

西藏原始林芝云杉林空间结构参数分布特征

韩艳英^{1,2}, 盛基峰³, 李 垚¹, 大布穷¹, 叶彦辉^{1,2*}

(1. 西藏农牧学院 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000;

3. 西藏农牧学院 高原生态研究所, 西藏 林芝 860000)

摘 要:以藏东南波密岗乡自然保护区原始林芝云杉林为研究对象,应用空间结构参数角尺度、混交度和大小比数,建立空间结构参数的三元分布,揭示林分的空间结构特征。结果表明,从一元分布看,林木整体属于随机分布,林分强度混交,树种的优劣程度参差不齐,整体处于中庸状态;在混交度和角尺度分布中,以随机分布和强度混交林木株数最多,大小比-角尺度组合中,均以随机分布轴线和中庸轴线两侧基本对称;三元结构参数组合为强度混交、随机分布、亚优势状态林木分布较多。主要树种的混交程度较高,呈现强度和极强度混交状态;其中林芝云杉和华山松为该群落的优势树种随机分布,其他主要树种都为轻度聚集分布;树种间大小比数差异明显,其中林芝云杉最低, <0.252 ,处于亚优势状态。全面分析原始林芝云杉林的空间结构,为林芝云杉林结构优化调整提供重要参考,为藏东南天然林可持续发展提供科学依据。

关键词:林芝云杉;空间结构;角尺度;混交度;三元分布

中图分类号:S791.18

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)01-0146-07

Spatial Distribution Characteristics of Original *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* Forest in Tibet

HAN Yan-ying^{1,2}, SHENG Ji-feng³, LI Yao¹, DA Bu-qiong¹, YE Yan-hui^{1,2*}

(1. Resources & Environment College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Tibet, China;

2. Key Lab of Forestry Ecology in Tibet Plateau, Ministry of Education/Tibet Agricultural & Animal Husbandry University,

Nyingchi 860000, Tibet, China; 3. Research Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Tibet, China)

Abstract: The original *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* forest in Bomi Township Nature Reserve, south-east Tibet, was used as the research object. Using stand spatial structure parameters (mingling degree, uniform angle index and size ratio), the ternary distribution of stand spatial structure parameters was established to describe the spatial structure characteristics of the whole stand and the spatial structure characteristics of the main tree species in the stand. The results showed that from the univariate distribution, the trees on the sample plots were randomly distributed in general, and the stand was in a state of intensive mixing. The dominance index of tree species was uneven, which was reflected by the different proportions of different tree species, and the whole stand was in a moderate growth state. In the distribution of mixed degree and angular scale, the number of trees mixed with random distribution and intensity was the largest. In the binary distribution structure of size ratio and uniform angle index, stand was basically symmetrical in random distribution and medium growth dimension. When the ternary structure parameters were combined into moderate strength mixing, random distribution and sub-dominant state, the tree distribution

收稿日期:2021-11-17 修回日期:2022-04-22

基金项目:西藏农牧学院林学学科创新团队建设(藏财预指 2020-001);国家自然科学基金(31460122);西藏农牧学院林业工程重点实验室;西藏农牧学院 2022 年教改项目。

第一作者:韩艳英。研究方向:亚高山天然林经营。E-mail:1064336015@qq.com

* 通信作者:叶彦辉,博士。研究方向:植被恢复。E-mail:260383872@qq.com

was larger. The main tree species in *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest had a high degree of mingling, showing a strong and extremely strong mingling state. Among them, *P. likiangensis* var. *linzhiensis* and *Pinus armandii* were the dominant tree species in the community, which belonged to random distribution, and other main tree species were in mild aggregated distribution. There were obvious differences in the size ratio of tree species, among which *P. likiangensis* var. *linzhiensis* was in the subdominant state with the lowest value of 0.252. A comprehensive analysis of the spatial structure of the original *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest can provide important reference information for the structural optimization and adjustment of *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest, and provide scientific basis for the sustainable development of natural forests in Southeast Tibet.

Key words: *Picea likiangensis* var. *linzhiensis*; spatial structure; uniform angle index; mingling degree; ternary distribution

林分空间结构是指林木的分布格局及其属性在空间上的排列方式,受林分中树种自身生长的特点、种间的相互作用以及环境对树种的长期影响,是森林经营与管理过程中的重要因素,综合反映了林分的竞争态势、更新能力及其干扰情况,决定了林分的稳定性、发展的可能性和经营空间的大小^[1-2]。空间结构分析与评价是林分结构优化与调整的基础,为森林经营措施的制定提供准确的信息,在森林可持续经营的目标下显得日益重要^[2]。近年来,林分空间结构的合理表达成为我国林分空间结构研究的热点,但是林分空间结构参数的研究主要集中一元和二元分布的描述^[3-9],具有一定局限性^[10]。白超^[11]采用结构参数三元分布对小陇山次生锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)混交林空间特征进行了研究,吴晓永等^[12]采用三元分布分析和评价了汪清云杉-白桦(*Picea asperata*-*Betula platyphylla*)混交林的空间结构。三元分布包含了二元分布以及一元分布所提供的全部结构信息,包含信息更加丰富和直观^[13],通过三元分布解译的林分结构特征为森林经营决策和林分结构重建提供了大量有效且可操作性强的异质性信息,可以精准筛选采伐木确定补植木的位置,使林木在水平地域上合理排列,为创建健康的森林提供依据。

林芝云杉(*P. likiangensis* var. *linzhiensis*)为松科云杉属的变种,是藏东南亚高山暗针叶林的主要建群树种之一^[14],生长速度快、蓄积量高、寿命长,是当地重要的用材生态及树种。目前对林芝云杉开展的主要群落与种群、生物量等方面^[15-17]的研究,利用空间结构参数对西藏原始林芝云杉林空间结构特征方面的研究未见报道。由于该种群因干扰退化严重,已被列入了中国物种红色名录,处于易危状态^[18]。

目前对高海拔寒温带暗针叶林结构参数还缺乏多元分布方面的研究。为了保护 and 利用这一宝贵的

资源,对原始林芝云杉种群空间结构的研究迫在眉睫。本研究以未经人为干扰的原始林芝云杉林样地为对象,采用角尺度、混交度和大小比数对森林结构进行合理分析,同时采用树种空间结构参数的三元分布直观系统地揭示林芝云杉林的空间结构特征,为藏东南原始林芝云杉的健康发展和利用提供参考依据。

1 研究区概况

研究地位于西藏东南部的林芝市波密县岗乡自然保护区内,该区域在帕隆藏布江以南,雅鲁藏布江大拐弯的东北部(29°53'11"N, 95°33'44"E),海拔 2 600~5 000 m,保护区属于亚高山温带湿润季风气候区,年均降水量 1 000 mm,年均温度 8.4℃^[19],气候较为湿润。保护区面积约 4 600 hm²,森林覆盖率超过 61%,森林内总蓄积量约 2.52×10⁶ m³,林区植被种类丰富,以林芝云杉和华山松(*Pinus armandii*)等针叶林为主,其中林芝云杉分布广泛,蓄积占绝对的优势,乔木层还伴有三桠乌药(*Lindera obtusiloba*)、木姜子(*Litsea pungens*)、西南花楸(*Sorbus rehderiana*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、长穗桦(*Betula cylindrostachya*)等,林下灌木有云南勾儿茶(*Berchemia yunnanensis*)、波密杜鹃(*Rhododendron pomense*)、唐古特忍冬(*Lonicera tangutica*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

在波密岗乡自然保护区内设置 1 块典型的 100 m×100 m 林芝云杉林样地,平均海拔为 2 890 m,平均坡度为 15°,坡向是西北 325°,坡位为中坡,林分郁闭度 0.82,林分平均胸径 23.4 cm,主林层平均高 42.7 m,以样地内西南角为原点,利用全站仪确定样地的坐标基轴,再将整个样地划分为 25 个 20 m×20 m 的样方,对样地内胸径≥5 cm 乔木记

录其树种名称、坐标位置、胸径、树高、冠幅并挂牌编号,调查时间为2020年9—10月。

2.2 林分空间结构参数

基于4株相邻木的角尺度等空间结构参数的应用技术已较为成熟^[20],能准确描述和分析森林群落内的林木大小分化程度、隔离程度和空间分布格局^[21-23]。为了避免边缘效应,由样地边缘向内缩进5 m作为缓冲区。

2.2.1 角尺度(W_i)用来描述相邻树木围绕参照树 i 的均匀性。角尺度被定义为 α 角小于标准角 α° ($=72^\circ$)的个数所占空间结构单元中4个 α 角的比值。有5种取值情况: $W_i=0$ (很均匀), $W_i=0.25$ (均匀), $W_i=0.5$ (随机), $W_i=0.75$ (不均匀), $W_i=1$ (很不均匀)。判定一个大样地中的林分空间分布特征可以通过该样地所有乔木树种角尺度的平均值来判定,林分平均角尺度的值在 $[0.475, 0.517]$ 内属于随机分布,小于0.475为均匀分布,大于0.517为聚集分布。

2.2.2 大小比数(U_i)用来形容林木大小的差异程度^[22]。大小比数的取值有5种即 $U_i=0$ (优势), $U_i=0.25$ (亚优势), $U_i=0.50$ (中庸), $U_i=0.75$ (劣势), $U_i=1.00$ (绝对劣势)。

2.2.3 树种混交度(M_i)用来形容混交林中树种空间隔离的程度^[23]。其值(0、0.25、0.5、0.75、1.00)依次对应的混交等级为零度混交、弱度混交、中度混交、强度混交和极强度混交。

2.3 数据处理

所有乔木空间结构参数值利用林分空间结构分析软件Winkelmass 1.0计算,利用Excel 2010得出任意2个结构参数指标取值组合的相对频率值,将三者联合可以得到125种结构参数的组合,以及相对频率值,利用Origin 2018作图。

3 结果与分析

3.1 林芝云杉林空间结构参数的一元分布

由图1可以看出,样地的角尺度频率整体近似正态分布。平均角尺度0.5025,属于随机分布,其中有58.05%的林木属于随机分布,很均匀和很不均匀分布的林木占比很小,分别占0.67%和3.36%。在混交度一元分布中,零度混交和弱度混交所占比例为7.05%,强度混交以上状态所占比例为72.82%,样地的平均混交度为0.7483,表明树木的混交程度较高,树种的空间隔离程度较大。该样地平均大小比数为0.4992,说明林木的生长整体处于中庸状态,其中在各个大小比数等级上的频率值均在0.20上下。

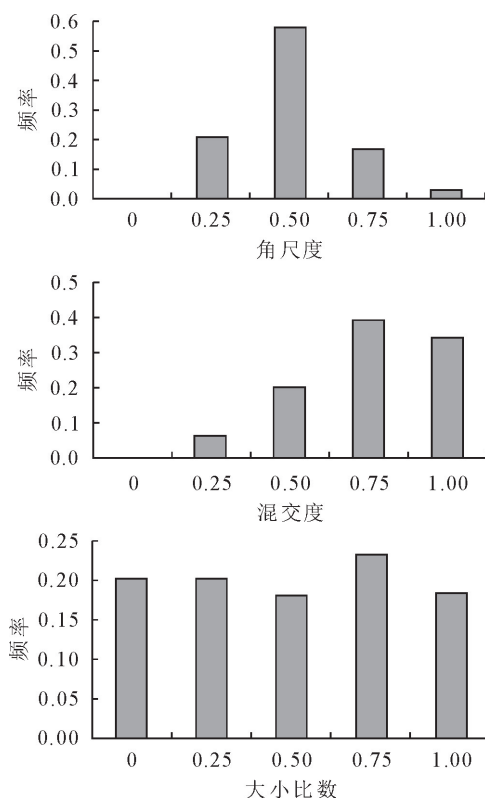


图1 林芝云杉林角尺度、混交度和大小比数的一元分布

Fig. 1 The univariate distribution of the uniform angle index, mingling degree and size ratio of *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest

3.2 林芝云杉林空间结构参数的二元分布

天然林芝云杉混交林中(图2),同一混交等级林木的相对频率均随着角尺度的增大表现为先升高后下降,均呈近似正态分布,在随机分布等级下达到最高(分别为0.003、0.034、0.128、0.221、0.195),说明呈随机分布的林木所占比例最高,为58.1%,分布格局很均匀和很不均匀的林木所占比例很小。在零度混交时各角尺度水平的频率几乎都为0,在强度和极强度混交水平下随机分布结构组合上的相对频率最高为0.416,说明原始林芝云杉林中强度混交以上随机分布的林木占据多数。

大小比-角尺度二元分布中,在同一角尺度水平上的频率值随着大小比数的增大呈先增大后减少,并在中庸分布轴上均取得最高相对频率值(0.58),远高于其他结构组合,其中生长中庸为聚集分布的林木占总株树比例最高为14.4%。

大小比-混交度二元分布中,同一优势程度不同混交状况下的林木占比情况不同,亚优势木中处于强度混交林木占比最大为10.4%,绝对劣势极强度混交的林木占比为9.06%,不同优势等级混交度为0的林木占比最少,不同混交等级的林木在同一生长态势等级上频率值在0.20左右。

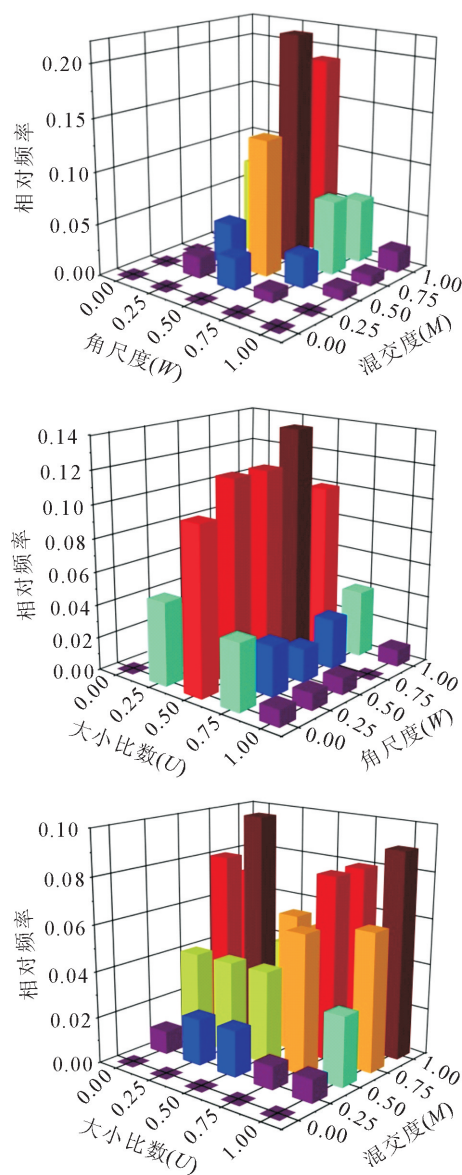


图 2 林芝云杉林角尺度、混交度和大小比数的二元分布
Fig. 2 The binary distribution of the uniform angle index, mingling degree and size ratio of *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest

3.3 林芝云杉林空间结构参数的三元分布

样地在 66 个结构参数组合上分布有频率值(图 3)。大小比数和混交度保持不变时,林木株数随角尺度增加先增加后减少,林木在随机分布($W=0.5$)时,株数分布最多。混交度和角尺度不变时,林木株数在不同大小比数等级上基本相等,整体看处于劣势状态的林木株数略高于优势状态林木。角尺度和大小比数保持不变时,林木株数随混交度增加呈现先增加后减少的态势,林木在强度和极强度混交状态下株数分布较多,占比达到 72.48%,说明样地中大多数林木都伴生有 3~4 个其他树种。整个林分中 6.7%的林木处于强度混交($M=0.75$),随机分布($W=0.5$)和亚优势状态($U=0.25$)。

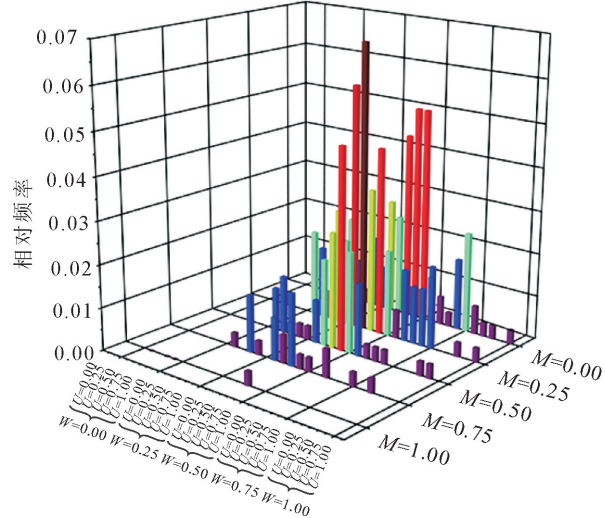


图 3 林芝云杉林角尺度、混交度和大小比数的三元分布
Fig. 3 The ternary distribution of the uniform angle index, mingling degree and size ratio of *P. likiangensis* var. *linzhiensis* forest

3.4 林芝云杉林中主要树种空间结构特征

6 个主要树种的角尺度分布在区间[0.455, 0.531](表 1),其中林芝云杉、华山松的角尺度在[0.475, 0.517],表明整个林分的主要优势树种为随机分布,而木姜子、漆树和三桠乌药的角尺度都>0.517,属于轻度聚集分布的状态,而西南花楸的平均角尺度<0.475,属于均匀分布;6 个树种中,华山松、西南花楸、三桠乌药和漆的平均混交度均在 0.85 以上,林芝云杉和木姜子较低,略低于 0.75(强度混交),6 个树种的混交程度较高,呈现强度和极强度混交状态。在胸径比数中,树种间差异明显,木姜子和西南花楸的平均比值接近甚至超过 0.75;华山松次之为 0.368;林芝云杉最低为 0.252;三桠乌药、漆树均值接近 0.50。西南花楸的大小比数值最高,说明在林分中的优势程度最低,但该树种的混交程度高,表明西南花楸在整个林分中竞争压力小。木姜子为下层小乔木,虽然种群数量大,但在种间竞争中处于劣势。说明在群落中,林芝云杉和华山松在群落中处于林冠顶层且干型粗壮,具有较大优势度的树种,群落下层的小乔木通常处于被压制状态。

表 1 林芝云杉林主要树种的空间结构参数

树种名	W	M	U
林芝云杉	0.493	0.651	0.252
华山松	0.478	0.868	0.368
木姜子	0.519	0.685	0.738
漆树	0.488	0.85	0.588
三桠乌药	0.531	0.938	0.625
西南花楸	0.455	0.864	0.841

4 结论与讨论

4.1 结论

1) 岗乡自然保护区原始林芝云杉林的空间结构较稳定,大多数林木处于强度混交、随机分布状态,林芝云杉和华山松树种占据主要优势,符合天然林的发展趋势。

2) 林芝云杉林中主要树种的混交程度较高,呈现强度以上的混交状态;林芝云杉和华山松为该群落的优势树种属于随机分布,其他主要树种都为轻度聚集分布。

3) 林芝云杉林林分的空间结构较稳定,但不是最优的林分状态,需要对劣势木进行择伐,由于林分密度较低,为 $382 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,可采取补植异种、珍贵的优良乡土树种来构建最佳的林芝云杉林结构。

4.2 讨论

4.2.1 林芝云杉林的空间结构参数分布 林木个体生长发育空间受林分结构的制约,林分稳定性、质量和功能的发挥都受到其直接影响,合理的林分结构既有利于林木个体获取充分的生长环境,又有利于森林生态功能的持续发挥^[24-26]。运用结构参数的三元分布诠释了藏东南原始林芝云杉林的空间结构特征,包含的对象木的信息更加丰富和清晰,从不同角度和层次全面且系统地诠释了林芝云杉林结构多样性,有益于森林结构的优化与调整^[13]。很多学者对其进行了大量的研究,但关于空间结构研究仅采用点格局分析的方法^[27]研究林芝云杉林在不同尺度上的种群分布特征,未精细刻画林木的微环境。本研究则详细分析了其林分空间结构参数的多元分布,具有方法简单可操作性强的优点。从一元分布看,样地上林木整体上属于随机分布,同高辉^[27]用点格局分析的方法得到的结论一致,同天山云杉^[28]的空间分布特征一致,而青海云杉^[6]和关帝山云杉林^[29]都为聚集性分布,一般情况下,结构稳定的森林群落中,随机分布将是林木经过演替后形成的顶级群落的水平分布格局^[30],由此说明林芝云杉林的结构更稳定。林芝云杉林处于强度混交,其平均混交度水平比青海云杉和关帝山云杉林的混交度都大,说明林芝云杉林中很少出现相同树种聚生情况,树种的隔离程度高,林分内物种多样性高,种内竞争激烈^[4]。树种的优劣参差不齐,处于中庸状态,其中林芝云杉和华山松虽然为优势树种,但是株树占比不大。

一元分布在表达结果的形式上较为单一,结构参数的二元分布以三维空间的形式很好地展示林芝云杉林群落的空间结构特征。林芝云杉林混交度和

角尺度二元分布中,随机分布和强度混交的林木株数最多,与林分空间结构参数中角尺度在一元分布上的趋势一致,表明林芝云杉林种大多数林木个体处于强度混交、随机分布状态。

大小比-角尺度组合中,均以随机分布轴线和中庸轴线两侧基本对称,说明林芝云杉林分中庸木多为聚集分布,各生长状态的林木大多处于随机分布;而同一分布格局的林木,处于各优劣等级的比例相近,中下层被压木和上层优势木因其树高的差异,利用光照资源的不同,在长期的演替中达到共生^[30]。

三元分布图更加简洁与直观地展现出各个组合的参数分布特征^[12],具有更强的空间解析能力。从结果来看林芝云杉林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,林分整体混交程度比较高,虽然优势木的数量低于劣势木,但优势木占据着整个林分的上层空间,垂直分布分层明显。三维分布具有一定的局限,分析林分更加精细的微观特征需要进入四维及多维立体化阶段。

4.2.2 林芝云杉林的主要树种结构特征 有学者研究表明^[31-32],植物一般在林分低林层多呈聚集分布,随林层增高聚集性减小,趋于随机分布或者均匀分布,对乔木层中 6 个主要树种的角尺度、混交度和大小比数进行研究。本研究也符合这一规律,林芝云杉和华山松为样地内主林层,属于随机分布,而其他的低林层属于轻度聚集分布的状态,同长白山云冷杉针阔混交林^[33]主要树种空间分布研究的特征相一致。样地内 6 个树种不仅隔离程度高,而且树种的优劣差距也大。其中林芝云杉和华山松混交度高,在整个群落内具有生长优势,占据着乔木上层阳光充足的地方;木姜子个体数量虽多,分布于乔木下层,优势程度较低,而西南花楸、三桠乌药和漆在群落中处于劣势,但混交度较高。

森林的经营目标是通过创造最佳的林分结构,培养健康稳定的森林群落。近年来,由于林芝云杉材质优良、用途广泛,致使砍伐十分严重,对其林分已造成强烈的干扰,其群落结构和功能的退化均十分严重^[16]。而西藏自治区在 1985 年设置了波密岗乡自然保护区,对林芝云杉林进行了保护,保护区内的林芝云杉林属于较稳定的群落。通过研究保护区内原始林芝云杉林的空间结构特征,调整林分结构参数来优化林分结构,为保护区外大面积受人为干扰的林芝云杉的结构调整提供参考依据。择伐是混交林经营的关键部分^[34-37]、也是调整林分空间结构的主要措施,对林芝云杉林可进行择伐和卫生伐,减少林分中处于零度和弱度混交以及遭受病虫害的林木,尽量保留单株为随机分布的树木,可以考虑采取

补植珍贵树种和优良乡土树种,提高林分密度^[38]和混交度,增加树种的空间隔离程度,维持生态系统生物多样性有利于林芝云杉林分内物种的天然更新。同时,使林分的格局调整为随机分布状态,空间结构维持在最优状态,为今后深入研究该种群格局和维持健康发展奠定基础。

参考文献:

- [1] 雷相东,唐守正. 林分机构多样性指标研究综述[J]. 林业科学, 2002,38(3):140-146.
LEI X D, TANG S Z. Review of the research on the diversity index of the stand structure[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(3):140-146. (in Chinese)
- [2] 亢新刚. 森林经理学[M]. 4 版. 北京:中国林业出版社, 2011: 334.
- [3] 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(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)
- [4] 毛沂新,张慧东,王睿照,等. 辽东山区原始阔叶红松林主要树种空间结构特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9):2933-2940.
MAO Y X, ZHANG H D, WANG R Z, et al. Spatial structure characteristics of the main tree species in a mixed broadleaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest in a mountainous area of eastern Liaoning Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9):2933-2940. (in Chinese)
- [5] 孙明港,王新杰. 长白山地区白桦红松混交林结构特征分析[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5):18-27.
SUN M G, WANG X J. Structure characteristics of mixed forest of *Betula platyphylla* and *Pinus koraiensis* in Changbai Mountains, [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 36(5):18-27. (in Chinese)
- [6] 金铭,李毅,刘贤德,等. 祁连山青海云杉林空间结构分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(4):587-593.
JIN M, LI Y, LIU X D, et al. Analysis on spatial structure of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(4):587-593. (in Chinese)
- [7] 王伟平,王玉杰,李绍才,等. 四川盆地周山地 5 种典型林分的空间结构对比分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(2):43-53.
WANG W P, WANG Y J, LI S C, et al. A comparative analysis of spatial structure of five typical forests in mountainous area of Sichuan Basin[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(2):43-53. (in Chinese)
- [8] 李远发. 林分空间结构参数二元分布的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2013.
- [9] 梁文俊,魏曦,赵伟文,等. 基于二元分布空间结构参数的林分结构研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(4):540-544.
LIANG W J, WEI X, ZHAO W W, et al. Stand structure based on binary distribution spatial structure parameters[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(4):540-544. (in Chinese)
- [10] 和敬渊,王新杰,王开,等. 杨桦次生林林分空间结构参数多元分布研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2):22-33.
HE J Y, WANG X J, WANG K, et al. Multivariate distribution of spatial structure parameters of *Populus davidiana-Betula platyphylla* secondary forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2):22-33. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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)
- [13] 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 northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(4):21-31. (in Chinese)
- [14] 林玲,罗建. 林芝云杉不同地理种源苗期性状变异[J]. 林业科学研究, 2014, 27(4):557-561.
LIN L, LUO J. Variation in traits of *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* seedlings from different provenances[J]. Forest Research, 2014, 27(4):557-561. (in Chinese)
- [15] 罗建,方江平,王国严. 林芝云杉群落特征的研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(2):113-119.
LUO J, FANG J P, WANG G Y. Studies on the characteristics of *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* communities in Xizang (Tibet), China[J]. J Trop Subtrop Bot, 2011, 19(2):113-119. (in Chinese)
- [16] 卢杰,李江荣,郭其强,等. 藏东南林芝云杉种群结构与数量动态[J]. 林业资源管理, 2014(4):67-73.
LU J, LI J R, GUO Q Q, et al. Population structure and quantitative dynamics of *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* in southeast Tibet[J]. Forest Resources Management, 2014(4):67-73. (in Chinese)
- [17] 方江平. 西藏南伊沟林芝云杉林生物量与生产力研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(5):582-589.
FANG J P. Study on biomass and productivity of *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* forest in Nanyigou of Tibet[J]. Forest Research, 2012, 25(5):582-589. (in Chinese)
- [18] 汪松,解焱. 中国物种红色名录:第 1 卷 红色名录[M]. 北京:高等教育出版社, 2004:303.
- [19] 姚慧芳,卢杰,王超,等. 波密岗乡华山松林优势植物空间格局及其关联性[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4):1-8.
YAO H F, LU J, WANG C, et al. Spatial pattern and correlation of dominant plants in *Pinus armandii* forest in Bomi Gang Township[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 36(4):1-8. (in Chinese)
- [20] 陈婷婷,徐辉,杨青,等. 武夷山常绿阔叶林空间结构参数分布特征[J]. 生态学报, 2018, 38(5):1817-1825.

- CHEN T T, XU H, YANG Q, *et al.* Spatial distribution characteristics of an evergreen broad-leaved forest in the Wuyi Mountains, Fujian Province, southeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1817-1825. (in Chinese)
- [21] 惠刚盈, Klaus von Gadow, 胡艳波. 林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J]. *林业科学研究*, 2004, 17(6): 687-692.
- HUI G Y, KLAUS VON G, HU Y B, *et al.* The optimum standard angle of the uniform angle index [J]. *Forest Research*, 2004, 17(6): 687-692. (in Chinese)
- [22] 惠刚盈, Klaus von Gadow, Matthias A. 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, KLAUS VON G, MATTHIAS A. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. *Forest Research*, 1999, 12(1): 4-9. (in Chinese)
- [23] 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. (in Chinese)
- [24] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势[J]. *林业科学*, 2010, 46(1): 117-122.
- TANG M P. Advances in study of forest spatial structure [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(1): 117-122. (in Chinese)
- [25] STAUDHAMMER C L, LEMAY V M. Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(7): 1105-1115.
- [26] ISHII H. Exploring the relationships among canopy structure, stand productivity, and biodiversity of temperate forest ecosystems [J]. *Forest Science*, 2004, 50(3): 342-355.
- [27] 高辉, 方江平, 刘丽娟, 等. 西藏原始林芝云杉林的空间结构与环境的关系[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 38(5): 95-103.
- GAO H, FANG J P, LIU L J, *et al.* Relationship between spatial structure and environment of original *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* forest in Tibet [J]. *Journal of Guangxi Normal University: Nature Science Edition*, 2020, 38(5): 95-103. (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. *tianshanica* standing tree at different scale [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 35(2): 153-159. (in Chinese)
- [29] 杨秀清, 史婵, 王旭刚, 等. 关帝山寒温性云杉次生林样地树种组成、结构和空间分布[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1421-1430.
- YANG X Q, SHI C, WANG X G, *et al.* Species composition, structure and spatial distribution of secondary cold temperate *Picea* forest in Guandi Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1421-1430. (in Chinese)
- [30] 龚直文, 顾丽, 亢新刚, 等. 长白山森林次生演替过程中林木空间格局研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(2): 92-99.
- GONG Z W, GU L, KANG X G, *et al.* Spatial pattern of forests during secondary succession in Changbai Mountain, northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(2): 92-99. (in Chinese)
- [31] 张健, 郝占庆, 宋波, 等. 长白山阔叶红松林中红松与紫椴的空间分布格局及其关联性[J]. *应用生态学报*, 2007(8): 1681-1687.
- ZHANG J, HAO Z Q, SONG B, *et al.* Spatial distribution patterns and associations of *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007(8): 1681-1687. (in Chinese)
- [32] 张莉, 张小平, 陆畅, 等. 安徽琅琊山青檀种群空间格局[J]. *林业科学*, 2012, 48(2): 9-15.
- ZHANG L, ZHANG X P, LU C, *et al.* Spatial pattern of *Pteroceltis tatarinowii* populations in Langya Mountain of Anhui Province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(2): 9-15. (in Chinese)
- [33] 杨华, 李艳丽, 沈林, 亢新刚. 长白山云冷杉针阔混交林主要树种空间分布及其关联性[J]. *生态学报*, 2014, 34(16): 4698-4706.
- YANG H, LI Y L, SHEN L, *et al.* Spatial distributions and associations of main tree species in a spruce-fir forest in the Changbai Mountains area in northeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4698-4706. (in Chinese)
- [34] KINT V. Structural development in ageing temperate Scots pine stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 214(1/3): 237-250.
- [35] COURBAUD B, GOREAUD F, DREYFUS P, *et al.* Evaluating thinning strategies using a tree distance dependent growth model: some examples based on the CAPSIS software "uneven-aged spruce forests" module [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 145(1/2): 15-28.
- [36] 董灵波, 刘兆刚. 樟子松人工林空间结构优化及可视化模拟. *林业科学*, 2012, 48(10): 77-85.
- DONG L B, LIU Z G. Visual management simulation for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation based on optimized spatial structure [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(10): 77-85. (in Chinese)
- [37] 李语晨, 程金花, 李明峰, 等. 湖北省九华山林场不同树种配置杉阔混交林林分空间结构特征分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 1908-1916.
- LI Y C, CHENG J H, LI M F, *et al.* Analysis of the stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* broadleaved mixed plantation on a Jiuhua Mountain farm, Hubei Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 1908-1916. (in Chinese)
- [38] 陈明辉, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 结构化森林经营对东北阔叶红松林森林质量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(5): 19-30.
- CHEN M H, HUI G Y, HU Y B, *et al.* Impacts of structure-based forest management on forest quality of broadleaved Korean pine forests in northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(5): 19-30. (in Chinese)