0254-6124/2023/43(6)-1160-16 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HU Ronghai, XING Yuzhen. Retrieval methods for Tree Leaf Area Parameters Based on Terrestrial Laser Scanning (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1160–1175. DOI:10.11728/cjss2023.06.2023–0078

地基激光雷达反演树木叶面积参数方法*

胡容海 邢煜振

(中国科学院大学资源与环境学院 北京 100049)

(北京燕山地球关键带国家野外科学观测研究站 北京 101408)

摘 要 叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）是表征植被冠层结构的核心参数，叶面积指数的间接测量一直是植被遥感的一项重要研究内容。地基激光雷达（Terrestrial Laser Scanning, TLS）以其高效、精细的三维观测能力被广泛用于叶面积指数的反演研究，同时地基激光雷达也为反演更精细的叶面积参数，例如叶面积体密度（Foliage Area Volume Density, FAVD）的三维分布提供了可能性。从方法论角度出发，对基于地基激光雷达反演叶面积参数的主要方法，不同方法的优势、局限性和影响因素进行分析。现有反演方法可分为四类：基于间隙率的方法、基于接触频率的方法、基于计算机图形学理论的方法以及基于生态生理学模型的方法。基于地基激光雷达的叶面积参数反演也从样方尺度叶面积指数向更精细的单木尺度叶面积垂直剖面（Vertical Foliage Profile, VFP）和体素尺度叶面积体密度发展。在此过程中，聚集效应、非均一路径长度和遮挡效应是影响测量精度的重要因素，需要进一步的研究和校正。

关键词 叶面积参数，地基激光雷达，间隙率，接触频率，体素

中图分类号 TP79

Retrieval methods for Tree Leaf Area Parameters Based on Terrestrial Laser Scanning

HU Ronghai XING Yuzhen

(*College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

(*Beijing Yanshan Earth Critical Zone National Research Station, Beijing* 101408)

Abstract Leaf Area Index (LAI) is a key parameter that characterizes the structure of vegetation canopies, and the indirect measurement of LAI has always been an important research topic in vegetation remote sensing. Terrestrial Laser Scanning (TLS), with its efficient and precise three-dimensional observation capability, has been widely used for LAI estimation. At the same time, TLS provides possibilities for the inversion of more refined leaf area parameters, such as the three-dimensional distribution

* 国家自然科学基金项目（42271393），中国科学院青年创新促进会和中央高校基本科研业务费专项资金项目共同资助

2023-06-20 收到原稿，2023-08-11 收到修定稿

E-mail：huronghai@ucas.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

of Foliage Area Volume Density (FAVD). This paper reviews the main methods for retrieving leaf area parameters based on TLS from a methodological perspective, discussing their advantages, limitations, and influencing factors. The indirect measurement of leaf area parameters based on TLS can be classified into four categories: the gap fraction-based method, the contact frequency-based method, the computer graphics theory-based method, and the ecophysiological model-based method. These methods differ in theoretical foundations, data organization, *etc.*, and are suitable for the retrieval of various leaf area parameters at different scales. Among them, the mainstream approach currently relies on the measurement and analysis of gap fraction, and it has evolved into three categories based on different forms of point cloud organization: 2D images, pulses, and voxels. Methods based on contact frequency, computer graphics theory, and ecophysiological models are also emerging, providing new avenues for leaf area parameter inversion and can be further optimized to improve the accuracy and efficiency of LAI estimation. Existing methods have basically covered the inversion of various leaf area parameters at different scales. From stand-scale LAI to more refined individual-tree-scale Vertical Foliage Profile (VFP) and voxel-scale FAVD, leaf area parameter inversion based on TLS continues to advance in a refined and three-dimensional direction. In this process, clumping effects, non-uniform path lengths, and occlusion effects are important factors that affect measurement accuracy and require further research and calibration.

Key words Leaf area parameter, Terrestrial laser scanning, Gap frequency, Contact frequency, Voxel

0 引言

叶面积参数是生态系统功能研究的关键要素，是调节地气系统关键过程、估算陆地碳、水和能量通量的重要变量[1–3]。叶面积参数通常以二维叶面积指数或三维叶面积体积密度表示[4]。叶面积指数定义为单位水平地表面积上所有叶片表面积的一半，是表征植被冠层结构的核心参数[2]。叶面积体积密度定义为叶面积的体积密度函数，适用于表征叶面积的空间分布[4]。从单木到整个地表覆盖的多尺度叶面积参数反演一直是定量遥感研究的热点内容[5–8]。

激光雷达因其独特的三维观测能力，已被广泛地应用于量化垂直和水平冠层结构测量，包括冠层高度、冠层覆盖和生物量等诸多方面[9,10]。随着激光雷达技术的普及以及商业化发展，地基激光雷达以其小型便捷、精确高效、可操作性强等特点，逐渐成为开展森林资源调查的有力工具，为表征三维冠层结构，量化森林参数指标带来机遇[11]。目前，以飞行时间离散回波扫描仪、连续波相移扫描仪、飞行时间波形扫描仪为主的三类地基激光雷达已被用于叶面积参数的间接反演研究[12]。高密度离散点云和全波形数据为异质植被冠层结构建模提供了全面且准确的高质量数据源。在点、脉冲、2D 图像、体素等多种数据组织下，国内外研究学者已围绕 Beer 定律、接触频率、计算机图形学、生态生理学等理论提出了一系列适用于不同尺度下的叶面积参数反演方法[13–19]。从林分到单木，再到体素；从二维叶面积指数到叶面积垂直剖面，再到叶面积体密度的三维空间分布，基于地基激光雷达的叶面积参数反演向着精细化、立体化方向不断推进。在此过程中，以脉冲追踪为代表的新技术的引入为叶面积参数反演带来新的活力，而聚集效应、非均一路径长度、遮挡效应等因素对反演准确性的影响也被逐渐认清，基于地基激光雷达的叶面积参数反演面临着新的机遇和挑战。

已有文献针对叶面积参数间接反演[2,20] 和激光雷达反演叶面积指数[21] 中的理论、技术、问题等角度展开了详细综述。本文主要从方法论的角度，对基于地基激光雷达的叶面积参数反演方法和不同方法之间的优势、局限性和影响因素进行详细论述。

1 地基激光雷达分类

激光雷达工作原理涉及多学科交叉，并不断发展形成新的种类。按照测距原理，激光扫描仪主要分为

飞行时间式和相位式两类[22]。飞行时间扫描仪通过测量激光脉冲发射和返回接收之间的时间差来确定扫描仪到目标物的距离。相位式扫描仪采用幅度调制的连续波激光并根据调制光往返产生的相位差间接测量飞行时间,其相较于直接测量激光脉冲往返时间的方式,难度降低许多。根据记录辐射回波信号方式的不同,激光雷达又可分为离散回波式和全波形式两类[22]。离散回波扫描仪基于设定的回波能量阈值,记录沿脉冲路径上一次或多次回波信号,并以离散点云的形式存储。全波形扫描仪通过数字化记录仪对整个回波进行采样,获取发射脉冲与目标相互作用后沿时间轴的振幅变化信息,以形成完整的波形剖面。具体而言,现有叶面积参数反演文献中通常涉及三种类型的地基激光雷达技术[12,23]:飞行时间离散回波扫描仪[13,14,16,24–31]、连续波相移扫描仪[14,23,32–34]、飞行时间波形扫描仪[4,35–38]。

飞行时间离散回波扫描仪在冠层结构参数反演方面得到广泛应用,该类仪器通常可以提供较大观测范围内高密度离散点云,且数据组织、处理相对容易。现有研究多使用单次回波数据反演叶面积参数,这在理解和计算冠层间隙率等信息时更加直观[23],同时也减少了一些不必要的细节,有效缓解了数据的存储和处理压力[39]。为了更全面地理解和计算冠层间隙率等信息,一些研究也提出了从多回波数据中反演间隙率的方法[25,40]。多回波数据有助于消减遮挡效应等问题,能够提供更准确和详细的冠层结构信息,适用于复杂森林场景。

连续波相移扫描仪的主要优点是采样频率高、测距相对误差小,同时在仪器重量和价格方面存在优势,具有在较大范围森林场景中获取高密度点云的潜力[33]。受激光发射能量的限制,该类扫描仪的有效测距范围相对飞行时间式扫描仪较小。此外,连续波相移扫描仪在测量冠层间隙时需要考虑两个问题:第一个问题是边缘效应,即因实际脉冲并非无限细,在命中物体边缘时光束只被部分截获,而剩余的光束会继续传播并命中其他物体或穿过冠层。边缘效应同样存在于飞行时间扫描仪,但在连续波相移扫描仪中,部分命中还会导致由于测距平均而引起的伪影(鬼点),即一个点被分配在两个部分命中的物体之间的某个位置[12,32,33]。第二个问题是连续波相移扫描仪无法明确记录间隙脉冲,从而导致在间隙中出现随机分布的噪声点[32]。因此,连续波相移扫描仪在反演间隙率和叶面积参数时需要依赖设备固件或滤波算法来消除由测距平均和间隙脉冲引起的伪影[33]。Newnham 等[12] 在地基激光雷达的对比研究中指出,如果未来能够突破连续波相移扫描仪的一些局限性,那么这类仪器可能在未来的植被结构评估中发挥重要作用。

飞行时间波形扫描仪能够更为完整地记录回波信息,适用于小范围内异质冠层等非随机分布的复杂介质的建模[12]。具体而言,相对于飞行时间离散回波扫描仪和连续波相移扫描仪,飞行时间波形扫描仪能在一定程度上削弱边缘效应的影响,更为准确地评估光束被截获比例,从而获取更为精细的间隙信息[36]。但是其波形数据的处理也相对复杂,目前在地基尺度,基于全波形数据的叶面积参数反演研究相对较少。随着硬件技术和数据处理方法的不断改进,全波形数据在冠层结构参数反演中的应用有望得到更广泛地发展。

2 叶面积参数概述

与传统的被动光学传感器相比,地基激光雷达提供的高密度点云可用于冠层三维结构的准确建模,这使得基于地基激光雷达的叶面积参数反演不再满足于样方尺度 2D 的叶面积指数信息。现有研究已覆盖样方、单木、体素多个尺度,并提供叶面积(Leaf Area, LA)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、叶面积体密度(Foliage Area Volume Density, FAVD)、叶面积垂直剖面(Vertical Foliage Profile, VFP)等多维度叶面积参数。其中叶面积直观反映叶片数量,适用于描述城市、稀树草原等情景下单木叶面积信息。叶面积指数作为经典叶面积参数,简洁高效地表征了林分尺度上叶面积的二维平面分布。叶面积体密度定义为叶面积的体积密度函数,在不同大小的体素空间划分下,可用于表征不同精细程度的叶面积三维空间分布信息。叶面积垂直剖面则以叶面积指数或者叶面积体密度表征冠层垂直方向上不同分层内叶面积差异。考虑木质组分的影响,学术界提出了总面积指数(Plant Area Index, PAI)、绿叶面积指数(Green Leaf Area Index, GLAI)和绿面积指数(Green Area Index, GAI)等不同于叶面积指数的定义[20]。但木质

组分的校正是和叶面积参数反演方法相对独立的过程。在基于地基激光雷达的叶面积参数反演中, 木质组分可在点云预处理阶段通过枝叶分离算法去除或者基于有叶、无叶两期数据的反演结果予以校正。而本文主要面向不同的叶面积参数反演方法, 因此对反演结果是否进行木质组分校正不做具体区分。在基于间隙率的方法中, 以 LAIe 表示有效叶面积指数, 以 LAIc 表示经聚集校正后的真实叶面积指数。表 1 列出了这些不同的叶面积参数含义。

3 基于地基激光雷达的叶面积参数反演方法

现有基于地基激光雷达的叶面积参数反演方法可分为四类: 基于间隙率的方法、基于接触频率的方法、基于计算机图形学理论的方法以及基于生态生理学模型的方法[2,41]。本章节从方法论角度出发, 对现有基于地基激光雷达的叶面积参数反演方法、不同方法的优势、局限性和影响因素进行详细论述。

3.1 基于间隙率的方法

3.1.1 算法

基于间隙率的方法因其完善的理论基础和可操作的测量方案, 是当前地基激光雷达反演叶面积参数的主流方法。该方法的理论基础是 Beer Lambert 定律, 也称为 Beer 定律。最初, Beer 定律被用于描述光在均匀介质中的衰减, 后被进一步扩展到描述均匀植被冠层的光衰减过程[42–44]。

依据 Beer 定律, 光线通过均匀介质的透过率 T 与介质的吸收系数 k、密度 ρ 以及光线穿过介质距离(即路径长度) l 的乘积之间存在自然对数关系, 即

$$T = \mathrm{e}^{-k\rho l}. \tag{1}$$

当被应用于描述连续均匀植被冠层透过率时, k 由叶片投影系数 G 替代, ρ 为叶面积体密度。在连续均匀冠层中, G 与 ρ 均被认为各处一致, ρ 可以根据叶面积指数 L 和冠层高度 h 计算, 路径长度 l 可以根据冠层高度 h 和观测天顶角 θ 计算, 有

$$\rho = \frac{L}{h}, \tag{2}$$

$$l = \frac{h}{\cos\theta}. \tag{3}$$

式(1)可推导为

$$T = \mathrm{e}^{-G\rho l} = \mathrm{e}^{-GL/\cos\theta}. \tag{4}$$

叶子比气体或液体介质中的分子大得多, 但这种差异并不影响 Beer 定律用于间接叶面积指数的测量, 因为式(4)也可以从接触频率理论和假设有限叶尺寸的二项式模型中推导出来[43,45,46]。在实际测量中, 透过率 T 通常用间隙率 P 来表示, 透过率是每条光线的理论透过概率, 而间隙率是透过率在观测数据上的实际体现。则叶面积指数与特定天顶角下冠层间隙率的经典关系建立如下:

$$P(\theta) = \mathrm{e}^{-G(\theta)\times L/\cos\theta}. \tag{5}$$

其中 $P(\theta)$ 为观测天顶角 θ 方向上的间隙概率。$G(\theta)$ 为叶片投影函数, 表征叶片在观测天顶角 θ 方向上的投影比例[47], 其受叶倾角分布影响, $1/\cos\theta$ 用于描述观测天顶角 θ 方向上穿透均匀冠层的路径长度因子。值得注意的是, 在这个推导过程中, 假设冠层均匀连续以及路径长度一致。

式(5)阐述的是某一天顶角下冠层间隙率公式, 在实际测量中, 往往测量多天顶角下的冠层间隙率数据, 叶面积指数可表达为天顶角方向上的积分[48], 即

$$L = 2\int_0^{\pi/2} -\ln\left[P(\theta)\right]\cos\theta\sin\theta \mathrm{d}\theta. \tag{6}$$

表 1 不同的叶面积参数缩写及含义

Table 1 Abbreviations and meanings of different leaf area parameters

叶面积参数	缩写	含义
叶面积(Leaf Area)	LA	所有叶片表面积的一半, 常用于表征单木
叶面积指数(Leaf Area Index)	LAI	单位水平地表面积上所有叶片表面积的一半
有效叶面积指数(Effective Leaf Area Index)	LAIe	由Beer定律直接估算, 未校正聚集效应的叶面积指数
真实叶面积指数(True Leaf Area Index)	LAIc	由Beer定律估算并校正聚集效应的叶面积指数
叶面积体密度(Foliage Area Volume Density)	FAVD	单位体积内单面叶面积总和, 其在高度上的积分为叶面积指数
叶面积垂直剖面(Vertical Foliage Profile)	VFP	以LAI或者FAVD表征冠层垂直方向上不同分层内叶面积差异

式中, $P(\theta)$为θ天顶角下所有方位角方向间隙率的平均值。离散天顶角下总的叶面积指数可表示为各天顶角计算结果的加权和, 即

$$L=\sum_{i=1}^{n} L(\theta_i)\, w_i. \tag{7}$$

式中, n为离散天顶角的数量; $L(\theta_i)$为根据式(5)计算得来的θ_i天顶角下的叶面积指数值; w_i为各天顶角权重, 是$\sin(\theta_i)\,\mathrm{d}\theta_i$的归一化处理。

Beer 定律适用于描述叶片随机分布的均匀冠层中的光衰减过程, 而叶片在空间中趋向于围绕着树冠、枝干聚集分布。由于聚集效应, 直接应用 Beer 定律会导致 LAI 低估[49]。这种直接应用 Beer 定律的反演结果被称为有效叶面积指数(LAIe)。因此, 基于 Beer 定律方法的难点主要在于如何纠正不同尺度的聚集效应以获得真实叶面积指数(LAIc)[2]。

过去几十年间, 以有限长度平均法(LX)[50]、间隙大小分布法(CC)[51]、间隙大小分布及有限长度平均联合法(CLX)[52]、偏析系数法[53]和路径长度分布法(PATH)[54]为代表的聚集效应修正算法被相继提出。LX 方法假设叶片在有限长度的子段内随机分布, 通过在有限长度的子样线上对冠层间隙率求对数平均以消除样线之间的聚集效应[50]。CC 方法通过对比实测的间隙累计分布函数和模拟的随机分布状态下的间隙累计分布函数以迭代去除冠间的大间隙, 从而实现聚集效应纠正[51]。CLX 方法将 CC 方法应用于每个 LX 子段以修正子段内的聚集效应[52]。偏析系数法是 Walter 等[53]基于偏析系数理论, 提出的一种评估叶片空间分布是否随机的方法。PATH 方法在 Beer 定律的基础上引入路径长度分布信息, 能够有效地修正树冠形状引起的聚集效应。聚集效应修正算法不断向精细尺度发展, 但目前的方法仍然难以考虑冠内叶面积密度的差异。

目前, 基于间隙率的方法在地基激光雷达反演叶面积参数中得到了最广泛的应用。按照不同的空间划分和点云组织方法, 现有基于地基激光雷达和间隙率的反演可分为基于 2D 图像、3D 基于脉冲和 3D 基于体素三大类。

3.1.2 数据使用

3.1.2.1 基于 2D 图像

2D 图像方法是早期基于地基激光雷达反演叶面积参数的常用方法。该类方法的核心思想是通过投影和栅格化操作将地基激光雷达作为被动光学成像(尤其是数字半球摄影)的替代和高分辨率数据源。2D 图像法的核心操作是投影变化。这通常涉及两个步骤, 一是将点云从笛卡儿积坐标系转换到球坐标系, 之后通过地图投影技术将点云从半球转换到平面。将物体从半球转换到平面的常用投影方法有四种: 极射投影、正交投影、兰勃特方位等积投影和立体等角投影[55]。二是投影之后根据一定的样本间距定义像素大小, 将 2D 点云转换为类似于半球摄影的栅格图像。在这种情况下, 地基激光雷达与半球摄影相比存在明显优势: 作为主动传感器, 地基激光雷达不依赖于光照环境, 能够高效地区分植被元素和天空背景。

Danson 等[56]将 3D 点云转换至具有固定半径 r 的半球上以测量林分冠层定向间隙分布, 发现该方法与基于数字半球影像的结果存在高度一致性。借鉴这一思路, Zheng 等[57]提出一种名为“圆形点云切片”的方法, 通过立体投影和正交投影两种方式将冠层点云投影至二维平面, 经过栅格化处理获得 2D 栅格图像, 并经 GLA(Gap Light Analyzer)软件[58]处理获得有效叶面积指数。Zheng 等[13]通过立体投影和兰勃特方位等积投影两种投影技术和像素化过程, 将每个地块的点云转换为类似数字半球摄影照片, 然后, 使用线性最小二乘反演算法分析基于地基激光雷达的半球照片以反演有效叶面积指数。该类方法计算量小、易于操作、能够有效地接续基于数字半球摄影反演叶面积参数的方法和技术。为了避免点云转换为 2D 栅格图像过程中距离信息的丢失, Arslan 等[59]提出一种以矢量格式组织投影到 2D 平面的点云, 并基于 Delaunay 三角剖分算法计算叶面积的新方法。面向 EVI(Echidna Validation Instrument)扫描仪提供的波形数据, Jupp 等[4]经简易圆柱投影, 采用波形均值、按范围加权的波形均值和按范围的平方加权的波形均值作为波段合成彩色影像, 进而基于合成影像计算间隙率并成功反演了有效叶面积指数和叶面积剖面。该方法也在随后得到了进一步的发展及应用[35,36,38]。此外, Grotti 等[33]提出一种仅基于相位式地基激光雷达强度信息生成 2D 图像的方法, 以区分间隙和非间隙像素并计算叶面积参数, 该方法可避免噪声滤波等复杂的数据处理过程。结果表明, 基于强度图像的反演效果优于数字半球影像, 因为强度图像

的像素分辨率更高且覆盖面积更广。如何在保持2D图像计算量小、易于操作等优势的情况下,挖掘点云中的三维信息是基于2D图像方法需要思考的问题。

3.1.2.2 3D基于脉冲

基于脉冲的方法通常使用单次扫描数据来反演叶面积参数[60],其核心思路是通过构建冠层包络将点云视为整体来计算叶面积参数或将点云数据按天顶角范围进行分层(通常也称作点云切片),视分层中点云为整体以计算间隙率、叶片投影系数等信息,后根据式(7)对不同分层的反演结果进行积分以计算总体叶面积参数[24–26,32,61]。基于脉冲的方法无需改变原有的点云组织形式,也避免了投影变换、体素设置等相关处理,且获取间隙率方式更加直观,便于反演垂直叶面积剖面。此类方法中间隙率信息通常是根据分层点云中穿透冠层的间隙脉冲数除以总脉冲数量计算得到。具体而言,有两种途径:一是基于包含未返回脉冲的有序点云数据直接计算间隙脉冲数量和总脉冲数量[14,34];二是根据无序点云中冠层截获的脉冲数量和基于扫描参数设置估算的总脉冲数量理论值进行计算[26,62]。Antonarakis 等[63] 通过将点云从笛卡儿坐标系转换到球坐标系下,统计不同天顶角分层内点云数量,并根据激光扫描仪在特定扫描参数下的发射脉冲数计算间隙率,后根据Beer定律计算有效叶面积指数。针对多回波地基激光雷达数据,Li 等[25] 开发了一种基于不同入射天顶角范围的点云切片方法,使用多次返回信息反演间隙分数,并采用间隙大小分布算法修正聚集效应以获取准确的真实叶面积指数。地基激光雷达精细三维观测能够有效地提供精细的间隙分布信息,因此传统基于间隙大小分布信息的聚集效应修正方法在地基激光雷达反演真实叶面积参数过程中发挥了重要作用。目前,已有多项基于地基激光雷达点云和间隙大小分布法校正聚集效应的研究,以获取真实叶面积指数[24–26]。此外,现有研究中大多通过不同分层下观测天顶角的余弦值对冠层内非均一路径长度进行校正,这适用于林分尺度叶面积指数的反演,但并不适用于单木反演。为此,Hu 等[14] 提出了适用于单木叶面积反演的路径长度分布模型,该模型通过构建树冠包络并采用冠层真实路径长度分布代替传统的适用于连续冠层的余弦路径长度校正方法,能够有效地修正冠层形状引起的聚集效应,实现准确的单木叶面积反演。在此模型基础上,Chen 等[64] 联合多站观测数据并考虑冠间间隙率,为地面测量区域叶面积指数提供了新方法。

在枝叶茂密的森林中,不同树木之间的遮挡会导致单次扫描点云中的一些特征缺失,而使用配准后的多次扫描数据被多数研究认为是消减遮挡效应并提高叶面积指数反演精度的有效方法[64]。由于Beer定律在推导时考虑了叶片之间的相互遮挡[2],其基于间隙率估算叶面积指数,本身不受限于遮挡效应。因此,基于2D图像或3D脉冲的方法在反演叶面积指数时均不受限于点云缺失,并可以高效获取树冠不同天顶角分层上的间隙率信息以反演垂直叶面积剖面。其遮挡效应主要凸显在追求体素尺度下叶面积参数时,因后方体素的信息缺失导致难以获取叶面积参数沿脉冲距离方向上的分布。由于间隙率为一定方向激光脉冲的穿透概率,其通常由单站获取,因此基于2D图像或3D脉冲的方法在获取间隙率时通常基于单站扫描数据。尽管无法直接使用多站融合点云,但已有研究通过同观测天顶角范围内多站间隙率取平均后再反演[61]、多站反演结果取平均[25] 或以脉冲数量等指标作为加权因子对多站观测结果进行加权平均[14] 的方法联用多站观测数据并取得了较好的效果。此外,也有研究表明基于单次扫描可以更高效地实现叶面积参数的反演[25],同时多次扫描会导致对场景的非加权过采样,从而掩盖了它在消减遮挡效应方面的优势[34]。因此,如何在避免非加权过采样等因素下联合多站扫描以提升基于脉冲方法的反演精度值得进一步研究。

3.1.2.3 3D基于体素

体素是类似于2D图像中像素的3D对应物,基于体素的方法通过划分规则的3D网格(体素)来组织并处理点云数据。基于体素的反演方法一般存在两种思路。一种是以文献[29]为代表,其核心思想是在小尺寸体素下视每一层中没有点的体素数量占本层总体素数量的比例为该层的间隙率,然后基于Beer定律反演该层的叶面积指数,并将所有层的叶面积指数累加得到最终的叶面积指数。这一思路的优势是可操作性强,便于联合多站观测数据以获取叶面积垂直剖面信息。另一种思路依赖于脉冲追踪技术,通过统计进入体素和在体素中被截获的脉冲数量以计算间隙率,从而计算体素尺度的叶面积体密度[15,27,40]。该思路的核心优势是在适当的体素大小下可认为体

素内叶片随机分布以避免聚集效应，并获取体素级别的叶面积体密度三维分布。

体素形状通常设置为立方体或长方体，以便使用一个通用框架来考虑不同位置的扫描数据[65]。但是激光脉冲在穿过此类体素时路径长度并不相同，使用简单平均路径长度会对反演结果造成影响。为此，Béland 等[65] 联合 Jensen 不等式和 Beer 定律构建了一个基于计算几何的参数模型以计算体素尺度的叶面积体密度，该模型考虑了激光束穿过体素的路径长度随仪器和体素的相对位置和方向而变化的事实，能够解决激光脉冲穿过体素路径长度不等引起的非线性 Beer 定律的影响，且相较于脉冲追踪算法具有更高的反演效率。此外，有少数研究建议使用球形体素来解决这一问题[40,66]，球形体素是指在球坐标系下以扫描仪为中心沿脉冲距离向的两个同心球面之间的曲面体(见图 1)。在单站扫描中，激光脉冲穿过球形体素的路径长度是一致的，可有效解决非均一路径长度的影响，但该方法无法在多站联合观测中使用。

基于体素的方法目前仍面临几个难题：一是体素大小的选择，许多研究表明体素大小的选择直接影响叶面积指数的反演结果[15,28,40,67–69]。虽然现有研究对最适体素大小未达成一致，但在体素大小的选择理念上存在一定共识：在足够大以满足体素内叶片随机分布假设、足够小以排除树冠和树枝之间的大间隙、和适度大小以缓解遮挡效应之间寻求平衡[15,70]；二是遮挡效应，遮挡效应是指由于扫描仪和目标的体素之间的植被完全或部分截获激光脉冲导致的对目标体素的反演结果失真。针对遮挡效应有两方面的问题需要考虑[71]。首先，如何评估遮挡对目标影响程度，即对如何区分可靠体素和非可靠体素缺乏共识。通常使用最小探测脉冲数量阈值来判定遮挡体素[66,72]，但是探测脉冲数量取决于体素大小、扫描仪分辨率等多种因素，在实际测量中变化很大。最小可信间隙分数[73] 或光束探索的体素体积百分比[40,70] 等对体素大小不太敏感的标准也被用作可靠性指标。然而现有文献中推荐了不同百分比的探索体素体积，从 15% [16] 到 75% [40] 不等，如何选择合适的阈值也存在困难。与遮挡效应相关的第二个问题是如何减轻不可靠体素(被遮挡体素)的影响并为其分配合理的估值，目前也还没有明确的共识。忽略未充分观测的体素(分配空值)通常会导致严重低估[74]。一种常用方法是基于可靠体素结果为不可靠体素赋值，例如根据同一层已探索体素中的叶面积体密度平均值来估算未探索体素的叶面积体密度 [70,75]。但是这种方法也存在误差，因为未探索的体素一般位于冠内，而通常情况下冠内、冠外叶面积体密度并不一致；此外，联合多视角观测数据被证明是有效消除遮挡效应的手段，可融合多站点云以克服遮挡效应也被认为是基于体素方法的一个优势[32,60]。但是这也引出基于体素法中的第三个难题，即非均匀采样的问题。首先，点云密度是扫描仪到目标体素之间距离的函数，同一观测站下不同体素的点云密度并不相同。其次，遮挡效应和多站观测的重合区域均会进一步增加体素间的非均匀采样，这对描述冠层叶面积参数的三维空间分布存在直接影响，但目前针对非均匀采样的研究较少[15]。此外，Taheriazad 等[76] 提出一种考虑不同高度下采样分辨率的非固定大小体素的反演方法，并表明能在一定程度上解决遮挡效应和由于固定大小体素导致的叶面

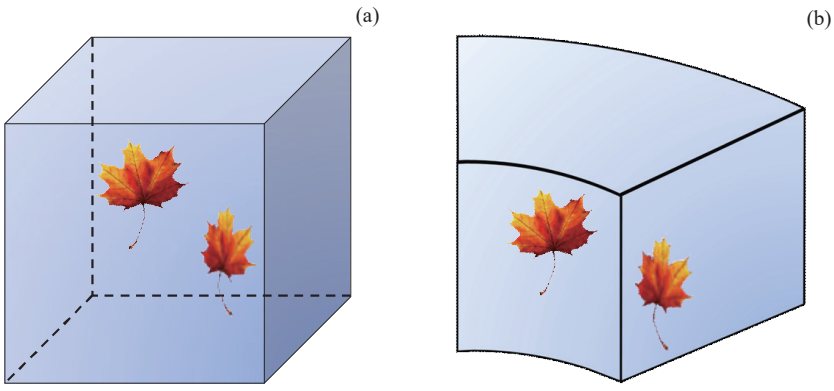


图 1 立方体体素（a）与球形体素（b）

Fig. 1 Cube voxel (a) and spherical voxel (b)

积指数低估的问题。非固定大小体素或许是解决当前基于体素方法反演叶面积参数存在问题的新思路。

3.2 基于接触频率的方法

点样方法起源于 20 世纪 20 年代末, 由 Levy 等[77]首次提出。该方法记录插入树冠的细长探针与植被元素的接触次数, 将其除以探针长度获取接触频率, 从而估算叶面积参数。Wilson 分析了点样方法中叶片和探针方向的影响从而改进了该项技术并提出斜点样方法[46,78]。Wilson 等[78]将接触频率 $N(\theta)$ 定义为“在天顶角 θ 下, 每单位长度的探针与叶片接触的次数”。在对探针尺寸的影响进行校正后, 接触频率等于表观叶面积体密度, Wilson 等[46]将其定义为“单位体积空间中所有叶片在垂直于天顶角 θ 方向上的投影面积”。当假设叶片相对于方位角均匀分布时, 则可以联合 $G(\theta)$ 函数估算叶面积体密度[44], 即

$$\rho = \frac{N(\theta)}{G(\theta)}. \tag{8}$$

基于斜点样方法理论, 将基于接触频率的方法迁移至地基激光雷达数据时, 点云体素化是一种合理且契合的选择[16]。与基于间隙率的体素化方法类似, 基于接触频率的方法也可分为两类。一种是根据体素属性(空体素、非空体素)分层计算接触频率[79–84]。Hosoi 等[79]提出的 VCP (Voxel-Based Canopy Profiling) 是该类方法中的代表, VCP 法以每层中非空体素在所有体素中(去除无脉冲通过的空体素)的占比取代 Beer 定理中的-ln(P)作为衰减因子来计算当前层叶面积指数。此类方法能够联合多站观测数据有效地获取植被[79,80]、农作物[82]的冠层叶面积密度剖面信息, 并在地基、机载数据融合反演叶面积参数中表现出色[80]。在体素大小选取方面, 此类方法较为统一并倾向于适应扫描仪分辨率的小体素, 以在识别叶片间的大间隙和单叶内小间隙之间找到平衡[81]。但是, 也有观点认为此类方法是一种基于间隙分数理论而非标准点样方理论的方法[81]。

另一种思路涉及单个体素内的脉冲追踪技术, 通过将进入体素的激光脉冲视为一组沿着长度等于体素边长的截平面不规则插入的探针来计算接触频率。但是激光脉冲与体素内植被元素的接触次数不能超过一次, 且激光脉冲只能探索体素的一部分, 这会导致叶面积密度的低估[68,84]。为解决这一问题, Béland 等[16]视进入体素的脉冲的平均自由路径长度(见图 2)为探针长度来计算修正接触频率并取得了较好的反演效果。Pimont 等[85]基于最大似然估计理论证明在植被元素很小且随机分布的前提下, 该修正后的接触频率确实是衰减系数的最大似然估计, 并建议在脉冲数量较少或植被元素尺寸相对于体素尺寸较大时进行偏差校正, 从而产生无偏估计量。该类方法能够提供叶面积体密度的三维空间分布, 但在联合多站数据提高反演精度方面缺少优势, 因此需要更加重视因遮挡效应导致的“点云空洞”问题。使用光辐射传输模型根据到达被遮挡体素的阳光量分配叶面积指数[16]和联合多站数据计算接触频率[86]是减缓遮挡

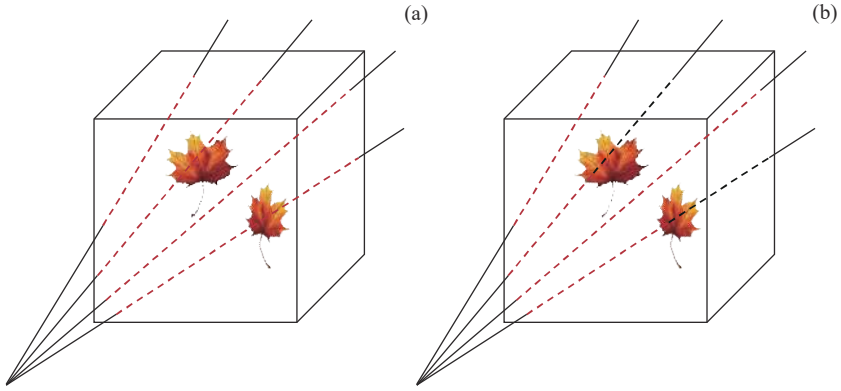


图 2 路径长度与自由路径长度。(a) 路径长度(红色虚线): 不考虑命中植被元素条件下, 光束通过体素的路径长度。(b) 自由路径长度(红色虚线): 在最终命中植被元素之前光束实际探索的路径长度

Fig. 2 Path length and free path length. (a) Path length (red dotted line): the length of the paths of beams through the voxels in case of absence of hit. (b) Free path length (red dotted line): the length of the paths actually explored by beams before eventual hit of vegetation element

效应的两种尝试。此外,该类方法中体素大小的选择有着更多的讨论[68,70,85]。

从理论角度,Beer 定律和斜点样方法的主要区别在于,Beer 定律利用间隙率与叶面积指数之间的关系进行反演,只考虑被遮挡和未被遮挡两种情况,不考虑遮挡情况下光线与叶片有几次交集;而斜点样方法则考虑探针碰到了几片叶片,该方法更接近基于叶面积指数定义的采样统计。因此,理论上 Beer 定律受树冠后方点云缺失的影响小,而斜点样方法则对点云的完整性要求更高。尽管理论层面存在一定差异,但二者都试图通过描述和量化光线与植被冠层的交互过程从而理解和模拟植被的光学性质,尤其是在使用相同的点云组织方法(体素)和脉冲追踪技术时,基于间隙率和接触频率的方法所面临的问题存在共通之处。其中,最为凸显的问题是体素大小的选择,尽管现有文献对最适体素大小并未达成一致,但在体素大小的选择理念上,两种方法之间可互为借鉴。此外,体素之间的遮挡效应是两种方法共同面对的一大难题,遮挡体素的判定和赋值方法是两种方法所通用的(见表 2)。

3.3 基于计算机图形学理论

激光雷达扫描数据由离散点组成。反演叶面积通常依赖于离散点,或由离散点转换得到的 2D 像素、3D 体素之间的统计关系(如间隙率,接触频率等),而非直接由离散点获取叶面积信息。近年来,基于计算机图形学理论的方法也被用于叶面积参数的反演当中,该类方法的核心思想是直接获取离散点到叶面积的转换关系。

其中一种方式是通过构建三角网组织叶片点以估算叶面积。Yun 等[31] 基于 Delaunay 三角剖分算法将抽样叶片点转换成由三角形组成的叶面并计算相应面积,然后通过沿脉冲距离向分层,在近似空间分辨率的层中计算叶片点数和叶面积之间的数量关系,并根据叶片点数估算分层叶面积,最终获取单木叶面积信息。在此基础上,Yun 等[18] 根据扫描仪角度分辨率等信息提出自适应的 Delaunay 三角剖分阈值以提高叶面积反演精度。You 等[87] 也提出一种直接测量由 alpha 形状算法生成的叶片点包络面积估算单木叶面积指数的方法。此类方法不受聚集效应等因素影响且随扫描仪性能的发展能发挥更好的潜能。

同时,点云的空间分辨率本身隐含着叶片面积测量的尺度。Ma 等[17] 提出一种根据点云中特定点空间分辨率等信息直接估算其代表表面积的方法,并根据所有分类点的代表面积估算叶面积参数和木质组分比。他们的结果表明所提出的方法可以有效地估算单木和林分尺度的木质组分比,但是用户预定义的采样空间分辨率不应大于叶片特征短边长度。此外,一种基于蒙特卡罗模拟估算冠层间隙率的方法也被初步证明有效[88]。

基于计算机图形学理论的方法为叶面积参数反演提供了新的思路,但是该类方法依赖于一定点云密度下、完整的点云采样以实现离散点对叶面的准确刻画,因此,容易受到遮挡效应和点云密度的影响。此外,该类方法依赖于较高精度的枝叶分离算法、点云去噪算法和表面重建算法。随着扫描仪性能的不断发展,该类方法在复杂、稠密的林分场景中的应用有待进一步地验证和研究。

3.4 基于生态生理学模型

基于生态生理学模型的方法假设目标冠层的叶面积参数与其它冠层结构参数(树高、冠幅、胸径等)相关[89]。通过一定实测数据构建叶面积参数与其它冠层结构参数之间的异速生长方程,根据激光雷达数据快捷提取相应指标并应用异速生长方程以反演近

表 2 遮挡体素判定指标及处理方法

Table 2 Indicator and processing methods for occlusion voxels

遮挡体素判定指标	代表文献	遮挡体素处理方法	代表文献
最小探测脉冲数量	[15]	分配同层非遮挡体素的FAVD平均值	[15, 75]
最小可信间隙分数	[73]	分配所有非遮挡体素的FAVD平均值	[70]
脉冲探测到的体素体积比	[16, 70]	基于光传输模型,根据到达遮挡体素的阳光量分配 FAVD	[16]
		基于非遮挡体素 FAVD 与高度等参量构建的经验关系	[70]

似条件下的冠层叶面积参数。此类方法早期多见于机载激光雷达反演叶面积参数。受限于机载点云密度,通常用于反演较为简单的树高变量(最大高度[90]、平均高度[91]、高度中位数[92]、高度百分位数[93] 等)和覆盖度变量(冠层覆盖度[94]、冠层表面积[95]、冠层直径[90] 等),而这些树高变量等与叶面积参数之间的关联并不直接,在一定程度上影响了叶面积参数反演的精度。

地基激光雷达可用于快速、准确地估算胸径、树冠体积和枝条长度等更为精细的结构参数。此外,基于地基激光雷达的高密度点云数据,有研究已经提出了几种自动单木分割算法[96–98],有效地提高了基于树高、胸径等参数构建异速生长方程反演叶面积参数的方法效率。Olsoy 等[19] 证明基于地基激光雷达反演的冠层体积、冠层覆盖度等参数和叶面积参考值之间存在较好的回归关系,尤其是基于快速凸包算法生成的树冠包络体积预估叶面积指数的效果($r^2 = 0.76$)与点样方法估算效果($r^2 = 0.78$)高度一致且大幅度降低了原位测量时间成本。Hu 等[14] 基于高密度点云数据中精细量测的枝条长度和预先构建的异速生长方程为单木叶面积反演提供了可靠的参考值。Indirabai 等[99] 采用两种分割算法实现单木分割和单木结构属性提取,经多元回归分析,基于树高、胸径估算单木叶面积指数。

传统上,异速生长方程方法依赖于一定数量的实测数据且可移植性较差,而现有基于地基激光雷达的研究已为单木尺度叶面积参数准确反演、单木结构属性快速提取奠定了良好的基础,结合现有优秀算法为异速生长方程方法注入新活力以提升林分尺度叶面积参数的高效、准确反演仍然具有现实意义。

4 分析与讨论

4.1 方法原理分类和比较

目前,已基于地基激光雷达提出多种反演叶面积参数的方法,不同方法在理论基础、数据组织等方面存在不同,适用于不同尺度下,不同叶面积参数的反演(见表 3),同时不同方法的反演精度也受到一些共同或特有因素的影响。

因完善的理论基础和可操作的测量方案,基于 Beer 定律的方法是目前测量叶面积参数的主流方法。按照点云组织形式不同,已形成基于 2D 图像、脉冲和体素的三类方法。基于 2D 图像的方法简单高效,能够有效接续叶面积参数被动光学反演研究。基于脉冲的方法无需改变原有的点云组织形式,也避免了投影变换,体素选取等相关处理,能够有效获取垂直叶面积剖面,但聚集效应修正仍是反演过程中的核心问题。目前,以间隙大小分布法为代表的传统聚集效应修正算法已成功应用于地基激光雷达数据,此外,以路径长度分布模型为代表的新兴聚集效应修正

表 3 基于地基激光雷达的叶面积参数反演方法

Table 3 Leaf area parameter inversion methods based on TLS

理论机理	数据组织	方法概述	尺度	参数	代表文献
Beer定律	2D图像	经投影等操作转DHP图像	林分	LAIc	[13, 33, 57, 59]
	脉冲	点云切片计算RDI(Beer定律)	林分	LAIe	[32, 61]
		点云切片计算RDI(间隙大小分布法)	单木	LAIc	[24–26]
		构建树冠包络(路径长度分布模型)	单木	LA	[14, 64]
	体素	分层体素数量比计算间隙率(空/总)	单木	VFP	[29]
		体素内脉冲追踪	体素	FAVD	[15, 27, 40]
斜点样方	体素	分层体素数量比计算接触频率(叶/总)	单木	VFP	[79, 82]
		体素内脉冲追踪(平均路径长度)	体素	FAVD	[84]
		体素内脉冲追踪(平均自由路径长度)	体素	FAVD	[16, 86]
计算机图形学	点	特定点空间分辨率的代表面积	单木	LA	[17]
		Delaunay三角网组织点云并计算面积	单木	LA	[18]
生态生理学	点	构建异速生长回归方程	单木	LA	[19]

算法也进一步考虑了非均一路径长度给叶面积参数反演带来的影响,从而实现更精细地聚集修正。基于体素的方法为实现更精细的叶面积体密度三维分布提供了契机,并在一定程度上避免了聚集效应,但作为敏感因子,体素大小直接影响反演结果,最适体素大小的选择亟需进一步的研究。此外,在追求更精细的叶面积体密度三维分布时,遮挡效应是亟需解决的另一难题。通过体素组织点云数据,斜点样方理论也成功应用于地基激光雷达反演叶面积参数当中,尤其是自由路径长度的提出进一步改进了接触频率方法,使之更加契合地基激光雷达数据。在体素和脉冲追踪的处理方法下,基于接触频率的方法也同样面临体素大小选择和遮挡效应等问题。计算机图形学中的一些理论和技术为叶面积参数的反演提供了新的思路,并取得了一定成效。但相关研究仍处于起步阶段,其在真实森林场景中的应用效果有待进一步地验证。地基激光雷达能够高效、准确地反演树高、胸径等结构参数,从而为异速生长方程反演方法注入新的活力,但受异速生长方程法自身局限性影响,该类方法的反演效率有待进一步提升。

4.2 遮挡效应与多站数据联合

遮挡效应在基于地基激光雷达的叶面积参数间接反演方法中均有表现,直观体现在不同位置处不同程度的点云缺失,且随反演层次的精细程度增加而逐渐加重,并主要凸显在追求体素尺度下叶面积参数时,因后方体素的信息缺失导致难以获取叶面积参数沿脉冲距离方向上的分布。增加扫描密度和采用多回波技术能够缓解遮挡效应,但无法从根本上解决,联合多站扫描结果乃至融合地、机多平台激光雷达数据以获取完整的冠层三维轮廓对叶面积参数准确反演存在必要性。现有研究主要从点云、间隙率、结果三个层面进行多站数据联合,适用于不同的方法并已取得一定成效(见表 4)。

点云层面的联合是指经配准等处理合并在不同方位下的扫描数据,以期获取目标冠层的完整轮廓。点云层面的联合有助于消除点云空洞,但可能会加重数据冗余及非均匀采样,因此其适用于非直接基于点云或脉冲的反演方法,如基于同层体素数量比计算间隙率、接触频率,通过 Delaunay 三角网组织点云并计算面积,构建异速生长方程等反演方法。间隙率层面的联合则面向 Beer 定律下基于脉冲的方法,通过目标冠层周围多个架站数据计算的平均间隙率代替单一架站下的间隙率,适用于复杂森林场景下冠前遮挡严重的单木叶面积参数反演。结果层面的联合同样适用于前述 Beer 定律下基于脉冲的方法,更重要的是,结果层面的联合有助于解决体素尺度下沿脉冲距离向上的遮挡问题。通过动态选取优势站数据、多站结果取平均、多站结果加权平均可以初步解决脉冲距离向上被遮挡体素的反演失真问题,但是其效果仍取决于体素被遮挡程度,对于被严重遮挡的体素(多个方位上均无脉冲或极少脉冲进入)而言,仅通过简单的结果层面联合仍无法准确获取其叶面积参数。在

表 4 联合多站数据方式及适用范围

Table 4 Approaches for joint multi-station data and their applicability

联合层次	联合方式	适用方法	代表文献
点云层面	多站点云合并	基于同层体素数量比计算间隙率/接触频率 Delaunay三角网组织点云并计算面积 构建异速生长回归方程	[79]
间隙率层面	多站间隙率取平均	Beer定律下基于脉冲的方法	[61]
结果层面	动态选取优势站数据	Beer定律下基于脉冲的方法 体素内脉冲追踪	[16]
	多站结果取平均	Beer定律下基于脉冲的方法 体素内脉冲追踪计算间隙率	[25]
	多站结果加权平均	Beer定律下基于脉冲的方法 体素内脉冲追踪计算间隙率	[14]
	多站结果加和	体素内脉冲追踪计算接触频率 (平均自由路径长度)	[86]

基于体素内脉冲追踪计算接触频率的方法中, 平均自由路径长度可表征某一站点数据下目标体素的被探索体积, 因此可通过多站结果加和的方式削弱遮挡效应的影响。通过不同层次下的多站数据联合可有效地解决不同方法中、不同程度的遮挡效应, 但是如何解决体素尺度下沿距离向上的遮挡效应以看清冠层内部仍面临着较大困难。

4.3 反演尺度与真实性检验

现有方法已覆盖从体素、单木到林分多个尺度的叶面积参数反演。通常而言, 适用于小尺度的方法可以推广应用到更大尺度场景。通过体素组织点云数据, 并使用脉冲追踪技术可从理论上获取体素尺度的叶面积参数, 这代表目前叶面积参数间接测量的最精细成果。但目前难以直接验证体素尺度的反演结果, 通常是将体素尺度的结果整合至分层[79]、单木[16,29] 或林分尺度[83] 后再进行验证分析。单木尺度是地基激光雷达反演叶面积参数的优势尺度。在理论层面, 现有方法大多可实现单木尺度的参数估算, 在技术实现和实际应用中, 一些方法的反演效果也已得到破坏性采样[25]、异速生长方程[14] 等真实性数据的检验。地基激光雷达同样适用于小范围的林分尺度参数反演。在此尺度下, 基于间隙率的方法通常有着更强的可操作性和更高的反演效率。实际工作中, 难以对地块级森林参数的空间分布进行可靠、直接的现场测量, 因此林分尺度的验证多依赖于同地块内 LAI-2000, TRAC, AccuPAR、数字半球摄影等仪器的反演结果[76,83,100]。此外, 近年来计算机真实场景模拟技术不断发展, 模拟场景真实性不断提高, 可直接从几何上提供准确的叶面积参数真值, 为林分尺度验证提供了有力支持[27,71]。

在不同尺度下, 叶面积参数反演方法所关注的影响因素也存在差异。从林分尺度的冠间聚集到单木尺度的冠层聚集、非均一路径长度, 再到体素尺度的体素大小、遮挡效应、非均匀采样, 随着尺度的细化, 反演中所考虑的影响因素也更加细微具体。在此背景下, 不同尺度上估算的叶面积参数可能不一致, 即叶面积参数反演中的尺度效应无法避免。如何开展不同尺度下反演结果的纵向对比, 理解尺度效应并实现尺度不变性的叶面积参数反演方法可能是未来需要努力的重要方向。

5 结论

从方法论的角度综述了基于地基激光雷达的叶面积参数反演方法, 并对每种不同方法之间的优势、局限性和影响因素进行了讨论。现有研究以基于间隙率的方法为主, 基于接触频率、计算机图形学理论和生态生理学模型的方法也不断涌现。现有方法已基本覆盖不同尺度下、不同叶面积参数的反演。但面向越来越精细、准确的叶面积参数估算需求, 基于地基激光雷达反演叶面积参数仍有一些问题亟待进一步研究。

(1) 聚集效应修正算法的研究。现有以间隙大小分布法和路径长度分布模型为代表的修正算法能够较好解决不同尺度下的聚集效应, 聚集效应修正算法不断向精细尺度发展, 但目前的方法仍然难以考虑冠内叶面积密度的差异。

(2) 体素大小的选择和遮挡效应。以体素组织点云数据并结合脉冲追踪技术是反演精细的叶面积参数三维分布的可行思路, 但是体素大小的选择仍需更多的研究, 遮挡效应的解决也是一大难题。

(3) 数据融合问题。联合多视角、多平台点云是消减遮挡效应的有力方法, 但目前的融合方法相对简单, 且存在加重非均匀采样等问题, 如何更好地联合多站点云数据以精确反演叶面积参数有待进一步研究。

(4) 算法的对比验证。目前已面向不同的需求和问题形成了一系列优秀的叶面积参数反演方法, 但在真实森林场景中的应用和不同方法之间的对比分析相对匮乏, 如何在应用和验证中赋予算法新的生命力也是目前需要考虑的一大问题。

以地基激光雷达为代表的 LiDAR 系统为叶面积参数的反演带来了新的机遇, 且随着新技术的不断发展, 地基激光雷达将提供更大尺度、更精细的观测能力, 从而在冠层结构的准确建模和反演中发挥更为重要的作用。

参考文献

[1] CHEN J M, BLACK T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1992, **15**(4): 421-429

[2] YAN G J, HU R H, LUO J H, *et al*. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances,

challenges, and perspectives[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, **265**: 390-411

[3] MAHOWALD N, LO F, ZHENG Y, *et al*. Projections of leaf area index in earth system models[J]. *Earth System Dynamics*, 2016, **7**(1): 211-229

[4] JUPP D L B, CULVENOR D S, LOVELL J L, *et al*. Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called Echidna[J]. *Tree Physiology*, 2008, **29**(2): 171-181

[5] LIU Yang, LIU Ronggao, CHEN Jingming, *et al*. Current status and perspectives of Leaf Area Index retrieval from optical remote sensing data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, **15**(5): 734-743 (刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望 [J]. 地球信息科学学报, 2013, **15**(5): 734-743)

[6] WANG Jindi, LI Xiaowen, STRAHLER A H. An indirect estimating method of foliage area volume density and leaf-area index of tree crown[J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1995, **10**(4): 288-297 (王锦地, 李小文, STRAHLER A H. 树冠叶面积体密度和叶面积指数的间接估值方法研究 [J]. 环境遥感, 1995, **10**(4): 288-297)

[7] LUO Shezhou, WANG Cheng, ZHANG Guibin, *et al*. Forest leaf area index (LAI) inversion using airborne LiDAR data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(5): 1467-1475 (骆社周, 王成, 张贵宾, 等. 机载激光雷达森林叶面积指数反演研究 [J]. 地球物理学报, 2013, **56**(5): 1467-1475)

[8] XU Xiru, FAN Wenjie, TAO Xin. The spatial scaling effect of continuous canopy Leaves Area Index retrieved by remote sensing[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(3): 393-401 (徐希孺, 范闻捷, 陶欣. 遥感反演连续植被叶面积指数的空间尺度效应 [J]. 中国科学 D 辑: 中国科学, 2009, **39**(1): 79-87)

[9] BELAND M, PARKER G, SPARROW B, *et al*. On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **450**: 117484

[10] VAN LEEUWEN M, NIEUWENHUIS M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing[J]. *European Journal of Forest Research*, 2010, **129**(4): 749-770

[11] BAUWENS S, BARTHOLOMEUS H, CALDERS K, *et al*. Forest inventory with terrestrial LiDAR: a comparison of static and hand-held mobile laser scanning[J]. *Forests*, 2016, **7**(6): 127

[12] NEWNHAM G, ARMSTON J, MUIR J, *et al*. Evaluation of Terrestrial Laser Scanners for Measuring Vegetation Structure[R]. Canberra: CSIRO, 2012

[13] ZHENG G, MOSKAL L M, KIM S H. Retrieval of effective leaf area index in heterogeneous forests with terrestrial laser scanning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(2): 777-786

[14] HU R H, BOURNEZ E, CHENG S Y, *et al*. Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, **144**: 357-368

[15] NGUYEN V T, FOURNIER R A, CÔTÉ J F, *et al*. Estimation of vertical plant area density from single return terrestrial laser scanning point clouds acquired in forest environments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **279**: 113115

[16] BÉLAND M, WIDLOWSKI J L, FOURNIER R A, *et al*. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(9): 1252-1266

[17] MA L X, ZHENG G, EITEL J U H, *et al*. Determining woody-to-total area ratio using terrestrial laser scanning (TLS)[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **228/229**: 217-228

[18] YUN T, CAO L, AN F, *et al*. Simulation of multi-platform LiDAR for assessing total leaf area in tree crowns[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, **276/277**: 107610

[19] OLSOY P J, MITCHELL J J, LEVIA D F, *et al*. Estimation of big sagebrush leaf area index with terrestrial laser scanning[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **61**: 815-821

[20] YAN Guangjian, HU Ronghai, LUO Jinghui, *et al*. Review of indirect methods for leaf area index measurement[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(5): 958-978 (阎广建, 胡容海, 罗京辉, 等. 叶面积指数间接测量方法 [J]. 遥感学报, 2016, **20**(5): 958-978)

[21] WANG Y, FANG H L. Estimation of LAI with the LiDAR technology: a review[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(20): 3457

[22] MUUMBE T P, BAADE J, SINGH J, *et al*. Terrestrial laser scanning for vegetation analyses with a special focus on savannas[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(3): 507

[23] CIFUENTES R, VAN DER ZANDE D, FARIFTEH J, *et al*. Effects of voxel size and sampling setup on the estimation of forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **194**: 230-240

[24] ZHU X, SKIDMORE A K, WANG T J, *et al*. Improving leaf area index (LAI) estimation by correcting for clumping and woody effects using terrestrial laser scanning[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **263**: 276-286

[25] LI Y M, GUO Q H, SU Y J, *et al*. Retrieving the gap fraction, element clumping index, and leaf area index of individual trees using single-scan data from a terrestrial laser scanner[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, **130**: 308-316

[26] MOORTHY I, MILLER J R, BERNI J A J, *et al*. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(2): 204-214

[27] MKAOUAR A, KALLEL A, BEN RABAH Z, *et al*. Joint estimation of leaf area density and leaf angle distribution using TLS point cloud for forest stands[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, **14**: 11095-11115

[28] WEI S S, YIN T G, DISSEGNA M A, *et al*. An assessment study of three indirect methods for estimating leaf area density and leaf area index of individual trees[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, **292/293**: 108101

[29] ZHENG G, MOSKAL L M. Computational-geometry-based retrieval of effective leaf area index using terrestrial laser scanning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(10): 3958-3969

[30] ZHAO K G, GARCÍA M, LIU S, *et al*. Terrestrial lidar remote sensing of forests: maximum likelihood estimates of canopy profile, leaf area index, and leaf angle distribution[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **209/210**: 100-113

[31] YUN T, AN F, LI W Z, *et al*. A novel approach for retrieving tree leaf area from ground-based LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(11): 942

[32] PUESCHEL P, NEWNHAM G, HILL J. Retrieval of gap fraction and effective plant area index from phase-shift terrestrial laser scans[J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**(3): 2601-2627

[33] GROTTI M, CALDERS K, ORIGO N, *et al*. An intensity, image-based method to estimate gap fraction, canopy openness and effective leaf area index from phase-shift terrestrial laser scanning[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, **280**: 107766

[34] PASCU I S, DOBRE A C, BADEA O, *et al*. Estimating forest stand structure attributes from terrestrial laser scans[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 205-215

[35] YANG X Y, STRAHLER A H, SCHAAF C B, *et al*. Three-dimensional forest reconstruction and structural parameter retrievals using a terrestrial full-waveform lidar instrument (Echidna®)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **135**: 36-51

[36] ZHAO F, YANG X Y, SCHULL M A, *et al*. Measuring effective leaf area index, foliage profile, and stand height in New England forest stands using a full-waveform ground-based lidar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(11): 2954-2964

[37] HILKER T, VAN LEEUWEN M, COOPS N C, *et al*. Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand[J]. *Trees*, 2010, **24**(5): 819-832

[38] STRAHLER A H, JUPP D L B, WOODCOCK C E, *et al*. Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®)[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, **34**(S2): S426-S440

[39] GUO Qinghua, SU Yanjun, HU Tianyu, *et al*. Lidar Principles, Processing and Applications in Forest Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018 (郭庆华, 苏艳军, 胡天宇, 等. 激光雷达森林生态应用: 理论、方法及实例 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2018)

[40] GRAU E, DURRIEU S, FOURNIER R, *et al*. Estimation of 3D vegetation density with terrestrial laser scanning data using voxels. A sensitivity analysis of influencing parameters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **191**: 373-388

[41] WANG Y, FANG H L, ZHANG Y H, *et al*. Retrieval and validation of vertical LAI profile derived from airborne and spaceborne LiDAR data at a deciduous needleleaf forest site[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2023, **60**(1): 2214987

[42] DE WIT C T. Photosynthesis of Leaf Canopies[R]. Wageningen: Pudoc, 1965: 1-57

[43] MONSI M, SAEKI T. On the factor light in plant communities and its importance for matter production[J]. *Annals of Botany*, 2005, **95**(3): 549-567

[44] ROSS J. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands[M]. Dordrecht: Springer, 1981

[45] NILSON T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands[J]. *Agricultural Meteorology*, 1971, **8**: 25-38

[46] WILSON J W. Inclined point quadrats[J]. *New Phytologist*, 1960, **59**(1): 1-7

[47] YAN G J, JIANG H L, LUO J H, *et al*. Quantitative evaluation of leaf inclination angle distribution on leaf area index retrieval of coniferous canopies[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, **2021**: 2708904

[48] MILLER J B. A formula for average foliage density[J]. *Australian Journal of Botany*, 1967, **15**(1): 141-144

[49] HU Ronghai, YAN Guangjian. Indirect measurement of forest LAI to deal with the underestimation problem based on Beer-Lambert law[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, **14**(3): 366-375 (胡容海, 阎广建. 对 Beer-Lambert 定律间接测量森林 LAI 的误差低估分析 [J]. 地球信息科学学报, 2012, **14**(3): 366-375)

[50] LANG A R G, XIANG Y Q. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, **37**(3): 229-243

[51] CHEN J M, CIHLAR J. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(27): 6211-6222

[52] LEBLANC S G, CHEN J M, FERNANDES R, *et al*. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **129**(3/4): 187-207

[53] WALTER J M N, FOURNIER R A, SOUDANI K, *et al*. Integrating clumping effects in forest canopy structure: an assessment through hemispherical photographs[J]. *Cana-*

dian Journal of Remote Sensing, 2003, **29**(3): 388-410

[54] HU R H, YAN G J, MU X H, *et al*. Indirect measurement of leaf area index on the basis of path length distribution[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **155**: 239-247

[55] HERBERT T J. Area projections of fisheye photographic lenses[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, **39**(2/3): 215-223

[56] DANSON F M, HETHERINGTON D, MORSDORF F, *et al*. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(1): 157-160

[57] ZHENG G, MOSKAL L M. Spatial variability of terrestrial laser scanning based leaf area index[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, **19**: 226-237

[58] SFU. Gap Light Analyzer (GLA)[M]. Burnaby: Simon Fraser University, 1999

[59] ARSLAN A E, ERTEN E, INAN M. A comparative study for obtaining effective Leaf Area Index from single Terrestrial Laser Scans by removal of wood material[J]. *Measurement*, 2021, **178**: 109262

[60] FLYNN W R M, OWEN H J F, GRIEVE S W D, *et al*. Quantifying vegetation indices using terrestrial laser scanning: methodological complexities and ecological insights from a Mediterranean forest[J]. *Biogeosciences*, 2023, **20**(13): 2769-2784

[61] WOODGATE W, JONES S D, SUAREZ L, *et al*. Understanding the variability in ground-based methods for retrieving canopy openness, gap fraction, and leaf area index in diverse forest systems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **205**: 83-95

[62] MOORTHY I, MILLER J R, HU B X, *et al*. Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidar data[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, **34**(3): 320-332

[63] ANTONARAKIS A S, RICHARDS K S, BRASINGTON J, *et al*. Determining leaf area index and leafy tree roughness using terrestrial laser scanning[J]. *Water Resources Research*, 2010, **46**(6): W06510

[64] CHEN Y M, ZHANG W M, HU R H, *et al*. Estimation of forest leaf area index using terrestrial laser scanning data and path length distribution model in open-canopy forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **263**: 323-333

[65] BÉLAND M, WIDLOWSKI J L, FOURNIER R A. A model for deriving voxel-level tree leaf area density estimates from ground-based LiDAR[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, **51**: 184-189

[66] DURRIEU S, ALLOUIS T, FOURNIER R A, *et al*. Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level[C]//Proceedings of the SilviLaser 2008. Edinburgh: SilviLaser, 2008

[67] SOMA M, PIMONT F, DUPUY J L. Sensitivity of voxel-based estimations of leaf area density with terrestrial LiDAR to vegetation structure and sampling limitations: a simulation experiment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, **257**: 112354

[68] SOMA M, PIMONT F, DURRIEU S, *et al*. Enhanced measurements of leaf area density with T-LiDAR: evaluating and calibrating the effects of vegetation heterogeneity and scanner properties[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(10): 1580

[69] WU D, PHINN S, JOHANSEN K, *et al*. Estimating changes in leaf area, leaf area density, and vertical leaf area profile for mango, avocado, and macadamia tree crowns using terrestrial laser scanning[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(11): 1750

[70] BÉLAND M, BALDOCCHI D D, WIDLOWSKI J L, *et al*. On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial LiDAR[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **184**: 82-97

[71] SOMA M, PIMONT F, ALLARD D, *et al*. Mitigating occlusion effects in Leaf Area Density estimates from Terrestrial LiDAR through a specific kriging method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **245**: 111836

[72] CÔTÉ J F, FOURNIER R A, EGLI R. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, **26**(6): 761-777

[73] HANCOCK S, ANDERSON K, DISNEY M, *et al*. Measurement of fine-spatial-resolution 3D vegetation structure with airborne waveform lidar: calibration and validation with voxelised terrestrial lidar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **188**: 37-50

[74] HOSOI F, OMASA K. Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, **58**(12): 3463-3473

[75] SCHNEIDER F D, KüKENBRINK D, SCHAEPMAN M E, *et al*. Quantifying 3D structure and occlusion in dense tropical and temperate forests using close-range LiDAR[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, **268**: 249-257

[76] TAHERIAZAD L, MOGHADAS H, SANCHEZ-AZOFEIFA A. Calculation of leaf area index in a Canadian boreal forest using adaptive voxelization and terrestrial LiDAR[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, **83**: 101923

[77] LEVY E B. The point method for pasture analysis[J]. *N Z J Agric*, 1933, **46**: 267-279

[78] WILSON J W. Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats[J]. *New Phytologist*, 1959, **58**(1): 92-99

[79] HOSOI F, OMASA K. Voxel-based 3-D modeling of indi-

vidual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(12): 3610-3618

[80] HOSOI F, NAKAI Y, OMASA K. Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(5): 2215-2223

[81] LI Y M, GUO Q H, TAO S L, *et al*. Derivation, validation, and sensitivity analysis of terrestrial laser scanning-based leaf area index[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2016, **42**(6): 719-729

[82] SU W, ZHU D H, HUANG J X, *et al*. Estimation of the vertical leaf area profile of corn (*Zea mays*) plants using terrestrial laser scanning (TLS)[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, **150**: 5-13

[83] XIE X S, YANG Y Z, LI W Z, *et al*. Estimation of leaf area index in a typical northern tropical secondary monsoon rainforest by different indirect methods[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(6): 1621

[84] BAILEY B N, MAHAFFEE W F. Rapid, high-resolution measurement of leaf area and leaf orientation using terrestrial LiDAR scanning data[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, **28**(6): 064006

[85] PIMONT F, ALLARD D, SOMA M, *et al*. Estimators and confidence intervals for plant area density at voxel scale with T-LiDAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **215**: 343-370

[86] BÉLAND M, KOBAYASHI H. Mapping forest leaf area density from multiview terrestrial lidar[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, **12**(4): 619-633

[87] YOU H K, LI S H, MA L X, *et al*. Leaf area index retrieval for broadleaf trees by envelope fitting method using terrestrial laser scanning data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1-5

[88] XU Y F, LI S H, YOU H K, *et al*. Retrieval of canopy gap fraction from terrestrial laser scanning data based on the monte carlo method[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1-5

[89] WEISS M, BARET F, SMITH G J, *et al*. Review of methods for in situ Leaf Area Index (LAI) determination[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **121**(1/2): 37-53

[90] ROBERTS S D, DEAN T J, EVANS D L, *et al*. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **213**(1/2/3): 54-70

[91] FARID A, GOODRICH D C, BRYANT R, *et al*. Using airborne lidar to predict Leaf Area Index in cottonwood trees and refine riparian water-use estimates[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**(1): 1-15

[92] POPE G, TREITZ P. Leaf Area Index (LAI) estimation in boreal mixedwood forest of ontario, canada using Light Detection and Ranging (LiDAR) and WorldView-2 imagery[J]. *Remote Sensing*, 2013, **5**(10): 5040-5063

[93] QU Y H, SHAKER A, SILVA C A, *et al*. Remote sensing of leaf area index from LiDAR height percentile metrics and comparison with MODIS product in a selectively logged tropical forest area in eastern amazonia[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(6): 970

[94] RICHARDSON J J, MOSKAL L M, KIM S H. Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**(6/7): 1152-1160

[95] LOVELL J L, JUPP D L B, CULVENOR D S, *et al*. Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, **29**(5): 607-622

[96] TAO S L, WU F F, GUO Q H, *et al*. Segmenting tree crowns from terrestrial and mobile LiDAR data by exploring ecological theories[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, **110**: 66-76

[97] LI W K, GUO Q H, JAKUBOWSKI M K, *et al*. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2012, **78**(1): 75-84

[98] FU H P, LI H, DONG Y Q, *et al*. Segmenting individual tree from TLS point clouds using improved DBSCAN[J]. *Forests*, 2022, **13**(4): 566

[99] INDIRABAI I, NAIR M V H, JAISHANKER R N, *et al*. Terrestrial laser scanner based 3D reconstruction of trees and retrieval of leaf area index in a forest environment[J]. *Ecological Informatics*, 2019, **53**: 100986

[100] ROUZBEH KARGAR A, MACKENZIE R, ASNER G P, *et al*. A density-based approach for leaf area index assessment in a complex forest environment using a terrestrial laser scanner[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(15): 1791