具有重要意义。

传统研究林分结构方法是以直径结构为基础,直径结构是最基本、最重要的林分结构<sup>[6]</sup>,它直接反映了林分的非空间结构特征<sup>[7-8]</sup>,可用于分析乔木林的结构与生长的关系,如Rubin等<sup>[9]</sup>对阔叶林进行研究,认为直径分布规律可揭示现有林分小径级林木在未来是否可以取代当前林分的大径级林木,并评估林分永续性的潜力。林分内不同直径的林木的空间格局和分配状态直接或间接的影响着树木的树高、材积、干形、树冠及材种等因子的大小<sup>[10]</sup>。异龄混交林中,所有龄级和大小林木在小范围内紧密混合,这意味着各径级的株数分布不仅表征了林分结构,也代表了林分内各树种整个生命周期<sup>[11]</sup>,而林

木大小不同,其生长量也不同。近些年来,许多学者关注林分空间结构特征对树木生长的影响。汤孟平等<sup>[12]</sup>研究发现较高聚集程度、年龄隔离度及较低最邻近竹株数和竞争指数均有利于增加毛竹(*Phyllostachys edulis*)林单位面积生物量;吕延杰等<sup>[13]</sup>研究发现云杉(*Picea jezoensis*)和臭冷杉(*Abies nephrolepis*)处于随机分布时胸径生长量最大,且其随着混交度的增加而增加。目前,关于空间结构对胸径生长量影响的研究多集中于林分某一发展时刻的空间结构对生长量的影响<sup>[13-15]</sup>,而长期森林调查数据提供了林木更准确的生长量及空间结构指标等信息,有助于准确地描述林木生长量与空间结构的关系,另一方面,关于不同径级林木空间结构对林木胸径生长量影响的差异的研究尚少见报道。从空间结构单元尺度探究不同径级间林木胸径生长量变化对林分生长量的研究具有至关重要的作用。本研究利用金沟岭林场天然云冷杉混交林的长期调查数据,采用空间结构参数,结合林分结构特征,分析不同径级和空间结构下胸径生长量的变化规律,以期为该地区天然林空间结构优化、经营、抚育和恢复提供科学依据和指导。

## 1 研究区概况

研究区位于吉林省延边朝鲜族自治州汪清林

业局金沟岭林场(43°17' ~ 48°25' N, 130°05' ~ 130°20'E)。属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉, 林海海拔为 550 ~ 1 100 m, 地貌以低山丘陵为主, 坡度在 5° ~ 25°之间。属季风型气候, 年均气温 3.9 °C 左右, 年降水量为 600 ~ 700 mm, 多集中在 7 月份。研究区森林覆盖率达 98%, 为天然针阔叶混交林, 植被属于长白山区系。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

采用金沟岭林场于 1987 年设定的 2 块云冷杉林固定样地的长期监测数据, 数据记录有树种、胸径、位置等, 起测胸径为 5 cm。两块样地树种组成中云冷杉均共占 7 ~ 8 成, 其中云杉分别占 1 ~ 2 成和 4 成, 即云杉蓄积占总蓄积比例为 0.1 ~ 0.2 和 0.4, 简称为 1 成云(1P)和 4 成云(4P)样地。样地主要树种为云杉、臭冷杉、红松(*Pinus koraiensis*), 其他树种有白桦(*Betula platyphylla*)、枫桦(*Betula costata*)、椴树(*Tilia amurensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)等; 草本以苔草(*Carex tristachya*)和禾本科(*Gramineae*)为主。调查年份及样地概况如表 1。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 林分空间结构参数

研究采用惠刚盈等<sup>[5]</sup>提出的最近 4 株相邻木的林分空间结构分析方法, 以  $n = 4$  作为一个空间结构单元。采用混交度( $M$ )<sup>[16]</sup>、大小比数( $U$ )<sup>[17]</sup>和角尺度( $W$ )<sup>[5]</sup> 3 个林分空间结构参数进行林分空间结构的

分析与评价。采用距离缓冲区法消除边缘效应, 在样地周围设置 5 m 宽的带状缓冲区, 缓冲区内的林木不作为对象木进行计算。

#### 2.2.2 径级划分

采用上限排外法对林分内单木胸径按 2 cm 径阶整化, 并根据观测数据, 参考“森林资源规划设计调查主要技术规定”<sup>[18]</sup>, 将样地内所有乔木划分 5 个等级, 分别为小径级木(径阶为 6 ~ 12 cm)、中径级木(径阶为 14 ~ 24 cm)、大径级木(径阶为 26 ~ 36 cm)和特大径级木(径阶为 38 cm 以上)。

#### 2.2.3 胸径生长量

用固定标准地法, 计算年胸径生长量, 计算公式为:

$$\Delta d = \frac{d_{t+n} - d_t}{n} \quad (1)$$

式中:  $\Delta d$  为年胸径生长量,  $d_t$  为第  $t$  年单木的胸径观测值,  $n$  为观测间隔期。

#### 2.2.4 数据处理方法

通过定株重复观测得到对象木不同年份的胸径生长量与空间结构指标, 区分不同径级、混交度( $M$ )和大小比数( $U$ )的多种组合情况, 绘制多元分布图; 采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)比较不同径级下云杉、臭冷杉和红松的年胸径生长量的差异, 用 Duncan 法进行多重比较( $\alpha = 0.05$ ), 用 Pearson 法对不同径级下混交度及大小比数与年胸径生长量进行相关性分析。

采用 WPS 和 SPSS26 软件对数据进行统计和分析, 林分空间结构参数通过 R 软件的 forestSAS 包<sup>[19]</sup>进行计算, Origin2019 软件绘图。

表 1 云冷杉固定样地情况及云杉比例

Tab. 1 Statistic of spruce-fir fixed sample plots and spruce proportion

样地类型 Sample plot type	面积/hm <sup>2</sup> Area/ha	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree/(°)	调查年份 Survey year	平均胸径 Mean DBH/cm	密度/(株·hm <sup>-2</sup> ) Density/(tree·ha <sup>-1</sup> )	断面积/(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Basal area/ (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	树种组成 Species composition
1P	0.200	700	西北 Northwest	8	1998	20.0	795	25.1	
					2001	20.4	775	25.4	7A1P1PK1B
					2003	20.8	785	26.8	
					2006	21.7	755	27.8	6A2P1PK1B
					2008	22.2	760	29.4	6A1P1PK1B + BC
4P	0.312	780	东北 Northeast	10	2000	19.7	929	28.4	
					2002	19.8	875	26.9	
					2004	20.6	852	28.2	4A4P1PK1BC
					2006	21.1	830	28.9	
					2008	21.6	810	29.7	

注: P. 云杉; A. 臭冷杉; PK. 红松; B. 白桦; BC. 枫桦; 1P 和 4P 分别代表云杉树种组成占 1 到 2 成和 4 成的样地。下同。Notes: P, *Picea jezoensis*; A, *Abies nephrolepis*; PK, *Pinus koraiensis*; B, *Betula platyphylla*; BC, *Betula costata*; 1P and 4P stand for sample plots with the species composition of *P. jezoensis* being 1 to 2 or 4. The same below.

### 3 结果与分析

#### 3.1 林分结构特征

##### 3.1.1 径阶结构

由图1可知, 1P样地的株数密度低于4P样地, 两者径阶分布均为左偏的山状曲线, 大中径级木株数总体呈随径阶增大而减少的趋势, 符合异龄林胸径分布规律。1P样地株数最大值出现在12~16 cm处, 18 cm后曲线剧烈波动, 38 cm后林木株数减少幅度渐趋平缓, 大径级木有缺失现象; 4P样地从12 cm开始, 随径阶的增大株数急剧减少, 18 cm后曲线开始波动, 同样在38 cm后林木株数变化幅度趋于平缓。说明研究区内中小径级木所占比例较高, 而大径级木较少, 特大径级木极少, 4P样地的径阶分布范围略大于1P样地, 说明4P样地的径阶分布范围较广并且连续, 径阶分布较合理, 有利于林分的进一步发展。

##### 3.1.2 径级与树种、空间结构参数的多元分布

1P和4P样地的空间结构差异不大, 且在各调查期间无明显变化。调查初期, 1P及4P样地的平均混交度分别为0.604和0.648, 平均角尺度分别为0.484和0.483; 调查最终期, 两者的平均混交度分别为0.625和0.657, 平均角尺度分别为0.492和0.472; 整体均为中强度混交, 随机分布状态。各调查期, 臭

冷杉和红松及4P样地内云杉的生长均为亚优势至中庸状态( $U=0.25\sim 0.50$ ), 1P样地内云杉为中庸至劣势状态( $U=0.50\sim 0.75$ )。

由图2a可知, 1P样地内臭冷杉的株数远高于云杉和红松, 在小径级木中, 云杉多为强度混交( $M=0.75$ ), 臭冷杉多为弱度混交( $M=0.25$ ), 红松多为极强度混交( $M=1.00$ ), 且各树种株数均随大小比数的增大而增多; 在中径级木中, 云杉和红松多为强至极强度混交( $M=0.75\sim 1.00$ ), 臭冷杉多为弱度混交, 各树种株数按大小比数的分布均近似于正态分布, 即生长为中庸( $U=0.50$ 处)的株数最多, 生长为优势( $U=1.00$ )和绝对劣势( $U=0$ )的株数少; 在大径级木中, 3个树种的株数均在强度混交状态( $M=0.75$ )时最多, 且株数随大小比数的增大而减少; 在特大径级木, 所有林木的生长均为优势。整体来看, 云杉、臭冷杉和红松在1P样地内分布有最多株数的状态分别为处于强度至极强度混交且生长为中庸的小径级木、处于中度混交且生长为优势的大径级木, 处于强度至极强度混交且生长为中庸的中径级木。

由图2b可知, 4P样地内, 云冷杉株数较多, 红松株数较少, 在小径级木中, 3个树种均在强度混交状态下的株数最多, 且各树种株数均随着大小比数的增大而增多; 在中径级木中, 云杉多为强度混交,

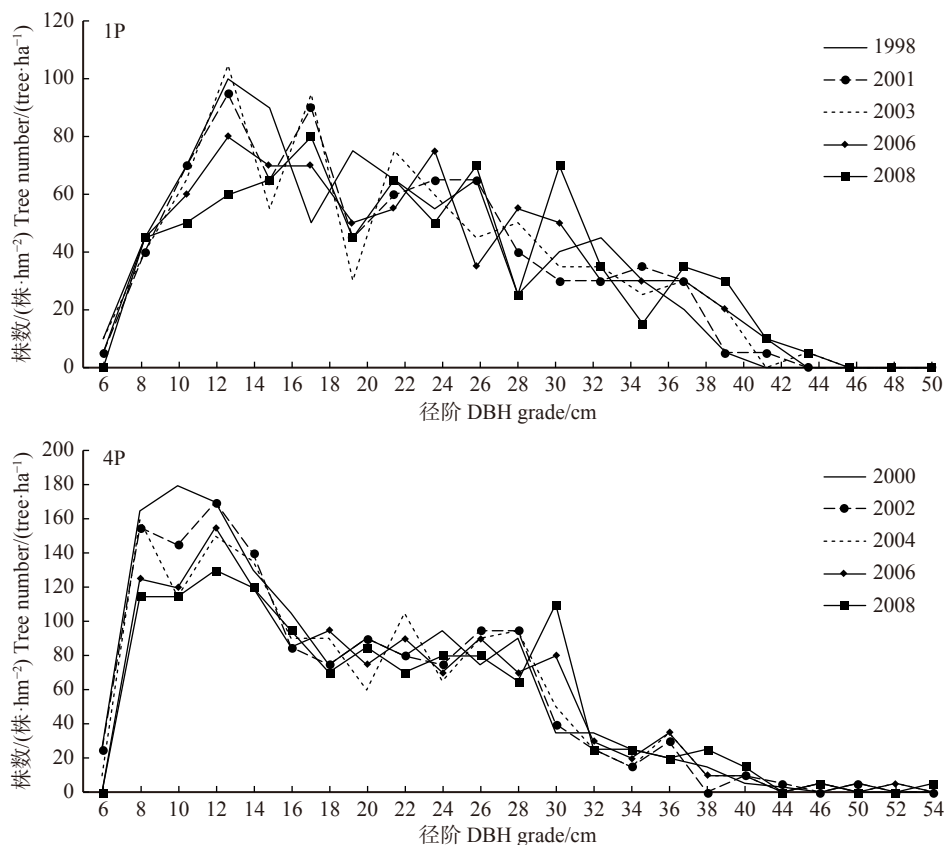


图1 1P及4P的径阶分布

Fig. 1 DBH grade distribution of 1P and 4P

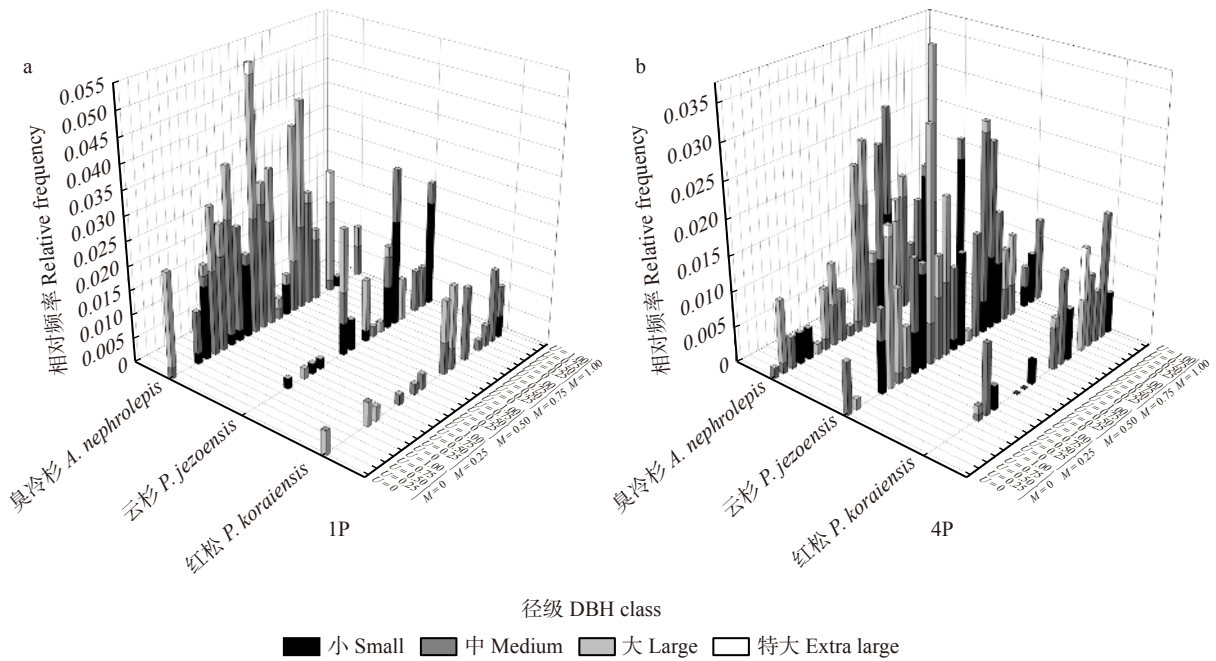


图2 1P和4P样地内树种、空间结构参数和径级的多元分布  
 Fig. 2 Multivariate distribution of spatial structure parameters, tree species and DBH class in 1P and 4P

臭冷杉多为中度混交( $M=0.50$ ), 红松多为极强度混交, 各树种株数按大小比数的分布同样近似于正态分布; 在大径级木中, 云杉多处于弱度至中度混交, 臭冷杉处于中度混交的株数最多, 红松多为极强度混交, 各树种株数随着大小比数的增大而减少; 仅臭冷杉存在特大径级木, 且生长均为优势。整体来看, 云杉、臭冷杉和红松在4P样地内分布有最多株数的状态分别为处于弱度至中度混交且生长为优势的大径级木, 中度混交且生长为优势的大径级木, 强度至极强度混交且生长为中庸中径级木。

### 3.2 不同径级单木年胸径生长量的变化

由图3和表2可知, 1P和4P样地内林木的年胸径生长量的整体趋势为随径阶的对数的增大而增大。其中, 云冷杉的年胸径生长量在4个径级间差异显著( $P < 0.05$ ), 最大值均出现在大径级或特大径级下; 而红松的年胸径生长量随径阶的增大呈波动性变化, 仅在4P样地内表现为小径级木最小, 特大径级木最大。整体来看, 臭冷杉在1P和4P样地内的年胸径生长量相当, 云杉在1P样地内的年胸径生长量低于4P样地, 红松与云杉相反(图4), 但大径级云杉在1P样地内的年胸径生长量略高于4P样地。

### 3.3 混交度、大小比数对单木年胸径生长量的影响

由图5可看出, 3个树种在1P和4P样地内的年胸径生长量均随混交度的增大而增大, 随大小比数的增小而减小; 1P和4P年胸径生长量最大值分

别出现在强度混交( $M=0.75$ )且生长为优势( $U=0$ )的林木和极强度混交( $M=1.00$ )且生长为优势( $U=0$ )的林木。当林木生长处于劣势( $U=0.75$ )或绝对劣势( $U=1.00$ )地位时, 胸径生长量对混交度的变化未有明显响应。

由图6可知, 随着混交度的增大, 1P样地内云杉小径级木和4P样地内臭冷杉的年胸径生长量逐渐增大; 1P样地内云杉大中径级木及臭冷杉的年胸径生长量为先增大后减小, 在混交度为0.50至0.75处具有较大的生长量; 红松及4P样地内云杉的年胸径生长量无明显变化规律。随着大小比数的增大, 仅臭冷杉中径级木、红松中径级木、1P样地内云杉大中径级木和4P样地内云杉中径级木的年胸径生长量表现逐级减小, 在其他径级下云杉、臭冷杉和红松的年胸径生长量未有明显变化规律。在同一径级下, 平均大小比数较小、平均混交度较大的样地内林木的年胸径生长量更大。整体看来, 云冷杉的年胸径生长量与混交度呈正相关, 与大小比数呈负相关(表3)。其中1P样地内云杉小径级木、4P样地内臭冷杉大小径级木的生长量与混交度显著相关( $P < 0.05$ ); 中径级木的生长量与大小比数显著相关( $P < 0.05$ )。

## 4 讨 论

### 4.1 不同径级空间结构参数分布规律

1P和4P样地整体均呈随机分布, 这与陈亚南

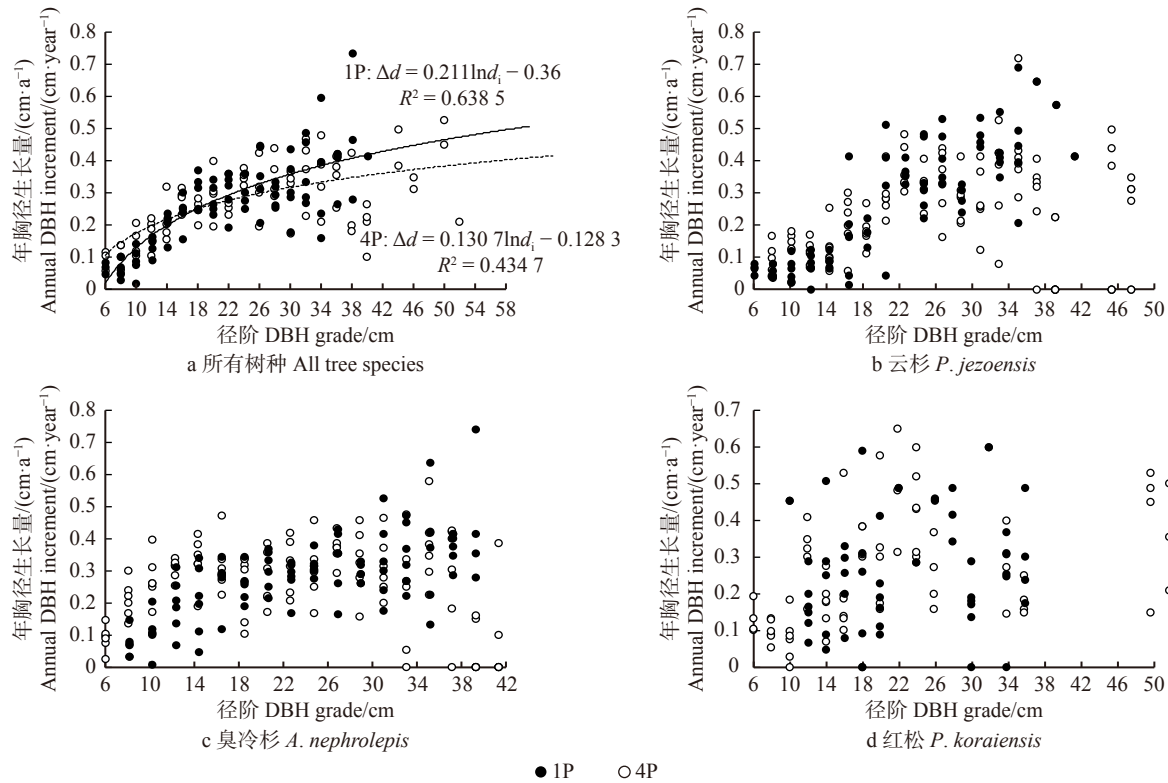


图3 1P和4P年胸径生长量随胸径的分布

Fig. 3 Distribution of annual DBH increment in relation to DBH in 1P and 4P

表2 不同径级林木年胸径生长量

Tab. 2 Annual DBH increment among different DBH classes

cm/a

cm/year

树种 Tree species	样地类型 Sample plot type	径级 DBH class			
		小 Small	中 Medium	大 Large	特大 Extra large
云杉 <i>P. jezoensis</i>	1P	0.08 ± 0.06a	0.18b ± 0.13b	0.37 ± 0.09c	—
	4P	0.14 ± 0.13a	0.25 ± 0.20b	0.32 ± 0.17c	—
臭冷杉 <i>A. nephrolepis</i>	1P	0.11 ± 0.10a	0.27 ± 0.14b	0.32 ± 0.15bc	0.41 ± 0.22c
	4P	0.18 ± 0.16a	0.29 ± 0.19b	0.36 ± 0.19c	—
红松 <i>P. koraiensis</i>	1P	0.33 ± 0.01a	0.27 ± 0.18a	0.39 ± 0.12a	—
	4P	0.11 ± 0.10a	0.28 ± 0.22ab	0.26 ± 0.15ab	0.38 ± 0.16b

注:表中数据为平均值 ± 标准差,不同字母表示不同径级间差异显著( $P < 0.05$ )。Notes: data in the table are all mean ± standard deviation, different letters indicate significant difference among varied diameter classes at the  $P < 0.05$  level.

等<sup>[20]</sup>及蒋桂娟等<sup>[21]</sup>的研究一致,可能是由于林木间自疏作用使得空间结构逐渐优化。一般来说,由于物种的生态学和生物学特性、以及种子扩散限制和生境异质性等机制的影响,物种在较小的径级容易呈聚集分布<sup>[22]</sup>,而随着径级增大,种内和种间为争夺资源的竞争也大大增强,聚集强度降低<sup>[23]</sup>,研究中4P样地内云冷杉各径级木的混交度从侧面印证了这一规律。1P样地整体介于中强度混交之间,但中小径级臭冷杉多为弱度混交,可能是因为1P样地内臭冷杉占大多数,且臭冷杉种子质量较大,在重力作用下更易散落于母树周围<sup>[24-25]</sup>,而随着林木的不断生长,竞争逐渐增大,周围的同种林木死亡,大径级木的混交度增大。红松和1P样地内云杉各径级的混

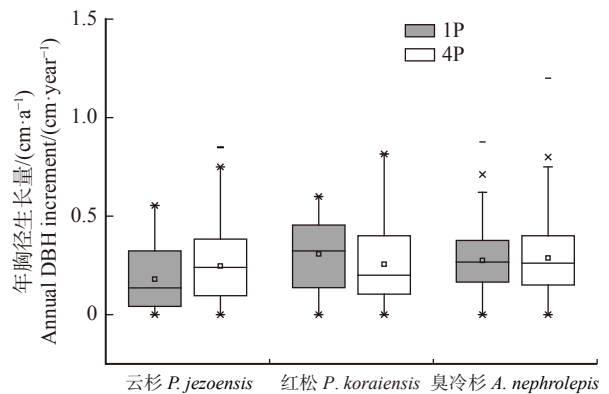


图4 1P和4P样地内云杉、臭冷杉和红松年胸径生长量

Fig. 4 Annual DBH increment of *P. jezoensis*, *A. nephrolepis* and *P. koraiensis* in 1P and 4P

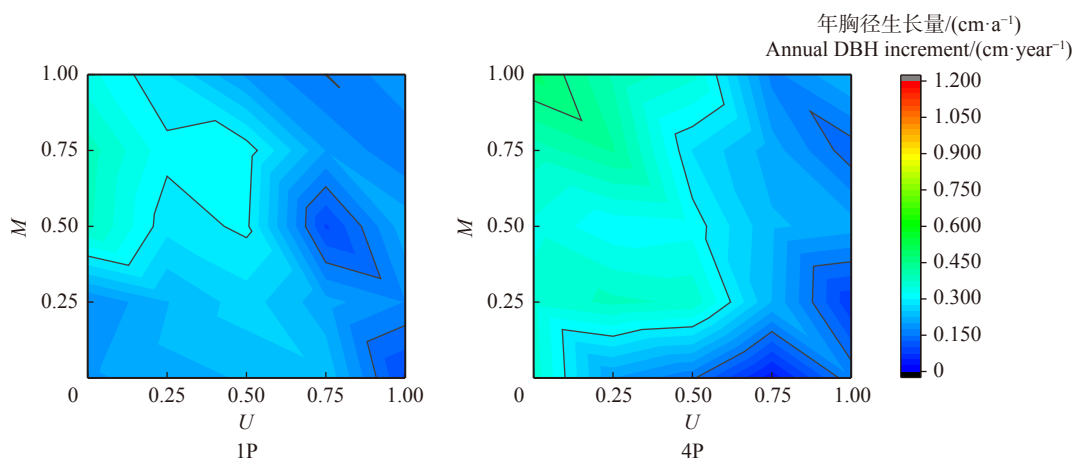


图 5 年胸径生长量随空间结构参数的分布

Fig. 5 Distribution of annual DBH increment in relation to the spatial structure parameters

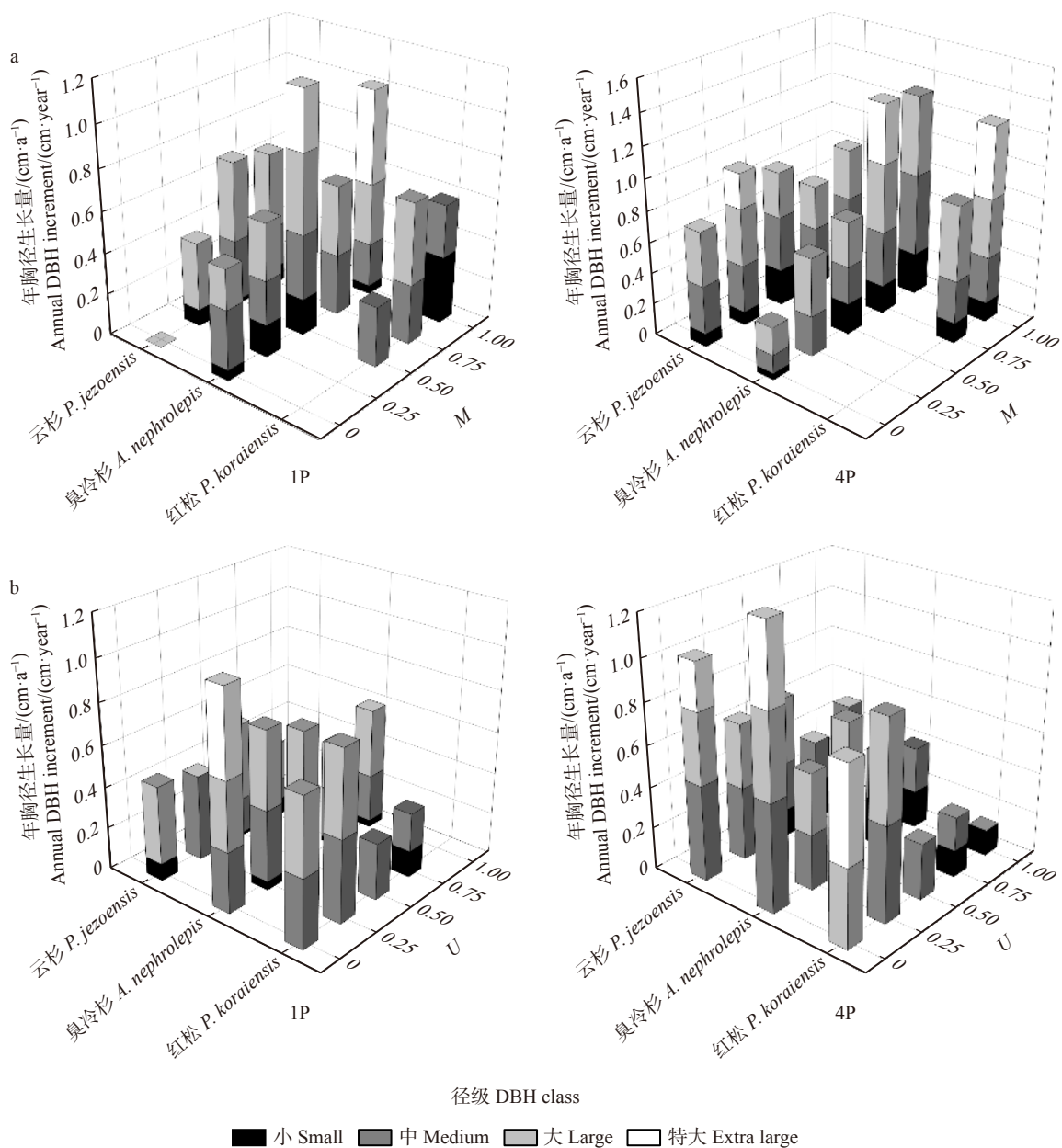


图 6 不同径级下年胸径生长量随混交度(a)、大小比数(b)的分布

Fig. 6 Distribution of annual DBH increment in relation to mingling degree (a) and neighborhood comparison (b) among different diameter classes

表3 不同径级林木年胸径生长量与空间结构参数的 Pearson 相关系数

Tab. 3 Pearson correlation coefficients of annual DBH increment and spatial structure parameters among different DBH classes

树种 Tree species	样地类型 Sample plot type	径级 DBH class							
		小 Small		中 Medium		大 Large		所有 All	
		<i>U</i>	<i>M</i>	<i>U</i>	<i>M</i>	<i>U</i>	<i>M</i>	<i>U</i>	<i>M</i>
云杉 <i>P. jezoensis</i>	1P	0.093 4	0.367 5*	-0.167 2	-0.407 1	-0.186 0	-0.172 6	-0.431 0*	0.073 1
	4P	-0.000 6	0.184 8*	-0.402 1*	-0.070 4	-0.055 7	-0.103 3	-0.431 0*	0.019 8
臭冷杉 <i>A. nephrolepis</i>	1P	0.180 2	0.258 8	-0.069 3	0.142 2	0.258 8	0.180 2	-0.273 6*	0.302 3*
	4P	-0.142 9	0.329 5*	-0.278 9*	0.441 8*	-0.169 2	0.432 3*	-0.471 8*	0.407 8*
红松 <i>P. koraiensis</i>	1P	-	-	-0.393 8*	-0.087 3	0.619 7	-	-0.407 5*	-0.179 3
	4P	-0.062 6	-0.062 6	-0.521 9*	-0.000 1	-	-	-0.622 3*	0.163 5
所有树种 All the tree species	1P	0.011 3	0.158 4	-0.136 7*	0.038 0	-0.033 5	0.237 8*	-0.360 3*	0.128 5*
	4P	0.081 8	0.182 5*	-0.187 8*	0.029 5	-0.000 6	0.211 3*	-0.481 3*	0.188 8*

注: \*表示在 $P < 0.05$ 的水平上相关性显著。Note: \* indicates significant correlation at  $P < 0.05$  level.

度均较高,可能是因为其株数少,且在不同径级之间的竞争相对较弱<sup>[23]</sup>。

云杉在在 1P 样地内的平均大小比数高于 4P 样地,同时也高于 1P 内的臭冷杉和红松,这表明 1P 内云杉多以粗大的相邻木为伴,这与从直径分布中得到的一致。4P 的直径结构总体为相对稳定的增长型结构,但 1P 的峰值相对靠右,小径级木偏少,这可能是因为臭冷杉幼苗在林下不能正常存活和生长,进界株数较少,导致其小径级不能得到补充<sup>[26-27]</sup>。1P 和 4P 内中径级木在各大小比数级别间呈正态分布,而大径级木的生长多为亚优势和优势,特大径级木的生长均为优势,这与徐海等<sup>[28]</sup>的研究一致。但未被干扰的林分随着演替的发展通常会形成大径级木均匀生长,小径级木与大径级木相邻的竞争格局,即大小比数值均匀分布于各径级中<sup>[17]</sup>,本研究与之不符可能是因为 1P 和 4P 的平均胸径为 21.03 cm 和 20.32 cm,均处于生长阶段,故位于大和特大径级木之间、与其年龄和大小相似、距离较近、空间生态位重叠的竞争木暂未被淘汰。

#### 4.2 不同径级空间结构参数及生长量关系

在观测范围内,林木年胸径生长量整体随径阶的对数的增大而增大,这是由于植物的生长多取决于自身个体的大小<sup>[29]</sup>; 1P 内红松在中小径级间生长量的差异不显著,可能是因为 1P 内红松小径级木过少,不能有效反映该径级的生长量情况。云杉在 1P 内的年胸径生长量低于 4P,红松与之相反,这可能是因为提高云杉的比例有利于其的生长,但更高比例的云杉制约了红松的生长,且 4P 的较大的林分

密度加剧了这一情况,故应适当降低林分密度。

巫志龙等<sup>[30]</sup>研究发现中弱度混交的杉阔混交人工林的表现出较低的适应能力和稳定性,吕延杰等<sup>[13]</sup>及吕沅杭等<sup>[15]</sup>研究发现混交度对云冷杉生长起促进作用,本研究中臭冷杉的年胸径生长量印证了该规律,各径级臭冷杉的年胸径生长量均与混交度呈较强的相关性,这是因为混交度能反映邻近木空间单元尺度上物种的多样性特征,随着混交度的增高,不同生活型的物种多样性整体呈上升的趋势<sup>[31]</sup>,从而促进林木生长;但云杉仅小径级木的生长量与混交度显著正相关( $P < 0.05$ ),可能是因为其对混交度的强弱变化不够敏感<sup>[13]</sup>,且生物互作一般作用于植物的早期生活史阶段<sup>[32]</sup>;中小径级红松的生长量与混交度呈弱负相关,这可能是因为红松属阳性树种,光是影响其生长的重要因子<sup>[33]</sup>,混交度的提升将导致其的生长受到周围耐荫树种的抑制,且中小级木的上层有大径级木分布,大径级木在获取光照的竞争中占优势地位,即非对称竞争<sup>[34]</sup>,加剧了中小径级木对获取光的竞争。

云杉、臭冷杉和红松的年胸径生长量总体随对象木大小比数的增大而减小,这与前人研究结果一致<sup>[13-15]</sup>,这是因为竞争压力对臭冷杉和红松的胸径生长起抑制作用<sup>[32]</sup>,大小比数直接反映了单木在小尺度空间上的竞争关系,但仅中径级木的年胸径生长量与大小比数的相关性显著( $P < 0.05$ ),可能是因为只有中径级木株数在各大小比数值上呈正态分布,这也进一步验证了优势地位的林木生长量要明显高于劣势地位的林木。大小比数增大而导致林木



年胸径生长量降低的程度远大于因混交度降低导致其年胸径生长量降低的程度(图5), 说明相比乔木层物种的隔离程度, 竞争更能限制树木的生长。而混交度与大小比数对云冷杉的胸径生长量贡献多少, 还需要进一步深入研究。

目前, 关于空间结构对胸径生长量影响的研究多通过一次调查法获取生长量<sup>[13-15]</sup>, 但不同年份林分空间结构可能存在差异, 故本研究通过重复测量得到每株树的信息, 不仅扩大了样本量, 且考虑了空间结构参数的变化, 有助于对空间结构与林木生长量的关系的准确判定。因此, 开展长期地森林固定样地调查监测工作, 对于研究林分生长规律十分必要。

## 5 结 论

树木的生长与其所处的空间状态密切相关, 本研究基于4株相邻木空间结构参数, 从空间结构单元的尺度而不是林分的尺度, 讨论不同径级间林木胸径生长量的变化。结果表明降低对象木大小比数的同时适当提高混交度有利于其胸径生长, 且不同生长阶段的竞争不同导致了不同径级林木对混交度和大小比数响应的差异, 因此, 针对不同生长阶段的林木应采取不同的经营措施调整优化林分结构。首先, 明确经营目的, 主要树种为云冷杉、兼顾红松, 适度开展上层疏伐, 为幼龄个体顺利进入中、上层营造空间; 中径级木的胸径生长对大小比数最敏感, 对此类型林分, 在平均胸径为13~25 cm这一阶段进行抚育间伐以减少竞争消耗, 将大小比数为1.00或0.75的林木作为首选采伐木, 结合混交状态为零度混交和弱度混交的林木的相邻木选择采伐木, 臭冷杉生长快、数量多, 且材质一般, 故采伐对象以臭冷杉为主, 尽量使高质量和高经济价值的树种处于优势地位, 以促进其生长和演替; 胸径达到25 cm后的生长处于较快的速度, 且竞争强度基本趋于稳定, 维持在较低水平, 针对云杉比例较低的云冷杉林分, 可适当补植以提高云杉比例, 增加红松。

### 参 考 文 献

- [1] 侯向阳, 韩进轩. 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析[J]. *植物生态学报*, 1997, 21(3): 47-54.  
Hou X Y, Han J X. Simulation analysis of spatial patterns of main species in the Korean-pine broadleaved forest in Changbai Mountain[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(3): 47-54.
- [2] Aguirre O, Hui G Y, von Gadow K, et al. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183(1): 137-145.
- [3] 安慧君. 阔叶红松林空间结构研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.  
An H J. Study on the spatial structure of the broadleaved Korean pine forest[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003.
- [4] Uuttera J, Maltamo M. Impact of regeneration method on stand structure prior to first thinning: comparative study North Karelia, Finland vs. Republic of Karelia, Russian Federation[J]. *Silva Fennica*, 1995, 29(4): 267-285.
- [5] 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): 39-44.  
Hui G Y. The neighbourhood patter: a new structure parameter for describing distribution of forest tree position[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(1): 39-44.
- [6] 谢小魁, 苏东凯, 刘正纲, 等. 长白山原始阔叶红松林径级结构模拟[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(8): 1477-1481.  
Xie X K, Su D K, Liu Z G, et al. Modeling diameter distribution of primary leaf Korean pine mixed forest in Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(8): 1477-1481.
- [7] Uuttera J, Maltamo M, Kuusela K. Impact of forest management history on the state of forests in relation to natural forest succession comparative study, North Karelia, Finland vs. Republic of Karelia, Russian Federation[J]. *Forest Ecology & Management*, 1996, 83(1-2): 71-85.
- [8] Maltamo M, Kangas A, Uuttera J, et al. Comparison of percentile based prediction methods and the Weibull distribution in describing the diameter distribution of heterogeneous Scots pine stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 133(3): 263-274.
- [9] Rubin B D, Manion P D, Faber-Langendoen D. Diameter distributions and structural sustainability in forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 222(1): 427-438.
- [10] 惠刚盈, 李丽, 赵中华, 等. 林木空间分布格局分析方法[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4717-4728.  
Hui G Y, Li L, Zhao Z H, et al. The comparison of methods in analysis of the tree spatial distribution pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4717-4728.
- [11] Schütz J P. Modelling the demographic sustainability of pure beech plenter forests in Eastern Germany[J]. *Annals of Forest Science*, 2006, 63(1): 93-100.
- [12] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 等. 天目山近自然毛竹林空间结构与生物量的关系[J]. *林业科学*, 2011, 47(8): 1-6.  
Tang M P, Xu W B, Chen Y G, et al. Relationship between spatial structure and biomass of a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stand in Tianmu Mountain[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(8): 1-6.
- [13] 吕延杰, 杨华, 张青, 等. 云冷杉天然林林分空间结构对胸径生长量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(9): 41-47.  
Lü Y J, Yang H, Zhang Q, et al. Effects of spatial structure on DBH increment of natural spruce-fir forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(9): 41-47.

- [14] 陈梦飞. 青海东部黄土区青海云杉人工林空间结构对径向生长的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.  
Chen M F. Effects of spatial structure of *Picea crassifolia* plantation on radial growth in the loess area of eastern Qinghai[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [15] 吕沅杭, 伊利启, 王儒林, 等. 基于空间结构参数的大兴安岭天然落叶松单木直径生长模型[J]. 林业科学研究, 2021, 34(2): 81-91.  
Lü Y H, Yi L Q, Wang R L, et al. Diameter growth model using spatial structure parameters of natural *Larix gmelinii* stand in Daxing'anling Mountains, Northeast China[J]. Forest Research, 2021, 34(2): 81-91.
- [16] 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.  
Hui G Y, Hu Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. Forest Research, 2001, 14(1): 23-27.
- [17] 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, 12(1): 4-9.  
Hui G Y, von Gadow K, Albert M, et al. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. Forest Research, 1999, 12(1): 4-9.
- [18] 国家林业局. 森林资源规划设计调查主要技术规定 [EB/OL]. (2004-11-15)[2019-06-09]. <https://www.forestry.gov.cn/portal/xby/s/1312/content-127438.html>.  
State Forestry Administration. Main technical regulations for forest resource planning [EB/OL]. (2004-11-15)[2019-06-09]. <https://www.forestry.gov.cn/portal/xby/s/1312/content-127438.html>.
- [19] 柴宗政. 基于相邻木关系的森林空间结构量化评价及 R 语言编程实现 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.  
Chai Z Z. Quantitative evaluation and R programming of forest spatial structure based on the relationship of neighborhood trees[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016.
- [20] 陈亚南, 杨华, 马士友, 等. 长白山 2 种针阔混交林空间结构多样性研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 48-58.  
Chen Y N, Yang H, Ma S Y, et al. Spatial structure diversity of semi-natural and plantation stands of *Larix gmelinii* in Changbai Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(12): 48-58.
- [21] 蒋桂娟, 郑小贤. 吉林省汪清林业局云冷杉天然林结构特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(4): 35-41.  
Jiang G J, Zheng X X. Structural characteristics of natural spruce-fir forest in Wangqing Forestry Bureau of Jilin Province, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(4): 35-41.
- [22] 祝燕, 白帆, 刘海丰, 等. 北京暖温带次生林种群分布格局与种间空间关联性[J]. 生物多样性, 2011, 19(2): 252-259.  
Zhu Y, Bai F, Liu H F, et al. Population distribution patterns and interspecific spatial associations in warm temperate secondary forests, Beijing[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(2): 252-259.
- [23] 倪瑞强, 唐景毅, 程艳霞, 等. 长白山云冷杉林主要树种空间分布及其关联性[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 28-35.  
Ni R Q, Tang J Y, Cheng Y X, et al. Spatial distribution patterns and associations of main tree species in spruce-fir forest in Changbai Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(6): 28-35.
- [24] Snell R S, Huth A, Nabel J E M S, et al. Using dynamic vegetation models to simulate plant range shifts[J]. Ecography, 2015, 37(12): 1184-1197.
- [25] Szymura T H, Szymura M, Macioła A. The effect of ecological niche and spatial pattern on the diversity of oak forest vegetation[J]. Transactions of the Botanical Society of Edinburgh, 2015, 8(4): 505-518.
- [26] 刘足根, 朱教君, 袁小兰, 等. 辽东山区长白落叶松天然更新调查[J]. 林业科学, 2007, 43(1): 42-49.  
Liu Z G, Zhu J J, Yuan X L, et al. Investigation and analysis of the natural regeneration of *Larix olgensis* in mountain regions of eastern Liaoning Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(1): 42-49.
- [27] Xiang W, Lei X, Zhang X. Modelling tree recruitment in relation to climate and competition in semi-natural *Larix-Picea-Abies* forests in northeast China[J]. Forest Ecology & Management, 2016, 382: 100-109.
- [28] 徐海, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 天然红松阔叶林不同径阶林木的空间分布特征分析[J]. 林业科学研究, 2006, 19(6): 687-691.  
Xu H, Hui G Y, Hu Y B, et al. Analysis of spatial distribution characteristics of trees with different diameter classes in natural Korean pine broadleaved forest[J]. Forest Research, 2006, 19(6): 687-691.
- [29] 张泽浦, 方精云, 菅诚. 邻体竞争对植物个体生长速率和死亡概率的影响: 基于日本落叶松种群试验的研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 340-345.  
Zhang Z P, Fang J Y, Jian C. Effects of competition on growth rate and probability of death of plant individuals a study based on nursery experiments of *Larix leptolrpis* populations[J]. Journal of Plant Ecology, 2000, 24(3): 340-345.
- [30] 巫志龙, 周成军, 周新年, 等. 杉阔混交人工林林分空间结构分析[J]. 林业科学研究, 2013, 26(5): 609-615.  
Wu Z L, Zhou C J, Zhou X N, et al. Analysis of stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved mixed plantation[J]. Forest Research, 2013, 26(5): 609-615.
- [31] 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.  
Cao X Y, Li J P, Wei X. Analysis of the difference and correlation between the spatial structure and understory herbaceous species diversity of typical subtropical forests[J]. Pratacultural Science,

- 2019, 36(10): 2466–2475.
- [32] 童鑫. 从种群遗传和群落组成的空间结构研究群落维持机制 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- Tong X. Exploring community assembly through the lens of spatial structure: from population genetics to community composition[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [33] 姚国清, 池桂清, 董兆琪, 等. 红松生长与光照关系的探讨[J]. 生态学杂志, 1985, 4(6): 48–50.
- Yao G Q, Chi G Q, Dong Z Q, et al. Discussion on the relationship between growth and light of Korean pine[J]. Chinese Journal of Ecology, 1985, 4(6): 48–50.
- [34] 韩大校, 金光泽. 地形和竞争对典型阔叶红松林不同生长阶段树木胸径生长的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 9–19.
- Han D X, Jin G Z. Influences of topography and competition on DBH growth in different growth stages in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(1): 9–19.

(责任编辑 范娟  
责任编辑 惠刚盈)