

DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.202504024

基于近景摄影测量技术的混交林空间结构分析

王怡, 胡文杰, 孙拥康, 袁传武, 吴文丰

(湖北省林业科学研究院, 湖北 武汉 430075)

摘要: 为探索近景摄影测量技术在混交林空间结构量化分析中的可行性, 以九峰实验林场的针阔混交人工林为研究对象, 提出一种基于智能手机影像的林分空间结构分析方法。通过采用多路径和多角度影像采集策略构建了样地林分冠层以下的三维点云模型, 采用最优圆算法识别并估测单木的位置和胸径。以样地调查获取的胸径、树高、冠幅实测数据和基于样地三维模型提取的胸径估测数据为权重因子, 分别构建基于实测胸径、估测胸径和实测胸径、树高、冠幅平权综合后的加权 Voronoi 图, 系统分析不同权重因子对混交度、大小比数和角尺度等关键空间结构参数的影响。结果显示, 估测胸径与实测胸径具有较高的相关性 ($R^2=0.9772$)。全林分估测胸径的均方根误差为 1.427 5 cm, 相对均方根误差为 8.224 1%, 偏差为 0.503 8 cm, 相对偏差为 2.902 4%, 全林分估测胸径表现为被低估的状态。结果还显示, 不同权重因子的林分空间结构单元具有相似性, 部分关键空间结构参数之间虽然存在显著差异, 但并不影响林分空间结构在表达上的一致性, 均能反映出研究区林分整体上处于中等竞争状态和中度混交程度, 以及随机分布格局。

关键词: 近景摄影测量; 混交林; 三维点云重建; 加权 Voronoi 图; 空间结构

中图分类号: S758.5⁺3; S771.8

文献标志码: A

文章编号: 2096-0018(2025)06-0629-12



开放科学标识码
(OSID 码)

Spatial structure analysis of mixed forests based on close-range photogrammetry

WANG Yi, HU Wenjie, SUN Yongkang, YUAN Chuanwu, WU Wenfeng

(Hubei Academy of Forestry, Wuhan, Hubei 430075, China)

Abstract: This study aimed to explore the feasibility of applying close-range photogrammetry in the quantitative analysis of spatial structure of mixed forests. A smartphone imagery-based method was developed to analyze the spatial structure of a coniferous-broadleaved mixed plantation in Jiufeng Experimental Forest Farm. A multi-path and multi-angle image acquisition strategy was employed to construct a three-dimensional (3D) point cloud model of the stand below the canopy. The optimal circle algorithm was utilized to identify and estimate the positions and diameter at breast height (DBH) of individual trees. The measured data of DBH, tree height, and crown width, along with DBH estimates derived from the 3D model, were used as weighting factors, and weighted Voronoi diagrams were constructed based on measured DBH, estimated DBH, and an equally weighted combination of measured DBH, tree height, and crown width. The effects of different weighting factors on key spatial structure parameters—mingling degree (M), neighborhood comparison (U), and uniform angle index (W)—were systematically analyzed. The results showed a strong correlation ($R^2=0.9772$) between estimated DBH and measured DBH. For the estimated DBH of entire stand, the root mean square error (RMSE) of 1.427 5 cm, the relative RMSE of 8.224 1%, the deviation of 0.503 8 cm, and the relative deviation of 2.902 4%, which indicate the estimated DBH of the entire stand was underestimated. In addition, the results revealed similarities in the stand spatial structure units derived from different weighting factors. Although significant differences existed among some key spatial structure parameters, these did not affect the overall consistency in characterizing the stand's spatial structure. All the approaches consistently indicated that the stand exhibited moderate competition intensity, a moderate mixing degree, and a random distribution pattern.

Key words: close-range photogrammetry; mixed forest; 3D point cloud reconstruction; weighted Voronoi diagram; spatial structure

通过森林空间结构可以揭示林木之间的竞争关系及其空间生态位, 它在很大程度上决定了林分的稳定性、发展的可能性和经营的空间大小^[1]。惠刚盈等^[2]提出了参照树与其 4 株最近相邻木为最佳林分空间结构单元, 并以林分空间结构单元为基础, 构建了包含角尺度、混交度、大小比数等表现相邻木空

收稿日期: 2025-04-21 修回日期: 2025-07-25

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“低质低效人工林群落结构优化与固碳增产技术”(2023YFF1304402); 中央财政林业科技推广示范资金项目“鄂西山区典型针叶人工林质量提升关键技术推广示范”(鄂[2024]TG 21号); 湖北省林业科学研究院创新基金项目“基于无人机航拍影像的森林资源调查与监测研究”(2021YJJ03)。

第一作者简介: 王怡(1984-), 男, 助理研究员, 硕士, 从事森林培育学研究。Email: wangforestry@qq.com。

通信作者: 胡文杰(1989-), 男, 副研究员, 硕士, 从事森林经理学研究。Email: wenjiehu1725@163.com。

间关系的林分空间结构参数体系,实现了对林分空间结构的量化表达^[3]。汤孟平等^[4]基于地理信息系统软件的空间分析功能,利用 Voronoi 图使得空间结构单元大小的确定更加灵活,克服了最近邻木株数过多或过少导致混交度有偏估计的不足。但常规 Voronoi 图将所有林木同等看待,仅根据林木的空间离散位置关系划定空间结构单元,而忽视了单木间的生长差异对其竞争范围的影响。有研究将胸径、树高、冠幅等林分参数作为权重因子生成加权 Voronoi 图,据此确定的林分结构单元和算出的结构参数可以反映出更加真实的林分空间结构特征^[5]。

在传统的样地调查中,单木定位和每木检尺是两个相对独立的作业过程,且需要耗费大量的人力和时间成本,加之人工测量具有随机性,容易产生多种测量误差^[6-7]。近年来,将近景摄影测量(close-range photogrammetry, CRP)技术应用于森林资源调查逐渐成为热点。近景摄影测量技术基于运动恢复结构(structure-from-motion, SfM)算法通过高重叠率的影像数据构建目标林分的三维点云模型,再从点云模型中获取林分结构参数^[8]。近景摄影测量技术相较于激光雷达扫描技术在设备操作便捷性和使用成本上更具有优势,并且也能获取到满足森林资源调查精度要求的单木参数^[9-10]。LIANG *et al.*^[11]使用消费级数码相机采用一步一拍的方法围绕样地得到了一个闭环影像数据,据此数据构建的三维点云模型在单木胸径测量和相对位置标定上可获得与激光雷达扫描相似的结果,并认为单木距离拍摄路径越近,其被识别和准确建模的可能性就越大。顾雯钧等^[12]使用智能手机围绕样地拍摄一段视频,利用从视频中提取的关键帧图像构建了立木的三维点云模型,并从中提取了具有较高精度的树高和胸径数据。HUNČAGA *et al.*^[13]利用近景摄影测量技术在干曲线估测上进行了应用。近年来,将近景摄影测量技术运用于林业调查方面的研究主要集中在提高单木参数的测量精度上,而在林分空间结构量化分析方面的研究较少。因此,本研究以九峰实验林场的松阔混交人工林为研究对象,应用近景摄影测量技术对样地冠层以下的林分结构进行三维重建,利用样地三维模型获取的单木估测数据和样地调查获取的单木实测数据分别进行林分空间结构量化分析,并对分析结果进行比较,以期将近景摄影测量技术在林分空间结构分析上的运用提供理论基础。

1 研究区概况

研究区位于湖北省林业科学研究院九峰实验林场,地处武汉市东郊,地理中心位置为东经 114°29'50",北纬 30°31'04",处于亚热带季风性湿润气候区,林场占地面积约 330 hm²,境内山峦蜿蜒,山间盆地地势平坦,属湖北省内典型的丘陵地势地貌景观。研究区内大多数为人工林,主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、青冈(*Quercus glauca*)、枫香(*Liquidambar formosana*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*)等。

2 研究方法

2.1 数据获取

2.1.1 样地调查 选取松阔混交人工林作为研究对象,设置 1 块 30 m×30 m 的样地,郁闭度为 0.85,坡度约为 15°。

2022 年 10 月,对样地内胸径≥5 cm 的活立木进行每木检尺,调查每木的胸径、树高和冠幅数据(表 1)。运用 GPS-RTK 在同一方向上记录每木基部的坐标和树种信息,同时对样地内的枯立木和胸径<5 cm 的幼树进行定位,目的是便于后期在样地三维模型中对目标树进行辨别和筛选。

表 1 样地每木检尺数据

Table 1 Measurement data per tree of sample plot

树种 Species	株数 Number	胸径 DBH/cm				树高 Tree height/m				冠幅 Crown width/m			
		最大值 Max.	最小值 Min.	标准差 SD	平均值 Mean	最大值 Max.	最小值 Min.	标准差 SD	平均值 Mean	最大值 Max.	最小值 Min.	标准差 SD	平均值 Mean
苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	81	28.5	5.1	6.0	14.7	15.0	5.0	2.7	10.7	8.0	1.3	1.5	4.8
湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	29	39.0	21.1	4.6	28.1	17.0	14.0	1.0	15.3	8.0	3.5	0.9	6.4
青冈 <i>Quercus glauca</i>	10	11.1	5.5	1.8	7.5	9.0	6.5	0.9	7.6	5.5	3.3	0.8	4.2
全林分 Whole stand	120	39.0	5.1	8.4	17.4	17.0	5.0	3.3	11.5	8.0	1.3	1.5	5.1

DendroCloud 1.52(兹沃伦技术大学, 斯洛伐克), 采用垂直投影法创建光栅分辨率为 0.5 m 的样地数字地面模型(digital terrain model, DTM), 在三维模型 Z 值方向 1.28~1.32 m 的高度提取类圆点云水平横截面, 随后设置点之间的最大距离为 4 cm, 每组最少包含 100 个点, 对点云数据集进行分组, 即对每株单木进行识别(图 5)。运用最优圆算法对单木的类圆点云水平截面进行圆拟合^[15], 圆的直径即为单木的估测胸径(D_e), 圆心(O)的坐标即为单木所在样地的相对位置坐标(图 6)。

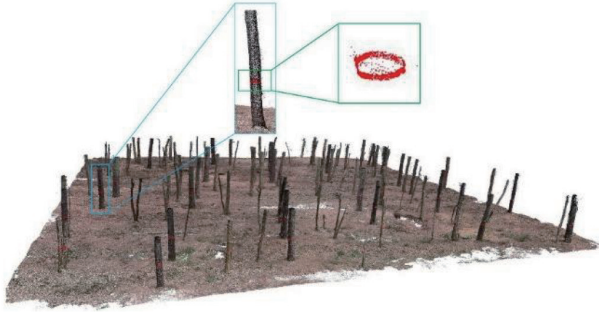


图 5 类圆点云横截面提取
Figure 5 Circular point cloud cross-section extraction

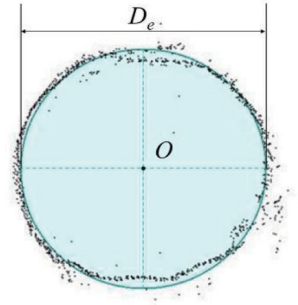


图 6 圆拟合效果
Figure 6 Circle fitting effect

2.4 胸径精度分析

将样地内单木的实测胸径(DBH)划分为 3 个径阶: 径阶 I ($5\text{ cm} < \text{DBH} \leq 15\text{ cm}$)、径阶 II ($15\text{ cm} < \text{DBH} \leq 25\text{ cm}$)和径阶 III ($\text{DBH} > 25\text{ cm}$), 以实测胸径为自变量, 估测胸径为因变量, 通过线性回归模型判断两者在全林分和各径阶上的相关性。利用均方根误差、相对均方根误差、偏差和相对偏差表示估测胸径的准确性^[16]。

2.5 加权 Voronoi 图生成

利用 ArcGIS 10.7 软件生成加权 Voronoi 图。加权 Voronoi 图的定义是设二维欧氏平面内点的集合为 P , $P = \{P_1, P_2, \dots, P_i, P_j, \dots, P_n\}$, $3 \leq n < +\infty$ ($i \neq j$, $i, j \in I_n = \{1, 2, \dots, n\}$), P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为平面内的 n 个点, λ_i 为 n 个正实数相对应的 P_i 点上的权重。

$$V_n(P_i, \lambda_i) = \bigcap_{j \neq i} \left\{ P \mid \frac{d(P, P_i)}{\lambda_i} < \frac{d(P, P_j)}{\lambda_j} \right\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $V_n(P_i, \lambda_i)$ 为某一加权 Voronoi 多边形中的所有点到该多边形中心点的距离与该点到相邻多边形中心点的距离之比小于两多边形中心点的权重之比; $d(P, P_i)$ 为平面内任意一点 P 到 P_i 的距离; $d(P, P_j)$ 为平面内任意一点 P 到 P_j 的距离。

基于实地测量的单木坐标信息生成实测样地加权 Voronoi 图, 当以实测胸径(D)作为权重因子时, 即 $\lambda_i = D$; 当以实测的胸径、树高(h)和冠幅(C_w)作为综合权重因子时, 则视它们对林木空间范围具有平等的权重影响, 即 $\lambda_i = (D+h+C_w)/3$ 。基于样地三维模型获取的单木位置信息生成的加权 Voronoi 图, 则将估测胸径(D_e)作为权重因子, 即 $\lambda_i = D_e$ 。

2.6 边缘矫正

采用距离缓冲区法进行边缘矫正处理^[17], 将样地 4 条边均向内水平延伸 2 m 的区域视为缓冲区, 把样地中除去缓冲区的部分作为矫正样地, 其大小为 $28\text{ m} \times 28\text{ m}$, 缓冲区内的林木只能作为邻近木, 以矫正样地内的林木作为中心木计算各空间结构参数。

2.7 空间结构参数

加权 Voronoi 图考虑到了林木之间的实际生长情况, 能够更真实地反映出林木的空间邻近信息^[18]。在加权 Voronoi 图中, Voronoi 多边形的边数即为邻近木株数(n), n 的取值根据实际林分环境不同而异^[19]。

2.7.1 混交度 混交度的定义为中心木的邻近木与中心木不属于同种个体所占的比例^[20]。公式为:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} M_i \quad (3)$$

式中: M_i 为第 i 株中心木的混交度, 可将 M_i 的取值划分为 5 个区间, 分别是 0.00 、 $(0.00, 0.25]$ 、 $(0.25, 0.50]$ 、 $(0.50, 0.75]$ 、 $(0.75, 1.00]$, 表示林分中树种间的空间隔离程度依次为 零度混交、弱度混交、中度混交、强度混交和极强度混交; v_{ij} 为离散性变量, 当中心木 i 与第 j 株邻近木属不同树种时, $v_{ij} = 1$, 否则 $v_{ij} = 0$; \bar{M} 为平均混交度; N_c 为矫正样地内的单木株数。

2.7.2 大小比数 大小比数的定义是大于中心木的邻近木占该中心木所有邻近木的比例^[21]。公式为:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (4)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} U_i \quad (5)$$

式中: U_i 为第 i 株中心木的大小比数, 可将 U_i 的取值划分为 5 个区间, 分别是 0.00 、 $(0.00, 0.25]$ 、 $(0.25, 0.50]$ 、 $(0.50, 0.75]$ 、 $(0.75, 1.00]$, 表示中心木相对于邻近木所处的生长状态依次为优势、亚优势、中庸、劣势、绝对劣势; k_{ij} 为离散性变量, 当第 j 株邻近木大于中心木 i 时, $k_{ij} = 1$, 否则 $k_{ij} = 0$; \bar{U} 为平均大小比数。

2.7.3 角尺度 角尺度被定义为邻近木的较小夹角 (α) 小于标准角 (α_0) 的个数占所考察的邻近木的比例^[22]。公式为:

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

$$\bar{W} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} W_i \quad (7)$$

式中: W_i 为第 i 株中心木的角尺度, 可将 W_i 的取值划分为 5 个区间, 分别是 0.00 、 $(0.00, 0.25]$ 、 $(0.25, 0.50]$ 、 $(0.50, 0.75]$ 、 $(0.75, 1.00]$, 表示林木的水平分布格局依次为绝对均匀、均匀、随机、不均匀、聚集; z_{ij} 为离散性变量, 当第 j 个 α 小于 α_0 时, $z_{ij} = 1$, 否则 $z_{ij} = 0$, α_0 随邻近木株数 (n) 的变化而变化, 取值为 $360^\circ / (n+1)$; \bar{W} 为平均角尺度。

3 结果与分析

3.1 样地模型单木识别

利用 DendroCloud 软件, 在样地 DTM 的 Z 值方向 1.28~1.32 m 处识别到 128 个类圆点云横截面, 即识别出 128 株单木的胸径截面, 其中包含 4 株枯立木和 4 株胸径 < 5 cm 的幼株, 除去这 8 株单木, 剩余 120 株单木胸径点云的相对位置均可以和样地调查的单木位置对应。

3.2 估测胸径精度检验

如图 7 所示, 由全林分的线性回归结果可见, 相关系数 $R^2 = 0.977 2$, 表明两者具有较高的相关性, 根据不同径阶的线性回归结果可见, 胸径越大, 相关性越高。从估测胸径和实测胸径的比较结果可知(表 2), 全林分估测胸径的均方根误差为 1.427 5 cm, 相对均方根误差为 8.224 1%, 表明三维模型达到了厘米级重建精度, 与以往类似研究的结果^[23-25]比较, 本研究的估测胸径具有较高的精度。全林分胸径的偏差为 0.503 8 cm, 相对偏差为 2.902 4%, 估测胸径相较于实测胸径呈现出被低估的状态, 而径阶 I 的偏差和相对偏差分别为 -0.020 8 cm 和 -0.170 5%, 表明低径阶单木的胸径估测结果偏高。

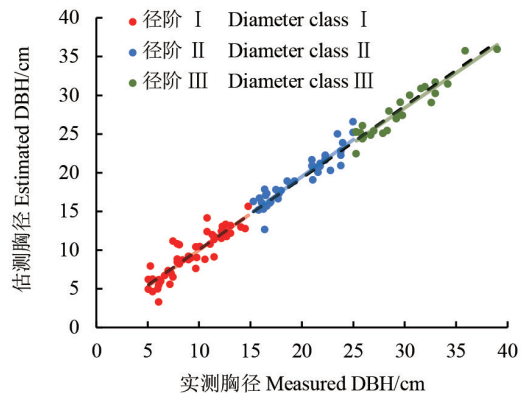


图 7 胸径线性回归分析

Figure 7 Linear regression analysis of DBH

表 2 各径阶估测胸径精度

Table 2 Estimated DBH accuracy of each diameter class

径阶 Diameter class	株数 Number of trees	相关系数 R^2	均方根误差 Root mean square error/cm	相对均方根误差 Relative root mean square error/%	偏差 Deviation/cm	相对偏差 Relative deviation/%
I	52	0.796 3	1.314 2	10.772 5	-0.020 8	-0.170 5
II	43	0.873 7	1.187 8	5.950 6	0.504 4	2.527 2
III	25	0.905 7	1.939 6	6.572 3	1.593 8	5.400 6
全林分 Whole stand	120	0.977 2	1.427 5	8.224 1	0.503 8	2.902 4

3.3 基于不同权重因子的加权 Voronoi 图

将 GPS-RTK 实测的单木坐标数据和三维模型估测的单木位置数据分别导入 ArcGIS 软件, 便可获得样地实测和模型估测的单木位置图层。利用加权泰森多边形插件, 根据实测单木位置图层, 将实测胸径 (measured DBH, MD) 作为权重因子, 生成实测胸径加权 Voronoi 图 [图 8(a)]; 将实测胸径、树高和冠幅作为实测综合 (measured synthetic, MS) 权重因子, 生成实测综合加权 Voronoi 图 [图 8(b)]; 根据估测单木位置图层, 将估测胸径 (estimated DBH, ED) 作为权重因子, 生成估测胸径加权 Voronoi 图 [图 8(c)]。基于样地实测单木位置进行边缘矫正处理, 矫正区内共有单木 93 株, 其中苦楮 64 株, 湿地松 22 株, 青冈 7 株; 根据三维模型估测单木位置进行边缘矫正处理, 矫正区内共有单木 91 株, 其中苦楮 62 株, 湿地松 22 株, 青冈 7 株。

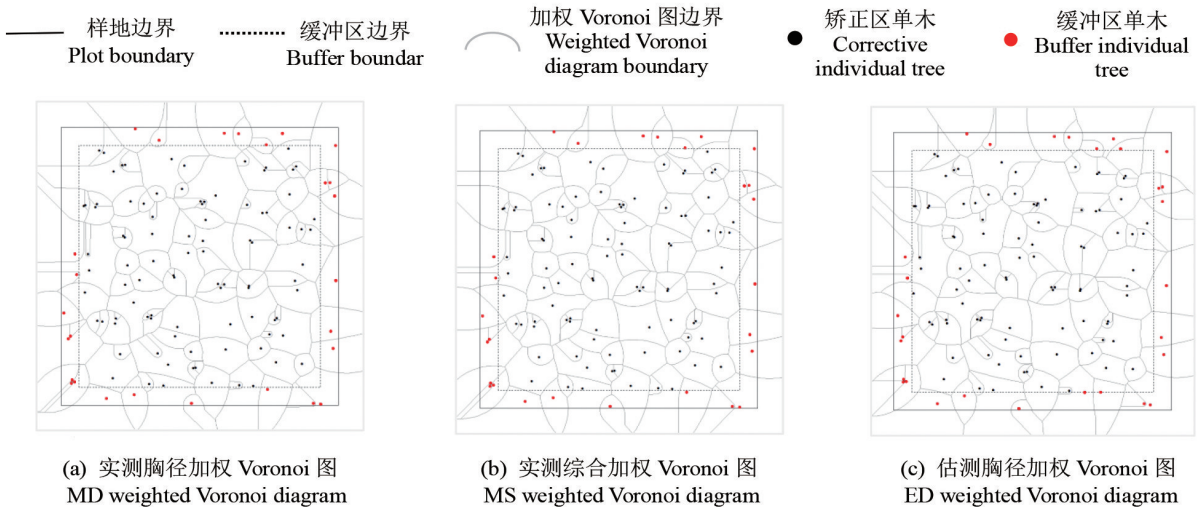


图 8 基于不同权重因子的加权 Voronoi 图

Figure 8 Weighted Voronoi diagrams based on different weighting factors

3.4 基于不同权重因子的林分空间结构量化分析

3.4.1 林分空间结构单元 如图 9 所示, 在基于不同权重因子所生成的加权 Voronoi 图中, 林分空间结构单元的邻近木株数最少的是 2 株, 对应的是权重较小的林木, 邻近木株数最多的是 15 株, 对应的则是权重最大的林木。如表 3 所示, 分别基于 3 种权重因子所确定的林分空间结构单元中的中心木对应的邻近木株数不存在差异。基于估测胸径的加权 Voronoi 图有 14 种邻近木株数取值, 1 株中心木与 3 株邻近木组成的空间结构单元最为常见, 平均邻近木株数为 5.6 株; 基于实测胸径加权 Voronoi 图有 12 种邻近木株数取值, 1 株中心木与 3 株邻近木组成的空间结构单元最常见, 平均邻近木株数为 5.7 株; 基于实测综合的加权 Voronoi 图有 11 种邻近木株数取值, 1 株中心木与 4 株邻近木组成的空间结构单元最常见, 平均邻近木株数为 5.7 株。3 种加权 Voronoi 图所确定的各结构单元中心木的邻近木株数主要集中在 3~7 株, 占比分别为 70.97%、74.19%、76.34%。由此可见, 3 种加权 Voronoi 图确定的林分空间结构单元具有相似性。

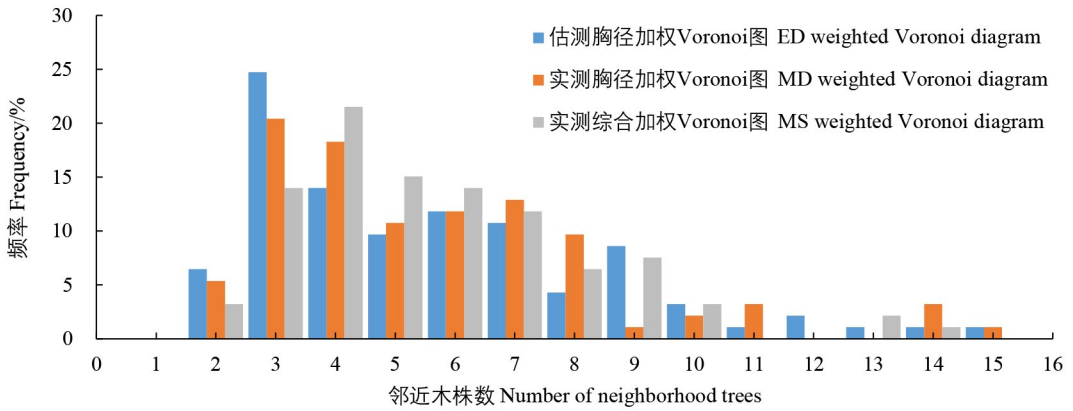


图 9 邻近木分布频率

Figure 9 Distribution frequency of neighborhood trees

表 3 3 种加权 Voronoi 图中邻近木株数方差分析

Table 3 ANOVA of the number of neighborhood trees in 3 weighted Voronoi diagrams

差异源 Difference source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean squared	F 值 F value	P 值 P value
组间 Inter-class	0.456	2	0.228	0.030	0.971
组内 Intra-class	2 100.302	274	7.665		
总计 Total	2 100.758	276			

3.4.2 林分空间隔离程度 由表 4 可知, 基于实测胸径和估测胸径加权的混交度没有显著差异 ($P>0.05$), 而基于实测综合加权的混交度则与基于实测胸径和估测胸径加权的混交度均表现出显著差异 ($P<0.05$)。

表 4 混交度配对样本检验

Table 4 Paired sample test of mingling degree

权重因子两两配对 Weighting factor pairing	配对差值 Pairing difference					t 值 t value	自由度 Degree of freedom	P 值 P value
	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	标准误差 Standard error of the mean	差值 95% 置信区间 Difference 95% confidence interval				
				下限 Lower limit	上限 Upper limit			
实测胸径-实测综合 MD-MS	0.028 13	0.113 11	0.011 73	0.004 84	0.051 43	2.399	92	0.018
实测胸径-估测胸径 MD-ED	-0.019 22	0.111 67	0.011 71	-0.042 48	0.004 04	-1.642	90	0.104
实测综合-估测胸径 MS-ED	-0.047 97	0.159 64	0.016 73	-0.081 22	-0.014 72	-2.867	90	0.005

如表 5 所示, 基于估测胸径、实测胸径和实测综合加权的全林分平均混交度分别为 0.54、0.52、0.49, 可见基于 3 种加权方法的研究区林分整体空间隔离程度接近中等水平, 均表明研究区内各树种分布比较均匀。从树种上看, 3 个树种的混交度分布趋势在 3 种加权方法中基本一致, 苦槠的混交度分布频率都以中度混交为主, 其次为强度混交或弱度混交, 零度混交和极强度混交则只有极少分布, 表明大多数苦槠的邻近木中都含有其他树种。湿地松的强度混交和极强度混交的分布频率之和在 3 种加权方法中都超过了 90%, 且都不存在零度混交的情况, 说明湿地松在林分中处于被其他树种包围的情况下, 同树种相邻的情况极少出现。青冈的混交度在 3 种加权方法下呈现出相同的分布频率, 以极强度混交为主, 占比为 57%, 然后依次是中度混交和强度混交, 占比分别为 29% 和 14%, 零度混交和弱度混交则都是 0%, 表明青冈在林分中以零星分布为主, 由于青冈作为伴生树种在数量上处于劣势, 所以对林分整体混交度的影响不大。

表 5 不同权重因子的林分混交度分布频率及均值

Table 5 Frequency distribution of and \bar{M} of different weighting factors

权重因子 Weighting factor	树种 Species	混交度分布频率 Distribution frequency of M_i					平均混交度 \bar{M}
		0	(0.00, 0.25]	(0.25, 0.50]	(0.50, 0.75]	(0.75, 1.00]	
估测胸径 ED	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.05	0.08	0.61	0.20	0.06	0.45
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.00	0.00	0.09	0.50	0.41	0.72
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.00	0.00	0.29	0.14	0.57	0.79
	全林分 Whole forest	0.03	0.05	0.47	0.27	0.18	0.54
实测胸径 MD	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.05	0.19	0.51	0.22	0.03	0.42
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.00	0.00	0.09	0.55	0.36	0.73
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.00	0.00	0.29	0.14	0.57	0.79
	全林分 Whole forest	0.03	0.13	0.40	0.29	0.15	0.52
实测综合 MS	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.08	0.25	0.48	0.16	0.03	0.38
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.00	0.05	0.05	0.40	0.50	0.74
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.00	0.00	0.29	0.14	0.57	0.79
	全林分 Whole stand	0.05	0.18	0.37	0.22	0.18	0.49

3.4.3 林木大小分化程度 由表 6 可知，基于实测胸径加权的大小比数分别与基于实测综合和估测胸径的大小比数之间没有显著差异 ($P>0.05$)，而基于实测综合与估测胸径加权的大小比数则表现出显著差异 ($P<0.05$)。

表 6 大小比数配对样本检验

Table 6 Paired sample test of neighborhood comparison

权重因子两两配对 Weighting factor pairing	配对差值 Pairing difference					t 值 t value	自由度 Degree of freedom	P 值 P value
	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	标准误差 Standard error of the mean	差值 95% 置信区间 Difference 95% confidence interval				
				下限 Lower limit	上限 Upper limit			
实测胸径-实测综合 MD-MS	0.012 09	0.092 60	0.009 60	-0.006 98	0.031 16	1.259	92	0.211
实测胸径-估测胸径 MD-ED	-0.016 44	0.110 51	0.011 58	-0.039 45	0.006 58	-1.419	90	0.159
实测综合-估测胸径 MS-ED	-0.028 79	0.103 36	0.010 84	-0.050 32	-0.007 26	-2.657	90	0.009

如表 7 所示，基于估测胸径、实测胸径和实测综合加权的全林分平均大小比数分别为 0.63、0.61、0.60。从全林分大小比数分布频率上看，从优势到绝对劣势呈上升的趋势，且均有分布，表明基于 3 种加权方法对研究区中林木大小分化程度的描述是一致的，即在林分结构单元中处于竞争劣势的中心木数量多于处于竞争优势的中心木，林木在大小分化程度上表现出较明显的差异，研究区林分整体上处于中等竞争状态。从树种上看，湿地松的大小比数分布频率从优势到绝对劣势都呈下降的趋势，处于亚优势状态的分布频率最高，且优势和亚优势状态的占比之和都超过 70%，而在绝对劣势状态均没有分布，可见湿地松在与其他树种的竞争中处于绝对优势的地位。苦槠的平均大小比数分别为 0.75、0.73 和 0.72，处于绝对劣势状态的大小比数分布频率也都显著高于其他状态，表明苦槠在大小分化程度上具有较明显的差异，作为数量上的优势树种，在种内和种间都存在一定的竞争压力。青冈的大小比数在优势和亚优势状态均没有分布，且大部分处于绝对劣势状态，意味着青冈在与其他树种的竞争中处于被压制的状态。

表 7 不同权重因子的林分大小比数分布频率及均值

Table 7 Frequency distribution of U_i and \bar{U} of different weight factors

权重因子 Weighting factor	树种 Species	大小比数分布频率 Distribution frequency of U_i					平均大小比数 \bar{U}
		0	(0.00, 0.25]	(0.25, 0.50]	(0.50, 0.75]	(0.75, 1.00]	
估测胸径 ED	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.02	0.03	0.16	0.28	0.51	0.75
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.32	0.40	0.23	0.05	0.00	0.18
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.00	0.00	0.14	0.14	0.72	0.87
	全林分 Whole forest	0.09	0.12	0.17	0.22	0.40	0.63
实测胸径 MD	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.00	0.05	0.17	0.34	0.44	0.73
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.32	0.40	0.23	0.05	0.00	0.17
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.00	0.00	0.14	0.00	0.86	0.90
	全林分 Whole forest	0.08	0.13	0.18	0.25	0.36	0.61
实测综合 MS	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.00	0.05	0.23	0.25	0.47	0.72
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.36	0.41	0.18	0.05	0.00	0.15
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.00	0.00	0.14	0.00	0.86	0.88
	全林分 Whole stand	0.09	0.13	0.22	0.18	0.38	0.60

3.4.4 林分空间分布格局 由表 8 可知, 基于不同权重因子之间的角尺度均表现为无显著性差异($P>0.05$)。

表 8 角尺度配对样本检验

Table 8 Paired sample test of uniform angle index

权重因子两两配对 Weighting factor pairing	配对差值 Pairing difference						自由度 Degree of freedom	P 值 P value
	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	标准误差 Standard error of the mean	差值 95% 置信区间 Difference 95% confidence interval		t 值 t value		
				下限 Lower limit	上限 Upper limit			
实测胸径-实测综合 MD-MS	-0.005 50	0.106 68	0.011 06	-0.027 47	0.016 47	-0.497	92	0.621
实测胸径-估测胸径 MD-ED	0.015 11	0.148 96	0.015 62	-0.015 91	0.046 14	0.968	90	0.336
实测综合-估测胸径 MS-ED	0.020 73	0.172 13	0.018 04	-0.015 12	0.056 58	1.149	90	0.254

如表 9 所示, 分别以估测胸径、实测胸径和实测综合作为权重因子获取的全林分平均角尺度分别为 0.36、0.38 和 0.38, 林分的分布格局均为随机分布。基于 3 种加权方法的全林分角尺度取值在 (0.25, 0.50] 的分布频率最高, 角尺度取值在 0 和 (0.00, 0.25] 的分布频率也都高于 (0.50, 0.75] 和 (0.75, 1.00], 由此可见, 样地林分的大部分结构单元均表现为随机分布, 均匀分布的结构单元多于不均匀分布。苦槠作为单株数量上占据优势的主要树种, 其空间分布格局与全林分相似。湿地松的角尺度分布主要集中在 (0.25, 0.50] 取值范围内, 其次是分布在 (0.50, 0.75] 取值范围内, 由此可见, 以湿地松为中心木的结构单元主要处于随机分布状态, 但依然存在部分不均匀分布的结构单元。青冈在 3 种加权方法中的平均角尺度分别为 0.24、0.18、0.30, 由于其胸径、树高和冠幅以及数量在全林分中处于被主要树种压制的状态, 所以以青冈为中心木的结构单元的稳定性更容易受到邻近木的影响, 且青冈对于全林分的空间分布格局难以产生影响。

表 9 不同权重因子的林分角尺度分布频率及均值

Table 9 Frequency distribution of W_i and \bar{W} of different weighting factors

权重因子 Weighting factor	树种 Species	角尺度分布频率 Distribution frequency of W_i					平均角尺度 \bar{W}
		0	(0.00, 0.25]	(0.25, 0.50]	(0.50, 0.75]	(0.75, 1.00]	
估测胸径 ED	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.17	0.13	0.56	0.14	0.00	0.34
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.00	0.00	0.73	0.27	0.00	0.46
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.43	0.14	0.29	0.14	0.00	0.24
	全林分 Whole forest	0.15	0.10	0.58	0.17	0.00	0.36
实测胸径 MD	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.13	0.19	0.53	0.13	0.02	0.36
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.00	0.05	0.63	0.32	0.00	0.48
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.43	0.14	0.43	0.00	0.00	0.18
	全林分 Whole forest	0.12	0.15	0.56	0.16	0.01	0.38

续表 9

权重因子 Weighting factor	树种 Species	角尺度分布频率 Distribution frequency of W_i					平均角尺度 \bar{W}
		0	(0.00, 0.25]	(0.25, 0.50]	(0.50, 0.75]	(0.75, 1.00]	
实测综合 MS	苦槠 <i>C. sclerophylla</i>	0.13	0.23	0.46	0.16	0.02	0.36
	湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.00	0.05	0.73	0.23	0.00	0.46
	青冈 <i>Q. glauca</i>	0.14	0.29	0.43	0.14	0.00	0.30
	全林分 Whole stand	0.10	0.19	0.53	0.17	0.01	0.38

4 讨论

4.1 影像数据采集策略和适用性

普遍认为,拍摄对象距离拍摄路径越近,则三维点云的精度越高^[26]。另外,照片的数量也与点云模型的质量密切相关,照片越多,则影像的重叠率就越高,进而提高了三维模型的重建精度。本研究的数据采集路径是先将 1 块大样地划分为 3 块小样地,围绕小样地形成了 3 个独立且又有交集的闭环,进而实现了大样地的影像数据形成一个完整闭环。不同于其他研究中每走一步只正对样地拍摄 1 张照片,本研究每走一步拍摄 3 张不同角度的照片,既可以提高每一步之间所拍摄照片的重叠率,也可以从更多的角度获取样地的点云信息。这样虽然在一定程度上增加了拍摄时的工作强度,但是采集冗余的影像数据也可视为一种为提高模型重建精度而采取的妥协策略。

在本研究的实际调查过程中,近景摄影测量技术在获取影像数据的过程中所消耗的时间与传统林业调查手段相比并没有表现出明显的优势,这主要与冗余的影像数据采集策略有关。有研究使用全景相机作为影像数据采集设备,这种设备以其能够捕获超广角图像的特征,可以用更少的照片完成三维模型的重建,但超广角影像边缘畸变产生的图像失真现象和全景相机分辨率不高的限制因素,都对基于全景相机影像的后期三维模型重建提出了更高的技术要求,且应对复杂场景的适用性还有待进一步验证^[27]。另外,为了提高数据采集的效率和精度,有研究将带有激光雷达传感器的消费级智能设备用于森林调查^[28-29]。这种智能设备虽然可以应对比较简单和小规模的林业测量,但惯性测量单元和位置精度误差在一定程度上限制了该设备在林业调查中应用的可行性^[30-32]。由此可见,如何权衡影像数据采集策略和三维模型重建质量之间的关系,对提升近景摄影测量技术的适用性具有重要意义。

4.2 影响模型重建精度的因素

从 Voronoi 图的生成结果上来看,使用 GPS-RTK 和基于样地三维模型的每木定位存在一定的差异,造成这种差异的原因:一方面是 GPS-RTK 的定位点在树干根部的树皮,而近景摄影测量技术是基于胸径处点云截面的拟合圆心坐标进行单木定位,单木的胸径越大,位置差异越明显;另一方面,三维模型中的噪点也可能影响单木定位的准确性^[33]。

本研究使用最优圆算法对单木胸径处点云水平横截面进行圆拟合,最优圆算法采用最小二乘算法对近似圆的位置和直径进行优化,通过最小化数据点到拟合圆之间的距离的平方和来找最佳的圆心和半径^[15],而实测胸径是以胸径尺围绕树干最外围表皮获取的数据为准,所以,估测胸径表现出被低估的状态与圆拟合算法的系统特性有关^[34]。在本研究中,径阶Ⅲ的树种绝大多数是表皮蓬松的湿地松,径阶Ⅰ和Ⅱ则以表皮平整的苦槠和青冈为主。由此可见,径阶Ⅲ的偏差大于其他径阶的原因是湿地松因树种特性而产生的系统性误差最大。径阶Ⅰ的估测胸径呈现被高估的状态,且相对均方根误差最大,说明径阶Ⅰ出现了最大的估测误差极值,这与 KUKENBRINK *et al.*^[38]的研究结果一致,其原因主要是部分低径阶单木在影像的可识别度上不及高径阶单木,因未获取足够多的重叠影像数据而造成单木点云模型不完整或重建精度不高,所以在对低径阶单木模型的胸径横截面进行圆拟合时容易出现估测值偏倚过大的情况^[11]。

4.3 不同权重因子对林木空间结构表达的影响

在加权 Voronoi 图确定的林木空间结构单元中,中心木的权重越大,表明其影响范围就越大,其邻近木株数也就越多^[35]。邻近木株数的确定对于林分空间结构的准确表达具有重要作用^[4]。本研究中,基于估测胸径确定的林分空间结构单元相较于实测胸径,表现出更多的邻近木株数取值范围和更少的平均邻近木株数,表明估测胸径加权 Voronoi 图中林分空间结构单元的平均影响范围小于实测胸径加权

Voronoi 图,这与估测胸径整体上小于实测胸径的结论是相符的。胸径的离散程度大于树高和冠幅,那么将胸径、树高和冠幅进行综合加权后,每株中心木的综合权重值则更接近均值。这意味着综合加权后每株中心木的影响范围和空间结构单元相较于胸径加权表现出更加均匀和简单的趋势,处于绝对优势和绝对劣势的单木株数有所减少。所以在实测综合加权 Voronoi 图中的最常见空间结构单元组成株数和拥有 3~7 株邻近木的中心木株数占比多于估测和实测胸径加权,进而造成了综合加权后的全林分大小分化程度有所收敛,平均大小比数更趋近于中庸的结果。实测综合加权的平均混交度最小的结果符合姜明华等^[36]关于混交度随空间结构单元的复杂化而增加的研究结论。基于不同权重因子获取的角尺度没有表现出显著性差异,这可能与林分的密度并没有随权重因子的不同而发生变化有关^[37]。基于不同权重因子得到的林分空间结构参数虽然不尽相同,但林分空间结构特征的表达并没有因权重因子的不同而不同。因此,根据 3 种加权 Voronoi 图各自所表达的林分空间结构特征,可采取相同的林分空间优化和调整措施。

5 结论

本研究基于近景摄影测量技术,使用智能手机采用多路径、多角度的影像数据采集策略构建了具有厘米级精度的三维点云模型,将模型中获取的估测胸径应用于林分空间结构分析具有可行性。研究结果表明,全林分估测胸径与实测胸径具有较高的拟合精度($R^2=0.977\ 2$),但相关系数也会随径阶的减小呈现出下降的趋势,依次为 0.905 7、0.873 7、0.796 3。全林分胸径的估测值相较于实测值偏低,但在低径阶却表现出相反的状态,这一方面和圆拟合算法因树种特性而产生的系统性误差有关,另一方面则与单木胸径大小差异或距离数据采集路径远近不同而对模型重建精度的影响有关。此外,基于不同权重因子获取的林分空间结构参数在混交度和大小比数上存在显著差异,这种差异主要存在于实测综合权重和实测胸径及估测胸径权重之间。综上所述,单木胸径的估测精度会受到数据采集策略、采集设备参数、树种等多重因素影响;在林分空间结构分析方面,尽管不同的权重因子会导致空间结构参数表现出不同程度的差异,但在林分空间结构特征总体判断上依然表现出一致性,均能反映出研究区林分整体上处于中等的竞争状态和混交程度以及随机的分布格局,需要对分布不均匀的马尾松以及不具备培养价值的苦槠和青冈进行择伐,以达到降低林木间的竞争强度,优化林木分布格局的目的,同时适当补植其他乡土阔叶树种,提高林分混交度,促进林分结构的稳定性。未来,有待于对影像数据采集策略进行优化以提升采集效率,同时还需要在其他类型的林分中继续开展研究,为近景摄影测量技术在森林结构分析及质量评价研究中应用提供理论基础。

参考文献

- [1] 惠刚盈,克劳斯·冯佳多.森林空间结构量化分析方法[M].北京:中国科学技术出版社,2003:5.
- [2] 惠刚盈.基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究[J].北京林业大学学报,2013,35(4):1-8.
- [3] 惠刚盈,胡艳波,徐海.森林空间结构的量化分析方法[J].东北林业大学学报,2005,33(S1):45-48,60.
- [4] 汤孟平,周国模,陈永刚,等.基于 Voronoi 图的天目山常绿阔叶林混交度[J].林业科学,2009,45(6):1-5.
- [5] 黄维,薛卫鹏,陈周娟,等.油松飞播林分空间结构特征分析与评价[J].森林与环境学报,2022,42(4):425-433.
- [6] 张民侠,赵浩彦,张洁,等.基于全站仪的涉案林地面积测量研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(11):47-53.
- [7] RITTER T, NOTHDURFT A. Automatic assessment of crown projection area on single trees and stand-level, based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning[J]. Forests, 2018, 9(5): 237.
- [8] LIANG X L, KUKKO A, BALENOVIĆ I, et al. Close-range remote sensing of forests: the state of the art, challenges, and opportunities for systems and data acquisitions[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2022, 10(3): 32-71.
- [9] 王小玲,宋坤,王子斐,等.基于 SfM 的城市树木参数提取研究[J].西南林业大学学报,2021,41(6):139-148.
- [10] 孙英伟.基于近景摄影测量的单木结构参数提取研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [11] LIANG X L, JAAKKOLA A, WANG Y S, et al. The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots[J]. Remote Sensing, 2014, 6(7): 6 587-6 603.
- [12] 顾雯钧,徐爱俊,尹建新.基于运动恢复结构的多株立木因子测量方法[J].浙江农林大学学报,2022,39(4):792-799.
- [13] HUNČAGA M, CHUDÁ J, TOMAŠTÍK J, et al. The comparison of stem curve accuracy determined from point clouds

- acquired by different terrestrial remote sensing methods[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2 739.
- [14] KOREŇ M, HUNČAGA M, CHUDÁ J, *et al.* The influence of cross-section thickness on diameter at breast height estimation from point cloud[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(9): 495.
- [15] KOREŇ M, MOKROŠ M, BUCHA T. Accuracy of tree diameter estimation from terrestrial laser scanning by circle-fitting methods[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 63: 122–128.
- [16] ZHANG Q J, CAI S S, LIANG X L. Individual tree segmentation in occluded complex forest stands through ellipsoid directional searching and point compensation[J]. *Forest Ecosystems*, 2024, 11: 100 238.
- [17] 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.
- [18] 郝月兰. 基于林分空间结构优化的采伐木确定方法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [19] 李际平, 封尧, 赵春燕, 等. 基于 Voronoi 图的杉木生态公益林空间结构量化分析[J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(4): 1–7.
- [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[J]. *林业科学研究*, 2001, 14(1): 23–27.
- [21] 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): 1–6.
- [22] 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): 37–42.
- [23] LIANG X L, WANG Y S, JAAKKOLA A, *et al.* Forest data collection using terrestrial image-based point clouds from a handheld camera compared to terrestrial and personal laser scanning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9): 5 117–5 132.
- [24] MOKROŠ M, LIANG X L, SUROVÝ P, *et al.* Evaluation of close-range photogrammetry image collection methods for estimating tree diameters[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(3): 93.
- [25] PIERMATTEI L, KAREL W, WANG D, *et al.* Terrestrial structure from motion photogrammetry for deriving forest inventory data[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 950.
- [26] KUŽELKA K, SUROVÝ P. Mathematically optimized trajectory for terrestrial close-range photogrammetric 3D reconstruction of forest stands[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 259–281.
- [27] ZEYBEK M. Semiautomatic diameter-at-breast-height extraction from structure-from-motion-based point clouds using a low-cost fisheye lens[J]. *Forests*, 2025, 16(3): 439.
- [28] NOAH H A, DE STEFANO A. Measuring tree diameter using LiDAR equipped iPad: an evaluation of forest scanner and arboreal forest applications[J]. *Forest Science*, 2024, 70(4): 304–310.
- [29] GOLLOB C, RITTER T, KRASSNITZER R, *et al.* Measurement of forest inventory parameters with apple iPad pro and integrated LiDAR technology[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3 129.
- [30] GUENTHER M, HEENKENDA M K, MORRIS D, *et al.* Tree diameter at breast height (DBH) estimation using an iPad pro LiDAR scanner: a case study in boreal forests, Ontario, Canada[J]. *Forests*, 2024, 15(1): 214.
- [31] WANG X, SINGH A, PERVYSHEVA Y, *et al.* Evaluation of iPad pro 2020 LiDAR for estimating tree diameters in urban forest[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021, 8(4): 105–110.
- [32] OIKAWA N, NAKAGAWA Y, OWARI T, *et al.* Utilising LiDAR-equipped iPhone in forestry: constructing 3D models and measuring tree sizes in a planting site[J]. *Ecological Solutions and Evidence*, 2025, 6(1): e12 399.
- [33] MARZULLI M I, RAUMONEN P, GRECO R, *et al.* Estimating tree stem diameters and volume from smartphone photogrammetric point clouds[J]. *Forestry*, 2020, 93(3): 411–429.
- [34] KUŽELKA K, SUROVÝ P. Mapping forest structure using UAS inside flight capabilities[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2 245.
- [35] 张彩彩. Voronoi 图的改进及其在林分空间结构优化中的应用[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [36] 娄明华, 汤孟平, 仇建习, 等. 基于相邻木排列关系的混交度研究[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7 774–7 780.
- [37] 陶观护, 卜元坤, 薛卫鹏, 等. 不同密度油松飞播林灌草多样性与林分空间结构关系[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 171–177.
- [38] KÜKENBRINK D, MARTY M, BÖSCH R, *et al.* Benchmarking laser scanning and terrestrial photogrammetry to extract forest inventory parameters in a complex temperate forest[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 113: 102 999.