网络出版时间:2025-09-10 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.03.010

兴安落叶松天然次生林空间结构特征研究

王新宇[1],郝帅[1,2],王冰[1,2],张秋良[1,2],张欣[1,3],吕昌伟[3]

(1 内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019;2 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站,内蒙古 根河 022350;3 内蒙古大学 生态与环境学院,内蒙古 呼和浩特 010020)

[摘 要] 【目的】实现兴安落叶松天然次生林空间结构一维到多维的无破坏性解译分析,从不同的层次和角度全面系统地描述林分结构特征,为兴安落叶松天然次生林林分结构调整优化提供理论依据。【方法】以兴安落叶松天然次生林为研究对象,基于样地调查数据和背包式激光雷达(backpack laser scanning,BLS)数据,通过计算角尺度、大小比数、混交度和密集度等林分空间结构参数,从多元分布角度探究兴安落叶松天然次生林的空间结构特征。【结果】①背包式激光雷达单木分割精度 $F=0.89$。②样地林木空间位置分布形式呈均匀和随机分布;林木大小分化不明显;空间隔离程度为中度和弱度混交;空间密集度为很密集。③研究区内不存在 4 方面组合不合理林木,3 方面和 2 方面组合不合理林木相对频率值分别为 1.75% 和 3.99%。【结论】研究区内兴安落叶松天然次生林存在混交度较低、树种结构单一的结构不合理问题;背包式激光雷达数据可用于兴安落叶松天然次生林空间结构分析;林分空间参数多元分布可以精确地获取不合理结构组合,可用于兴安落叶松天然次生林空间调整研究。

[关键词] 兴安落叶松;林分空间结构;多元分布;背包式激光雷达

[中图分类号] S758.5;S771.8 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)03-0092-12

Study on spatial structure characteristics of *Larix gmelinii* natural secondary forest

WANG Xinyu[1], HAO Shuai[1,2], WANG Bing[1,2], ZHANG Qiuliang[1,2], ZHANG Xin[1,3], LÜ Changwei[3]

(1 *Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010019, *China*; 2 *National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Daxing'anling, Genhe, Inner Mongolia* 022350, *China*; 3 *School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to achieve non-destructive interpretation and analysis of the spatial structure of natural secondary forests of *Larix gmelinii* from one dimension to multiple dimensions, and to comprehensively and systematically describe the structural characteristics of the forest stand from different levels and perspectives, to provide theoretical basis for the adjustment and optimization of its forest stand structure. 【Method】 The natural secondary forest of *Larix gmelinii* was taken as the research object. Based on the sample plot survey data and backpack laser scanning (BLS) data, the spatial structure parameters of the stand, such as uniform angle index, neighborhood comparison, mingling degree and crowding degree, were calculated to explore the spatial structure characteristics of the natural secondary forest of *Larix gmelinii* from the perspective of multivariate distribution. 【Result】 ① The single tree segmenta-

[收稿日期] 2024-12-08 [修回日期] 2025-03-19

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2023YFF1304002);内蒙古自治区重点研发计划项目(2023YFDZ0026);内蒙古自然科学基金项目(2025MS03014,2024QN03077);内蒙古农业大学林学学科自设科研项目(LX20250625-10);内蒙古自治区科技计划项目(2025KYPT0178)

[作者简介] 王新宇(2001—),男,内蒙古乌兰察布人,在读硕士,主要从事林业遥感研究。E-mail:wxy15947046861@163.com

[通信作者] 王冰(1981—),女,山东潍坊人,教授,博士,博士生导师,主要从事林业遥感研究。E-mail:wbingbing2008@126.com

tion accuracy of BLS is 0.89 ($F=0.89$). ② The spatial distribution of trees in the sample plots is uniform and random; the differentiation of tree size is not obvious; the degree of spatial isolation is moderate and low mixing; the spatial intensity is very high. ③ There are no trees with unreasonable combinations of four aspects in the research area. The relative frequency values of trees with unreasonable combinations of three aspects and two aspects are 1.75% and 3.99%, respectively.【Conclusion】 The natural secondary forest of *Larix gmelinii* in the research area showed the structural problems of low mingling degree and single tree species. The BLS data can be used for spatial structure analysis of natural secondary forest of *Larix gmelinii*. The multivariate distribution of stand spatial parameters can be used to accurately obtain the unreasonable structure combination, which provides a scientific basis for the spatial adjustment of natural secondary forest of *Larix gmelinii*.

Key words: *Larix gmelinii*; stand spatial structure; multivariate distribution; backpack laser scanning

森林经营的核心目标是促进和培育健康稳定、优质高效的森林生态系统，多功能与多效益统筹，维持最佳的森林空间结构[1]。森林空间结构体现了林分在林地上的分布格局及其属性在空间上的排列方式，以及树木之间分布、大小、距离等空间关系[2-3]。它反映了森林群落内物种的空间关系，决定了树木之间的竞争势及其空间生态位，在很大程度上决定了林分的稳定性、发展的可能性和经营空间的大小[4-5]，因此森林空间结构研究是制定森林经营方案的重要前提[6]。前人已根据角尺度（uniform angle index，W）、大小比数（neighborhood comparison，U）、混交度（mingling degree，M）和密集度（crowding degree，C）等[7]定量指标进行了空间结构的相关研究。和敬渊等[8]运用角尺度、大小比数和混交度分析了两种天然起源的杨桦次生林空间结构特征；何见等[9]运用树种组成、林分直径分布、密集度、混交度、大小比数和角尺度分析了天然次生阔叶混交林空间结构；安慧君等[10]采用混交度和角尺度对不同发育阶段阔叶红松（*Pinus koraiensis*）林的空间结构进行了研究。这些研究均采用一元分布分析林分空间结构，只能反映林分某空间结构参数的单一信息。结合林分空间结构参数多元分析，可在多维度上更直观地反映林分的空间结构。张岗岗等[11]采用空间结构参数 N 元分布对小陇山锐齿栎（*Quercus aliena* var. *acuteserrata*）天然混交林的空间结构特征进行了分析；向钦等[12]采用结构参数多元分布分析了木林子天然林的林分空间结构；WAN 等[13]采用结构参数的二元分布分析了天然栎林的空间结构。上述研究都是基于人工实测数据，工作量大、效率低、成本高，且破坏性强。

激光雷达（light detection and ranging，LiDAR）是一种主动遥感技术，对植被空间结构和地形具有较强的检测能力，在外业调查中有着不可比拟的优势，LiDAR 扫描可以高效获取大量的森林资源信息，节约大量的资源和成本且可明显提高工作效率[14-15]。LiDAR 技术可以在一定程度上取代人工作业，对森林进行高精度、快速和无损的数据收集，极大地提高了森林信息采集的效率和精度[16]。目前地基激光雷达（terrestrial laser scanning，TLS）和机载激光雷达（airborne laser scanning，ALS）在林业中的应用研究已趋于成熟，但二者外业成本较高，数据处理较为繁琐，不适用于小范围监测。背包式激光雷达（backpack laser scanning，BLS）作为新型激光雷达扫描仪，具有便携、易操作、效率高等优点，其应用于林分空间结构分析的研究还相对较少。

兴安落叶松（*Larix gmelinii*）是大兴安岭的主要优势树种，在生态和经济方面都有着十分重要的价值。本研究以兴安落叶松天然次生林为研究对象，基于样地调查数据和 BLS 数据，开展空间结构的多元分布研究，实现无破坏性地从一维到多维对兴安落叶松林林分空间结构解译分析，从不同的层次和角度全面系统地描述林分结构特征，以期为兴安落叶松天然次生林林分结构调整优化提供理论依据。

1　研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭根河林业局潮查林场内，属于温带大陆性气候，全年冬季长、夏季短，年平均气温 −5.4 ℃，年平均降水量约 500 mm。研究区内的主要乔木树种有兴安落叶松、白桦（*Betula platyphylla*）和山杨（*Populus davidiana*）等。

2　研究方法

2.1　数据获取

2.1.1　野外调查数据　2023 年在研究区内布设 3

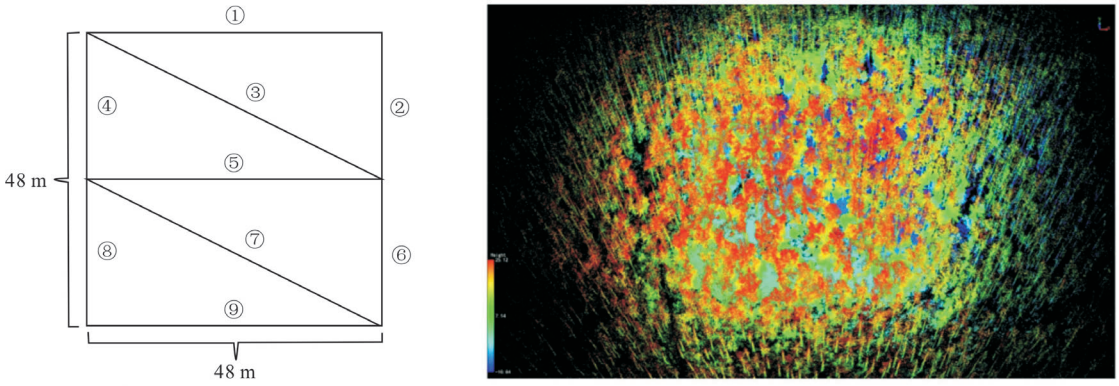
块兴安落叶松天然次生林样地,样地大小为 48 m×48 m。对每块样地内树木逐一编号,并进行每木检尺,分别测量单木的胸径、树高、冠幅、位置坐标和树种等信息。样地每木调查起测胸径为 5 cm。3 块样地的基本情况见表 1。

表 1 人工实测样地基本情况

Table 1 Basic information of manually measured sample plots

样地号 Sample No.	地理坐标 Geographical coordinates	林分密度/(株·hm^{-2}) Stand density	树种组成/% Tree species composition		平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	平均冠幅/m Average crown
			兴安落叶松 Larix gmelinii	白桦 Betula platyphylla			
1	50°54′14.847″N、121°29′38.782″E	1 293	90	10	11.6	11.9	3.2
2	50°54′18.576″N、121°29′29.490″E	1 597	90	10	10.4	9.9	2.8
3	50°54′16.969″N、121°29′25.478″E	1 363	60	40	11.4	11.2	2.8

2.1.2 BLS 数据 同期,使用 BLS(LiBackpack DGC50,北京数字绿土科技有限公司)在 3 块样地内完成数据采集。数据采集前,先进行合理的路线规划,如图 1-A 所示,序号表示路线顺序,可以完整采集样地内单木数据,同时减少数据冗余。采集后点云数据如图 1-B 所示。



A.扫描路线图 Scanning route map B.扫描结果图 Scanning result image

①~⑨表示路线顺序。①-⑨ represents the route sequence.

图 1 样地扫描示意图

Fig. 1 Schematic figures of plot scanning

2.2 空间结构单元确定

空间结构单元由任意 1 株对象木与其距离最近的 n 株相邻木共同构成[17]。已有研究表明 $n=4$ 时最适合分析林分空间结构特征[18-19],因此本研究基于 4 株相邻木的空间结构单元进行林分空间结构特征分析。为提高林分空间结构分析的准确性,采用距离缓冲法消除边缘效应[20],在样地四周设置宽 5 m 的带状缓冲区,缓冲区内的树木只做核心区的相邻木处理,不作为对象木,核心区(38 m×38 m)内的树木既作对象木又作相邻木。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 单木分割、数据提取及精度检验 本研究使用 LiDAR360 软件进行点云数据处理。在布设样地时使用 GPS 获取样地四角的坐标信息,通过坐标生成矢量文件对点云数据进行裁剪,进而提高对点云数据处理效率。裁剪完成后,逐一进行重采样、去噪和地面点归一化等一系列操作;之后对归一化数据标记种子点,使用种子点文件对点云数据进行单木分割;然后对分割完的点云数据进行单木点云编辑,以提高单木分割的精度;最后通过统计单木功能提取所需的单木数据(胸径、树高、冠幅和坐标信息)。

选取 1 块样地中的林木为样本,探究 BLS 的扫描精度。对提取单木数据与实测单木数据进行 1∶1 匹配[21],以召回率(r)、精确度(p)和 F(F-score)进行精度验证[22],见公式(1)~(3)。

$$r=\frac{T_P}{T_P+F_N}; \tag{1}$$

$$p=\frac{T_P}{T_P+F_P}; \tag{2}$$

$$F=2\times\frac{r\times p}{r+p}。 \tag{3}$$

式中:T_P(true positive)表示正确分割的单木,即 1∶1 匹配的单木;F_N(false negative)表示未被分割

但真实存在的单木，即欠分割；F_p(false positive)表示被多分割出来的单木，即过分割。

对提取的单木数据(胸径和冠幅)以均方根误差(root mean square error，RMSE)和相对均方根误差(relative root mean square error，rRMSE)指标进行精度评价，见公式(4)～(5)。

$$\mathrm{RMSE}=\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}; \tag{4}$$

$$\mathrm{rRMSE}=\frac{\mathrm{RMSE}}{\bar{y}_i}\times 100\%。 \tag{5}$$

式中：y_i 为实测单木数据值；$\hat{y}_i$ 为提取单木数据值；n 为样木数；$\bar{y}_i$ 为平均实测值。

2.3.2　林分空间结构参数及多元分布的计算　本研究选择角尺度(W)、大小比数(U)、混交度(M)和密集度(C)等 4 个空间结构参数，通过各指标不同组合之间的联系，揭示出它们之间的数量关系，反映出多元分布(零元、一元、二元、三元和四元)的林木结构信息[23]。依据数值从小到大将 4 个林分空间结构参数分为 5 个等级，分别为Ⅰ(0)、Ⅱ((0，0.25])、Ⅲ((0.25，0.5])、Ⅳ((0.5，0.75])和Ⅴ((0.75，1])，各空间结构参数计算公式及等级划分见文献[24]。

零元分布：4 个空间结构参数(W、U、M 和 C)分别取平均值来评价各样地的林分空间结构特征。一元分布：每个林分空间结构参数的 5 个等级，其相对频率值为林分空间结构参数的一元分布[24]。二元分布：将结构参数按相对应的等级，两两结合得到 25 种不同组合相对频率分布[13]。三元分布：将任意 2 个结构参数与另外 1 个结构参数按照等级交叉联立，形成 125 种不同结构参数组成的相对频率分布[25]。四元分布：将任意 2 个参数与另外 2 个参数按照等级对应交叉联立，得到 625 种不同结构组成的相对频率分布[26]。

3　结果与分析

3.1　单木数据提取结果

以 1 号样地为例，对分割后的点云数据进行分析处理，除去倾倒、枯立木等异常数据，统计单木数据，与实测单木数据进行 1∶1 匹配。单木识别结果显示，1 号样地实测株数为 298 株，分割株数为 330 株，1∶1 正确匹配株数为 266 株。本研究得到的召回率 r 为 89%，精确度 p 为 89%，F 为 0.89，说明单木识别精度较高。根据图 2 单木提取结果来看，胸径提取精度较高，R^2 为 0.94，提取胸径与实测胸径高度拟合，RMSE 为 1.57 cm，rRMSE 为 13.44%；冠幅提取精度偏低，R^2 为 0.64，RMSE 为 0.91 m，rRMSE 为 28.79%。

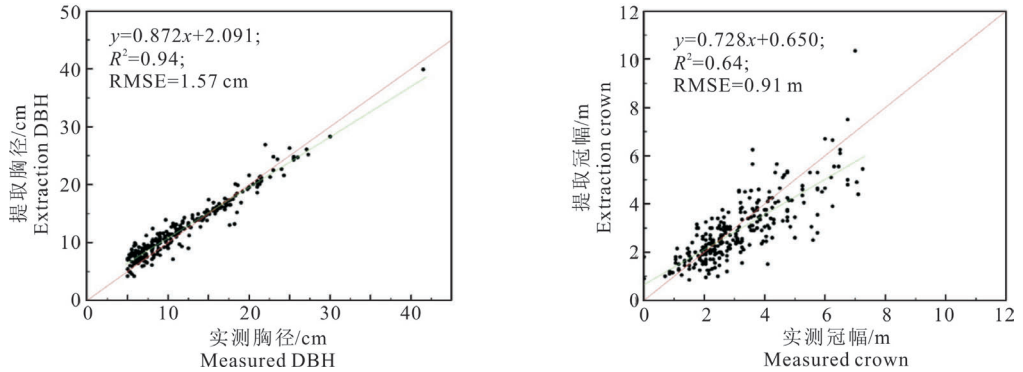


图 2　提取参数与实测参数散点图

Fig. 2　Scatter plots of extracted parameters and measured parameters

3.2　空间结构特征分析

3.2.1　空间结构参数验证　分别基于实测数据与 BLS 探测数据计算林分空间结构参数多元分布，以样地 1 为例并对其进行配对 t 检验，结果(表 2)表明，BLS 数据与实测数据计算的林分空间结构多元分布间差异不显著($P>0.05$)。

3.2.2　零元分布　零元分布结果(表 3)表明，3 块样地平均角尺度($\bar{W}$)分别为 0.47，0.45 和 0.51，表明样地 1 和 2 内林木整体呈现均匀分布($0\leqslant\bar{W}\leqslant 0.475$)，样地 3 呈现随机分布($0.475\leqslant\bar{W}\leqslant 0.517$)；3 块样地平均大小比数($\bar{U}$)分别为 0.49，0.49 和 0.48，表明样地内林木整体处于中庸状态。1，2 号样地平均混交度($\bar{M}$)分别为 0.13 和 0.11，林分整体表现为弱度混交；3 号样地平均混交度($\bar{M}$)为 0.45，林分整体表现为中度混交。3 块样地平均密集度($\bar{C}$)相近，分别为 0.85，0.84 和 0.91，林分均处于很密集状态。

表 2 基于 BLS 点云数据与实测数据的空间结构多元分布配对 t 检验

Table 2 Pairing t-test of spatial structure multivariate distribution based on BLS point cloud data and measured data

类型 Types	配对 Pairing	平均值±标准误 Average± standard error	95%置信区间 95% confidence interval of difference		t	自由度 df	P 值 P value
			下限 Lower limit	上限 Upper limit			
零元分布 Average values	提取-实测 Extracted-Measured	−0.022±0.036	−0.091	0.136	0.630	3	0.573
一元分布 Univariate distribution	提取-实测 Extracted-Measured	0.000±1.615	−3.381	3.381	0.000	19	1.000
二分分布 Bivariate distribution	提取-实测 Extracted-Measured	0.000±0.244	−0.482	0.482	0.000	149	1.000
三元分布 Trivariate distribution	提取-实测 Extracted-Measured	0.000±0.052	−0.103	0.103	0.000	499	1.000
四元分布 Quadrivariate distribution	提取-实测 Extracted-Measured	0.000±0.017	−0.034	0.034	0.000	624	1.000

表 3 林分空间结构参数均值

Table 3 Mean values of spatial structure parameters of the forest stand

样地号 Sample No.	平均角尺度($\overline{W}$) Average uniform angle index	平均大小比数($\overline{U}$) Average neighborhood comparison	平均混交度($\overline{M}$) Average mingling degree	平均密集度($\overline{C}$) Average crowing degree
1	0.47	0.49	0.13	0.85
2	0.45	0.49	0.11	0.84
3	0.51	0.48	0.45	0.91

3.2.3 一元分布 一元分布结果(图 3)表明,3 块样地中林木处于随机分布($W=Ⅲ$)状态的个体相对频率值均超过 50%;非常均匀($W=Ⅰ$)和非常不均匀($W=Ⅴ$)的极端情况很少。3 块样地内林木优劣程度分化程度均匀。1 和 2 号样地中分别有 68.32%和 76.99%的林木与周围相邻木同属;3 号样地内多数林木处于弱度混交($M=Ⅱ$),相对频率值为 31.28%。3 块样地内多数林木密集程度表现为很密集($C=Ⅴ$),相对频率值分别为 57.76%,53.56%和 71.37%。

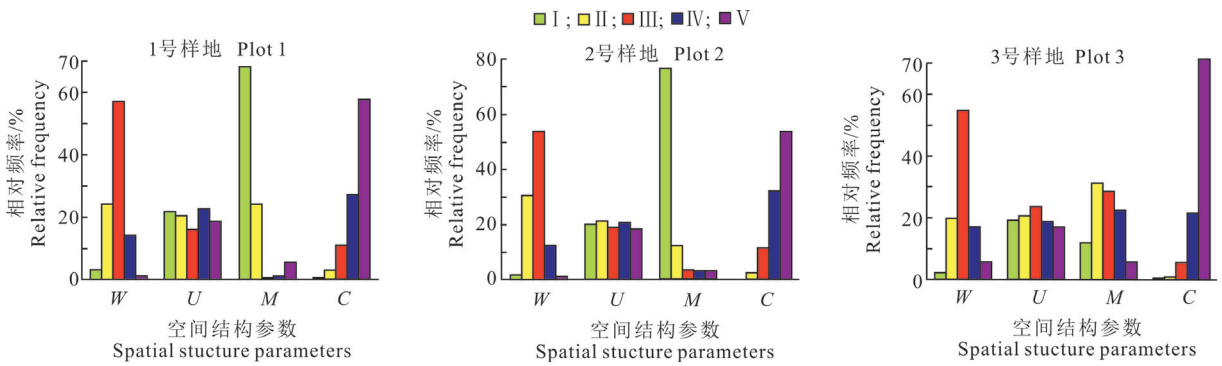


图 3 空间结构参数一元分布

Fig. 3 Univariate distributions of spatial structure parameters

3.2.4 二元分布 (1)角尺度和大小比数的二元分布。由图 4 可知,随着角尺度等级增大,大小比数的相对频率值整体先增大后减小。在随机分布格局下,大小比数的相对频率值最大,总相对频率值分别为 57.14%,53.97%和 55.07%,说明林分中有 53.97%~57.14%的林木处于随机分布。大小比数在非常均匀和非常不均匀的极端情况下分布较少。

(2)角尺度和混交度的二元分布。由图 5 可知,随着角尺度等级逐渐增大,混交度相对频率值先增大后减小,混交度的 5 个等级,在随机分布状态下取得最大值。当角尺度等级一定时($W=Ⅴ$ 除外),1 和 2 号样地内混交度相对频率值在零度混交($M=Ⅰ$)时最大,累计值分别为 68.32%和 76.99%;3 号样地内混交度相对频率值在弱度混交时最大,累计值为 31.28%。

(3)角尺度和密集度的二元分布。由图 6 可知,3 块样地内不同等级密集度均在随机分布格局下取得最大相对频率值。随机分布格局下,相对频率值随着密集度等级增大而增大,处于很密集的林木个体相对频率值最多,分别为 31.68%,27.62%和 39.21%。

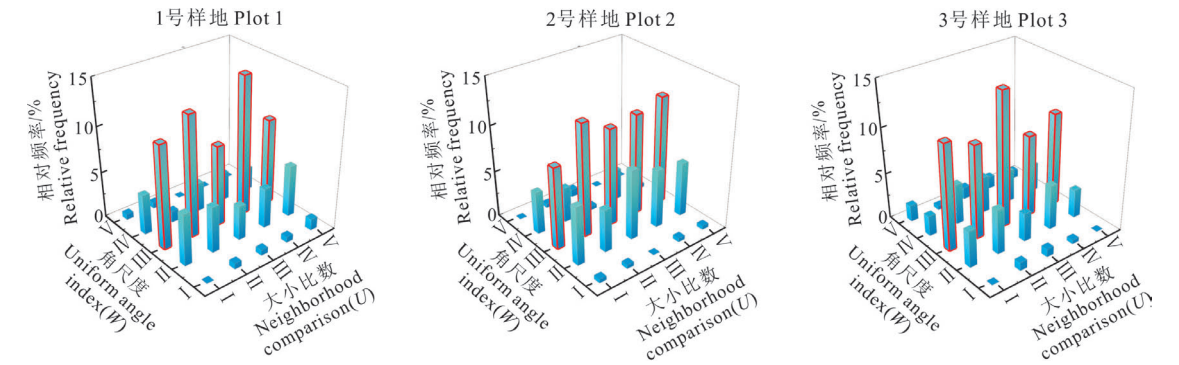


图 4　空间结构参数角尺度与大小比数的二元分布

Fig. 4　Binary distributions of spatial structural parameters with uniform angle index and neighborhood comparison

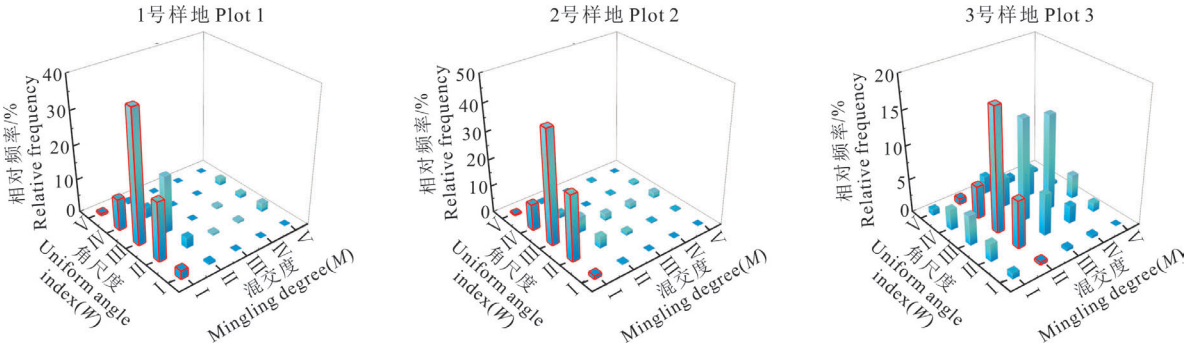


图 5　空间结构参数角尺度与混交度的二元分布

Fig. 5　Binary distributions of spatial structural parameters with uniform angle index and mingling degree

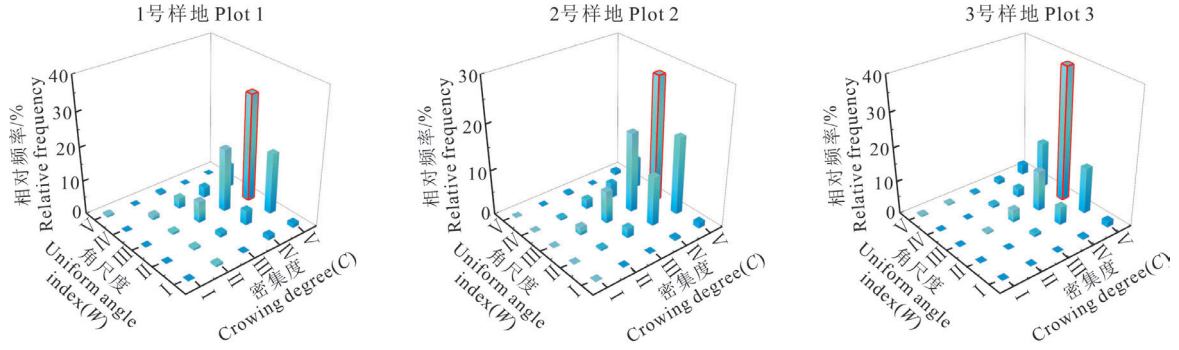


图 6　空间结构参数角尺度与密集度的二元分布

Fig. 6　Binary distribution of spatial structural parameters with uniform angle index and crowing degree

(4)大小比数和混交度的二元分布。由图 7 可知，1 和 2 号样地内各优劣等级的林木个体主要分布于零度混交，其中优势木($U=\text{Ⅰ}$)相对频率值分别为 15.53%和 15.48%。3 号样地内各优劣等级的林木个体大多分布于弱度混交，优势木主要表现比较密集($C=\text{Ⅳ}$)，相对频率值为 6.61%。

(5)大小比数和密集度的二元分布。由图 8 可知，3 块样地内不同优劣等级的林木在中度密集($C=\text{Ⅲ}$)及以下等级上分布较少，有 80%分布于比较密集和很密集，很密集程度累计值最高。优势木多数表现很密集状态，相对频率值分别为 18.63%，12.97%和 15.86%。

(6)密集度和混交度的二元分布。由图 9 可知，在各个混交度等级下，样地内多数林木个体集中分布于很密集等级。在 1 和 2 号样地中，大多数林木处于比较密集及以上等级与零度混交组合，很密集且零度混交组合的相对频率值最高，其值分别为 40.99%和 41.00%；在 3 号样地中，大多数林木处于很密集与各混交度等级组合，其中处于很密集且弱度混交的林木个体最多，相对频率值为 22.47%。

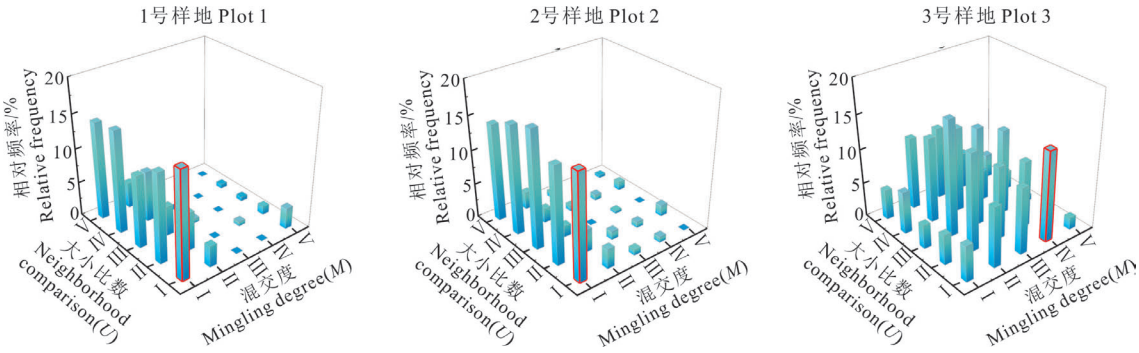


图 7 空间结构参数大小比数与混交度的二元分布

Fig. 7 Binary distributions of spatial structural parameters with neighbor comparison and mingling degree

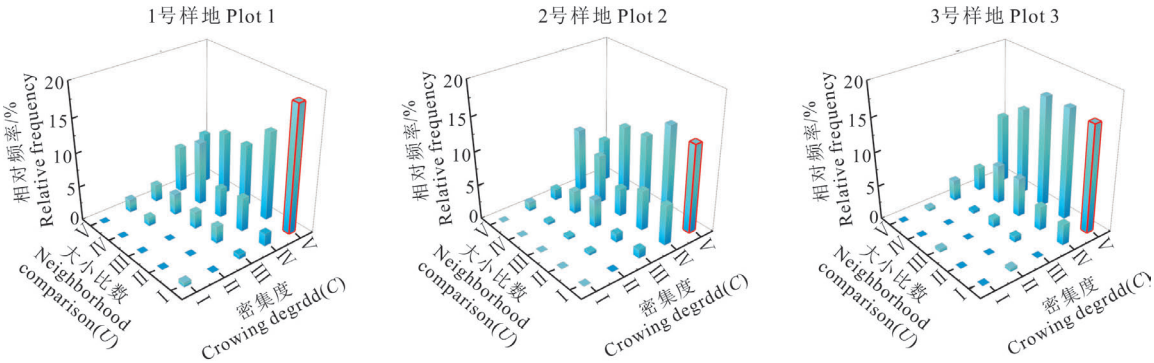


图 8 空间结构参数大小比数与密集度的二元分布

Fig. 8 Binary distributions of spatial structural parameters with neighborhood comparison and crowing degree

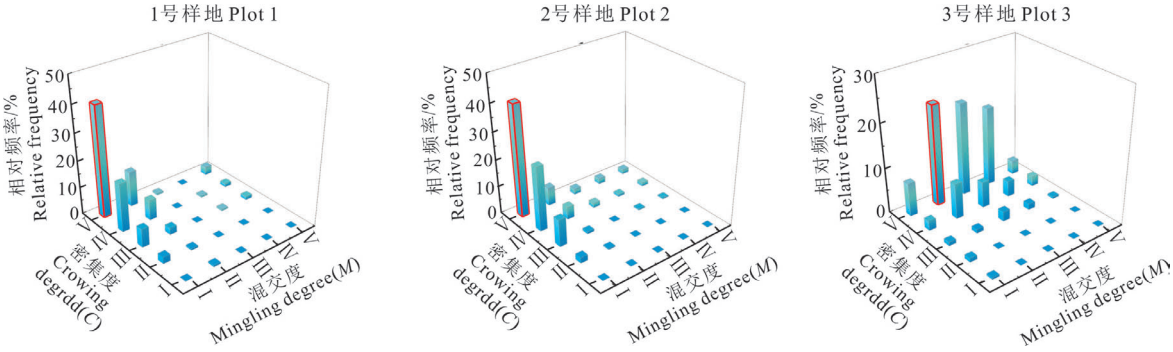
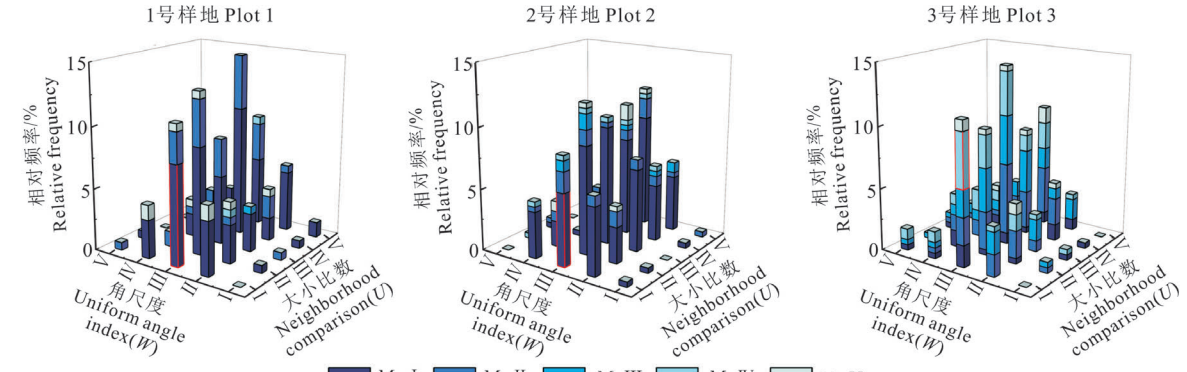


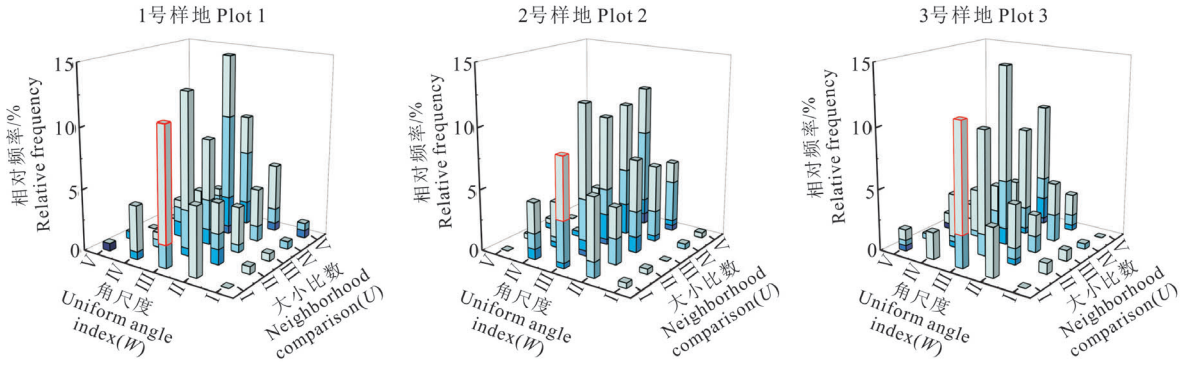
图 9 空间结构参数密集度与混交度的二元分布

Fig. 9 Binary distributions of spatial structural parameters with crowing degree and mingling degree

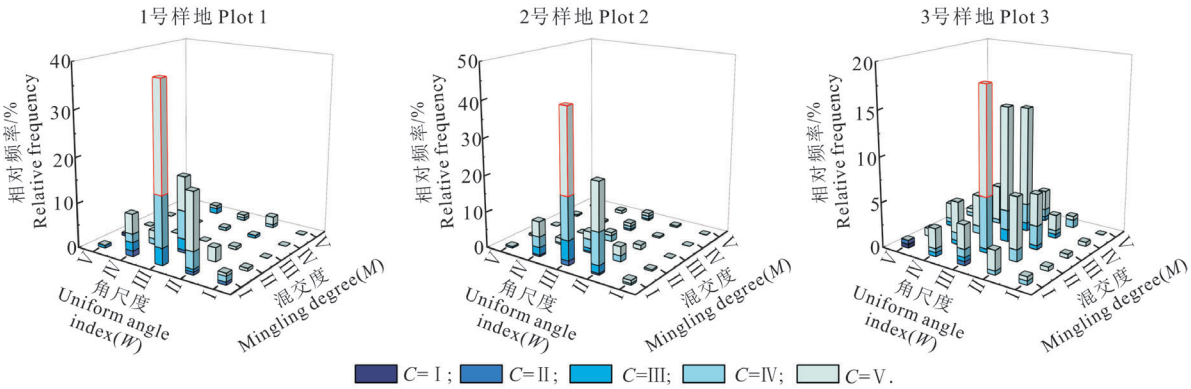
3.2.5 三元分布 在 4 个空间结构参数中任选 3 个进行分析,结果如图 10 所示。由图 10 可知,同一混交度和大小比数等级林木大多处于随机分布;随机分布的同一优劣等级下,1 和 2 号样地林木大多与周围相邻木同属,其中分别有 8.07%和 5.86%优势木处于零度混交状态,3 号样地内多数林木周围 4 株相邻木中有 1 株与对象木不同属,优势木主要集中分布于强度混交($M=\text{Ⅳ}$),相对频率值均为 4.41%。同一密集度和大小比数等级林木大多处于随机分布,在随机分布状态下优势木主要集中分布于很密集状态,相对频率值分别为 9.32%,5.02%和 8.81%。同一混交度和角尺度等级下,林木大多表现为很密集等级;随机分布格局下,1 和 2 号样地主要以零度混交与各密集度等级组合为主,其中很密集个体最多,相对频率值为 23.60%和 23.01%,3 号样地主要以弱度混交与各密集度等级组合为主,同样是以很密集个体最多,相对频率值为 11.89%。同一密集度和大小比数的林木,3 号样地的混交度较 1 和 2 号样地高,主要集中于弱度混交;1 和 2 号样地内分布最多的林木为零度混交下很密集的优势木,3 号样地则为弱度混交下很密集的亚优势($U=\text{Ⅱ}$)林木,相对频率值分别为 14.29%,10.46%和 6.61%。



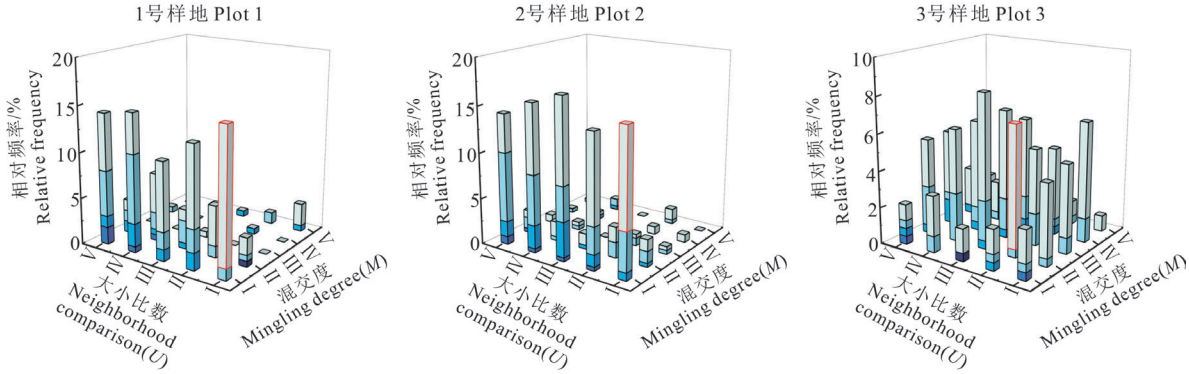
(A)角尺度、大小比数和混交度组合 Combination of uniform angle index,neighborhood comparison and mingling degree



(B)角尺度、大小比数和密集度组合 Combination of uniform angle index,neighborhood comparison and crowding degree



(C)角尺度、混交度和密集度组合 Combination of uniform angle index,mingling degree and crowding degree



(D)大小比数、混交度和密集度组合 Combination of neighborhood comparison,minglingdegree and crowding degree

图 10　空间结构参数的三元分布

Fig. 10　Trivariate distributions of spatial structure parameters

3.2.6 四元分布 由图 11 可知,相同大小比数和密集度下,在同一分布格局下,1 和 2 号样地混交度较差,3 号样地表现为弱度、中度($M=Ⅲ$)和强度混交;同一混交度等级,3 块样地中大多数林木处于随机分布。不同优劣等级和密集度下,1、2 号样地随机分布且弱度混交的相对频率值最大,3 号样地则为随机分布且中度混交的相对频率值最大,分别为 38.51%,48.52%和 18.93%。1 号样地内最常见林木结构单元为周围很密集且零度混交的随机分布优势木,相对频率值为 6.83%;2 号样地内最常见林木结构单元为,很密集零度混交且随机分布的亚劣势($U=Ⅳ$)林木和中庸木,相对频率值均为 5.86%;3 号样地内最常见林木结构单元为很密集且随机分布下的弱度混交中庸木,以及强度混交优势木,相对频率值均为 3.55%。

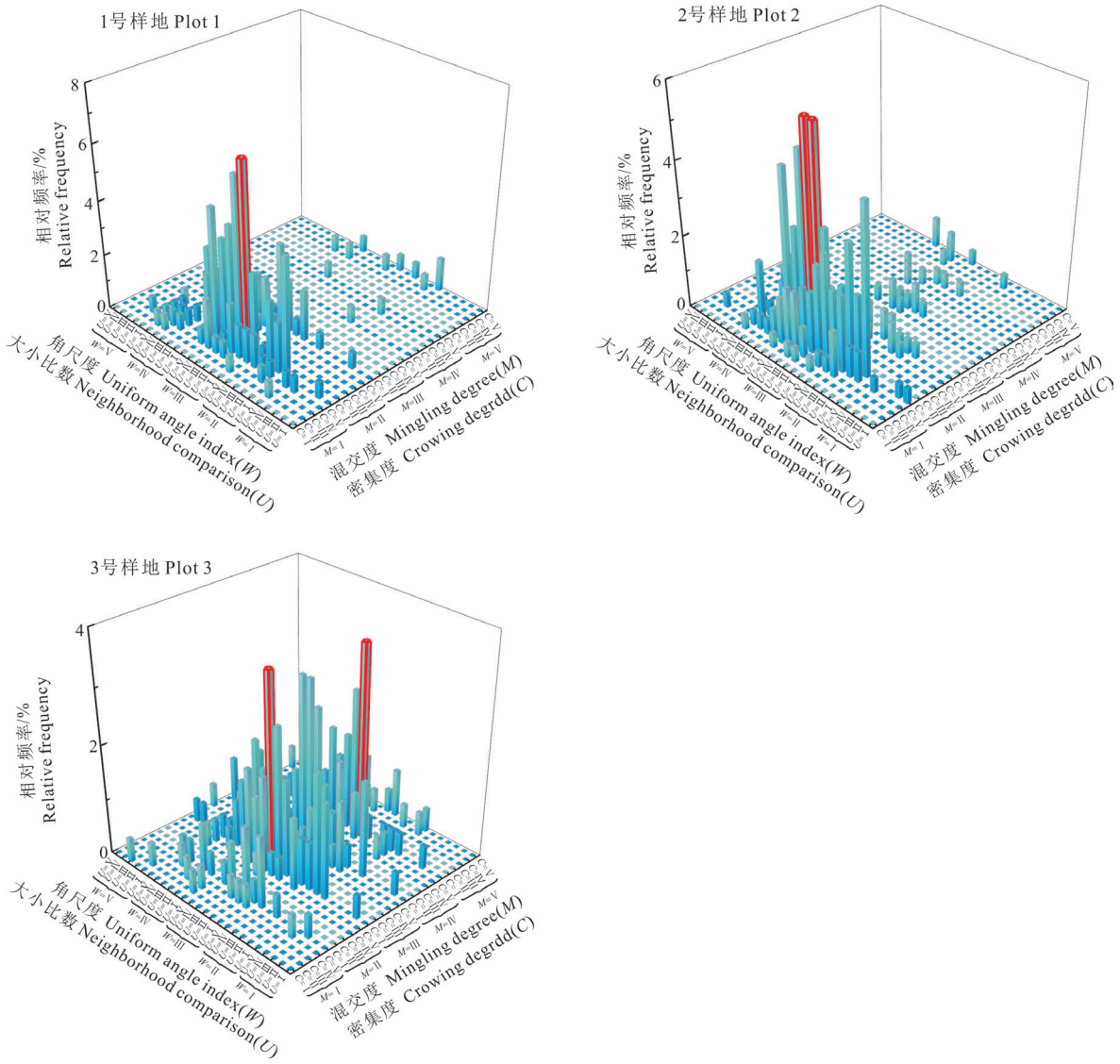


图 11 空间结构参数的四元分布

Fig. 11 Quadrivariate distributions of spatial structure parameters

3.3 林分结构优化

为促进林分正向演替,需对兴安落叶松次生林的林分结构进一步优化和调整。根据多元分布空间结构参数不合理性,精确定位出潜在采伐木位置,如图 12 所示。由图 12 可以看出,3 块样地中均无 4 个方面不合理组合(零度混交、绝对劣势、非常密集和非常不均匀分布)的林木。将以上 4 个不合理结构参数等级任选其中 3 个,与 1 个合理结构参数等级组合为 3 方面不合理性,由于 3 块样地内半数以上林木处于随机分布且无非常不均匀分布,优先考虑混交度、大小比数和密集度 3 个指标,如随机分布下零度混交、非常密集的绝对劣势林木,相对频率值分别为 2.48%,2.93%和 0%。将以上 4 个不合理结构参数等级任选其中 2 个,与 2 个合理结构参数

等级组合为 2 方面不合理，如随机分布下零度混交、非常密集的优势木，相对频率值分别为 6.83%，3.35%和 1.32%；随机分布下强度混交、非常密集的绝对劣势木，相对频率值分别为 0%，0.42%和 0.88%。

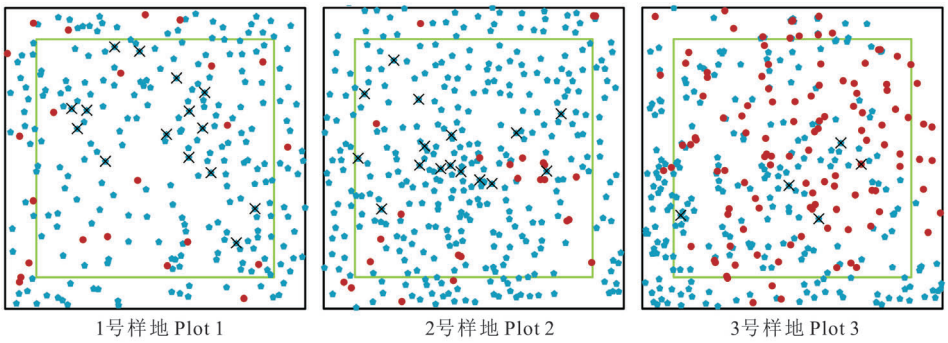


图 12　潜在采伐木位置

Fig. 12　Locations of potential felled trees

4　讨　论

以往研究林分空间结构的数据多数来自人工实地调查数据，其工作量大且成本高，不利于空间结构的深入拓展研究。本研究使用 BLS 获取数据，极大地提高了外业调查效率。BLS 在提取单木数据时存在过分割和欠分割情况，这是因为样地内林内情况较为复杂，将枯立以及未达到起测胸径的小树参与分割，数据处理时根据样地 4 角坐标裁剪 BLS 数据，部分位于样地边缘的林木被裁剪。本研究中，BLS 提取单木胸径的 R^2 为 0.94，冠幅 R^2 为 0.64，与黄旭等[27]基于背包式激光雷达估测落叶松单木因子信息精度相符合。这是由于林分内林木大多数个体处于很密集状态，无法正确清晰地识别树冠轮廓，导致树冠提取精度较低。为验证林分空间结构多元分布是否受单木数据提取精度的影响，进行 BLS 点云数据与实测数据的空间结构多元分布配对 t 检验，结果表明 BLS 数据与实测数据计算的林分空间结构多元分布间差异不显著，这与黄露波等[28]基于多源雷达数据分析阔叶红松林林分结构的结果一致，说明 BLS 数据可以代替野外调查数据进行林分空间结构的研究。

林分空间结构参数的多元分布可以为结构化森林经营对采伐木的精准判别提供理论依据，也提供了林分的分布格局、树种隔离程度、生长状况及拥挤情况等信息[28]。从零元和一元分布结果来看，3 块兴安落叶松次生林样地内整体表现为林木大小分化均匀且很密集，与刘燕等[29]对兴安落叶松天然次生林分空间结构特征的研究结果一致；林分内分布格局整体表现均匀或随机分布，在Ⅰ和Ⅴ等级上分布很少，这是由于林分是对兴安落叶松原始林干扰后形成的次生林[30]；样地 3 树种隔离程度较样地 1 和 2 大，样地内林木整体表现为中庸，但是样地 3 整体生长状态优于样地 1 和 2，可以看出混交度的提高在一定程度上有利于林木生长[31]。从二元到四元分布综合来看，多元分布细化并综合了各个林分结构参数，从多元角度表现出林分空间结构特征。从二元分布来看，大小比数、混交度和密集度随着角尺度等级增大先增大后减小，这 3 个空间结构参数主要分布于随机分布等级；同一大小比数下，样地内多数林木处于很密集状态，样地 1 和 2 内林木多数处于零度混交，样地 3 内林木在弱度、中度和强度混交均有分布；同一混交度下，样地内多数林木处于很密集状态。从三元分布来看，同一混交度或密集度和大小比数等级林木大多处于随机分布，同一混交度或大小比数和分布格局下，林木大多表现为很密集等级。从四元分布来看，样地 1 和 2 中各优劣等级林木主要分布于随机分布，很密集且零度混交，样地 3 则主要分布于随机分布且很密集状态下的弱度、中度和强度混交。无论空间结构参数如何组合，绝大多数林木均表现出随机分布或很密集。根据林分空间结构参数的多元分布可以看到林分空间结构的不合理性，从而可以精确定位出潜在采伐木的位置。样地内均不存在 4 方面不合理组合；3 方面不合理组合相对频率值分别为 2.48%，2.93%和 0%；2 方面不合理组合相对频率值分别 6.83%，3.77%和 2.20%。由于均不存在 4 方面不合理组合林木，所以将 3 方面和 2 方面不合理组合作为第 1 次、第 2

次采伐对象,除此之外,可以进行人工补植,提高林分混交度,改善林木生长状况。

5 结 论

本研究以兴安落叶松天然次生林为研究对象,基于 BLS 进行林分空间结构参数的多元分布分析,得出以下结论。

1)基于 BLS 数据进行单木分割 F 为 0.89,在兴安落叶松样地内分割效果较理想;由配对 t 检验,基于 BLS 空间结构参数多元分布与实测数据不存在显著差异($P>0.05$),BLS 数据可以进一步代替野外调查数据,用于林分空间结构研究。

2)基于 BLS 数据林分空间结构参数多元分布,分别从平均值、5 个取值等级及其交叉联合分布上系统描述了林分水平分布格局、林木生长优劣程度、树种隔离程度和林木生长空间等结构特征,样地林木呈均匀和随机分布;林木大小分化不明显;空间隔离程度为中度和弱度混交;空间密集度为很密集。无论空间结构参数如何组合,绝大多数林木均表现出随机分布、很密集状态。

3)林分结构调整时,可依据林分空间结构多元分布筛选林分中不合理组合,以不合理组合为主要调整目标,研究区内均无 4 方面不合理组合林木个体,潜在采伐木主要为 3 方面和 2 方面不合理组合林木个体。

[参考文献]

[1] 许文秀,吴金卓,林文树,等. 不同演替阶段红松阔叶混交林空间结构研究[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(10):106-111.
XU W X,WU J Z,LIN W S,et al. Study on the stand spatial structure of Korean pine and broad-leaved mixed forests at different age groups and interactive mechanism among the influencing factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2018,38(10):106-111.

[2] 汤孟平,唐守正,雷相东,等. 两种混交度的比较分析[J]. 林业资源管理,2004(4):25-27.
TANG M P,TANG S Z,LEI X D,et al. Comparison analysis on two minglings[J]. Forest Resources Management,2004(4):25-27.

[3] 李荣,罗惠文,宋于洋,等. 天山北坡天山云杉的种群结构特征和空间分布格局[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(1):91-96.
LI R,LUO H W,SONG Y Y,et al. Structure characteristics and spatial distribution of *Picea schrenkiana* population on the northern slopes of the Tianshan Mountain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(1):91-96.

[4] CARRER M,CASTAGNERI D,POPA I,et al. Tree spatial patterns and stand attributes in temperate forests:the importance of plot size,sampling design,and null model[J]. Forest Ecology and Management,2018,407:125-134.

[5] 肖欣,丁松,欧阳勋志. 井冈山国家自然保护区典型常绿阔叶林林分空间结构分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(3):133-140.
XIAO X,DING S,OUYANG X Z. Stand spatial structure of typical evergreen broad-leaved forests in Jinggang Mountain National Nature Reserve[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2016,44(3):133-140.

[6] 方景,孙玉军,郭孝玉,等. 基于 Voronoi 图和 Delaunay 三角网的杉木游憩林空间结构[J]. 林业科学,2014,50(12):1-6.
FANG J,SUN Y J,GUO X Y,et al. Stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* recreational forest based on Voronoi diagram and Delaunay triangulated network[J]. Scientia Silvae Sinicae,2014,50(12):1-6.

[7] 亢新刚. 森林经理学[M]. 4 版. 北京:中国林业出版社,2011.
KANG X G. Forest management[M]. 4th ed. Beijing:China Forestry Publishing House,2011.

[8] 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.

[9] 何见,肖正利,陈卫军,等. 天然次生阔叶混交林空间结构特征分析:以湖北省远安县为例[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(8):7-16.
HE J,XIAO Z L,CHEN W J,et al. Analysis of spatial structure characteristics of natural secondary broad-leaved mixed forest:taking Yuan'an County of Hubei Province as an example[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(8):7-16.

[10] 安慧君,惠刚盈,郑小贤,等. 不同发育阶段阔叶红松林空间结构的初步研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2005,36(6):714-718.
AN H J,HUI G Y,ZHENG X X,et al. Study on the spatial structure of broad-leaved Korean pine forest in the different growth stage[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition),2005,36(6):714-718.

[11] 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.

[12] 向钦,郭秋菊,艾训儒,等. 木林子天然林林分结构的时间动态变化特征[J]. 森林与环境学报,2022,42(6):576-584.
XIANG Q,GUO Q J,AI X R,et al. Temporal dynamic char-

acteristics of stand structure of natural forest in Mulinzi Nature Reserve[J]. Journal of Forest and Environment，2022，42(6)：576-584.

[13] WAN P，ZHANG G Q，WANG H X，et al. Impacts of different forest management methods on the stand spatial structure of a natural *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Xiaolongshan，China[J]. Ecological Informatics，2019，50：86-94.

[14] WANG M，IM J，ZHAO Y H，et al. Multi-platform LiDAR for non-destructive individual aboveground biomass estimation for Changbai larch (*Larix olgensis* henry) using a hierarchical Bayesian approach[J]. Remote Sensing，2022，14(17)：4361.

[15] 邹茂胜，孙毓蔓，李丹丹，等. 基于地基激光雷达数据的落叶松人工林削度方程构建[J]. 中南林业科技大学学报，2022，42(8)：90-100.
ZOU M S，SUN Y M，LI D D，et al. Construction of the taper equation of *Larix olgensis* plantations based on Terrestrial Laser Scanning data[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2022，42(8)：90-100.

[16] 解宇阳，王彬，姚扬，等. 基于无人机激光雷达遥感的亚热带常绿阔叶林群落垂直结构分析[J]. 生态学报，2020，40(3)：940-951.
XIE Y Y，WANG B，YAO Y，et al. Quantification of vertical community structure of subtropical evergreen broad-leaved forest community using UAV-Lidar data[J]. Acta Ecologica Sinica，2020，40(3)：940-951.

[17] 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.

[18] 惠刚盈，赵中华，张弓乔. 基于林分状态的天然林经营措施优先性研究[J]. 北京林业大学学报，2016，38(1)：1-10.
HUI G Y，ZHAO Z H，ZHANG G Q. et al. Priority of management measures for natural forests based on the stand state [J]. Journal of Beijing Forestry University，2016，38(1)：1-10.

[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(1)：23-27.
HUI G Y，HU Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. Forest Research，2001(1)：23-27.

[20] 周红敏，惠刚盈，赵中华，等. 林分空间结构分析中样地边界木的处理方法[J]. 林业科学，2009，45(2)：1-5.
ZHOU H M，HUI G Y，ZHAO Z H，et al. Treatment methods of plot boundary trees in spatial forest structure analysis [J]. Scientia Silvae Sinicae，2009，45(2)：1-5.

[21] REITBERGER J，SCHNÖRR C，KRZYSTEK P，et al. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LiDAR data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing，2009，64(6)：561-574.

[22] GOUTTE C，GAUSSIER E. A probabilistic interpretation of precision，recall and F-score，with implication for evaluation [M]//Lecture Notes in Computer Science. Berlin，Heidelberg：Springer Berlin Heidelberg，2005：345-359.

[23] ZHANG G G，HUI G Y，ZHANG G Q，et al. Telescope method for characterizing the spatial structure of a pine-oak mixed forest in the Xiaolong Mountains，China [J]. Scandinavian Journal of Forest Research，2019，34(8)：751-762.

[24] 张佳旺，董希斌，郭奔，等. 天然落叶松林不同演替阶段空间结构参数的多元分布[J]. 东北林业大学学报，2024，52(3)：1-9.
ZHANG J W，DONG X B，GUO B，et al. Different succession stages of natural *Larix gmelinii* forest multivariate distribution of spatial structure parameters[J]. Journal of Northeast Forestry University，2024，52(3)：1-9.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 黄旭，贾炜玮，王强，等. 背包式激光雷达的落叶松单木因子提取[J]. 森林工程，2019，35(4)：14-21.
HUANG X，JIA W W，WANG Q，et al. Study on individual tree factor extraction of *Larix olgensis* in backpack lidar[J]. Forest Engineering，2019，35(4)：14-21.

[28] 黄露波，甄贞，赵颖慧. 基于多源 LiDAR 的阔叶红松林林分空间结构特征分析[J]. 中南林业科技大学学报，2023，43(8)：36-50.
HUANG L B，ZHEN Z，ZHAO Y H. Stand spatial structure characterization of broad-leaved *Pinus koraiensis* forest based on multi-source LiDAR data[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2023，43(8)：36-50.

[29] 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.

[30] 惠刚盈，GADOW K V. 结构化森林经营原理[M]. 北京：中国林业出版社，2016：327-333.
HUI G Y，GADOW K V. Principles of structured-based forest management[M]. Beijing：China Forestry Publishing House，2016：327-333.

[31] 游晓庆，彭诗涛，郭孝玉，等. 闽楠天然次生林林分空间结构研究[J]. 江西农业大学学报，2016，38(4)：660-667.
YOU X Q，PENG S T，GUO X Y，et al. A study on the spatial structure of natural secondary *Phoebe bournei* forest[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis，2016，38(4)：660-667.

（责任编辑：屈李纯）