

基于旋转薄片体素化森林三维重构方法*

刘原池, 李文楷, 刘红良, 李明轩

中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510006

摘要: 森林三维场景的模拟有助于在结构尺度上研究森林生态系统结构与生态系统多样性间的联系。激光雷达点云数据的立方体体素化是一种常用的森林三维重构方法, 但存在易高估叶片面积等缺点。鉴于此, 提出一种改进的薄片化旋转体素化方法, 并与传统的立方体体素化方法进行对比研究, 探讨二者模拟森林三维结构的精度差异。研究使用虚拟和部分真实的森林场景数据, 借助 HELIOS++ (Heidelberg LiDAR operations simulator)、VBRT (voxel-based radiative transfer) 和 PBRT (physically based ray tracer) 模型, 模拟机载激光雷达点云数据及多光谱影像。结果表明: 与立方体体素化相比, 薄片化及随机旋转后的树叶模型可显著改善树木冠层的真实感, 且在点云数据高度分布、冠层覆盖度等核心指标上与基准数据表现出更高的相关度。研究提出的改进体素化方法优化了虚拟遥感数据的视觉效果和准确性, 有助于森林精细化三维重构, 在森林辐射传输研究方面具有良好的应用潜能。

关键词: 森林三维重建; 激光雷达; 机载激光雷达; 地基激光雷达; 体素化

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)05-0084-16

Three-dimensional forest reconstruction using rotational slice-based voxelization

LIU Yuanchi, LI Wenkai, LIU Hongliang, LI Mingxuan

School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Simulating realistic three-dimensional (3D) forest scenes is key to studying the relationship between forest ecosystem structure and biodiversity at the structural scale. Light detection and ranging (LiDAR) point cloud voxelization is widely used for 3D forest reconstruction, but it usually overestimates the leaf areas of canopies. Here we propose an improved rotational slice-based voxelization method for 3D forest reconstruction. Using two synthetic forest scenes, we compared different 3D reconstruction methods by simulating airborne laser scanning data and multi-spectral imagery based on HELIOS++ (Heidelberg LiDAR operations simulator), VBRT (voxel-based radiative transfer), and PBRT (physically based ray tracer), respectively. Experimental results show that the slice-based and randomly rotated leaf models significantly improve canopy realism and produce a higher correlation with benchmark results for key metrics, such as point cloud height distribution and canopy coverage, compared with the traditional cubic voxelization. The new voxelization method proposed in this study enhances the visual effects and accuracy of simulated remote sensing data,

* 收稿日期: 2025-02-05

录用日期: 2025-04-29

网络首发日期: 2025-06-19

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515011369, 2022B1515130001)

作者简介: 刘原池(1998年生), 女; 研究方向: 遥感技术与应用、统计模拟;

E-mail: liuych95@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 李文楷(1982年生), 男; 研究方向: 遥感技术与应用、统计模拟;

E-mail: liwenk3@mail.sysu.edu.cn



ZR20250023



ZR20250023

contributing to more accurate and realistic 3D forest reconstruction and demonstrating good potential in forest radiative transfer modeling.

Key words: three-dimensional forest reconstruction; light detection and ranging (LiDAR); airborne laser scanning (ALS); terrestrial laser scanning (TLS); voxelization

森林是地球上重要的生态系统,在调节全球气候及碳循环过程中扮演着关键的角色(Brockerhoff et al., 2017; 粮农组织, 2021; 粮农组织, 2024)。森林三维结构在不同尺度的生物物理过程中发挥着重要作用(Côté et al., 2012; O'Sullivan et al., 2021)。模拟真实的森林三维场景有助于在结构尺度上研究森林生态系统结构与生态系统多样性之间的联系,对了解森林生长状况、获取冠层结构参数及碳储量变化具有重要意义(Luo et al., 2023; Tan et al., 2024; Torresani et al., 2023; 万杰等, 2024)。

近年来,激光雷达(LiDAR, light detection and ranging)的发展为森林结构重建提供了新的可能。LiDAR是一种主动遥感技术,其利用激光测距原理获取传感器与目标地物间的距离,获取的点云或波形数据可表征森林树木的冠层枝干结构、垂直分布信息等(Xie et al., 2018)。其中,机载激光雷达(ALS, airborne laser scanning)可以提供大范围扫描,但对茂密植被区域的林下空间描绘不足(Moudrý et al., 2023);地基激光雷达(TLS, terrestrial laser scanning)则具有非常高的点密度和精度(曹伟等, 2021),可在树枝尺度上描述单棵树木的三维结构信息,是目前实现森林三维场景重构的重要数据来源(Liu et al., 2023)。

目前利用LiDAR点云数据表示树木结构的方法主要有3类:1)使用一组简单几何体的不同组合,如椭球体、半椭球体或圆柱体等来近似表示冠层或枝干(Chen et al., 1997),但这类方法难以描述冠层中复杂的树叶间隙、分枝结构等(王嘉童等, 2022)。2)三维显式建模,例如Côté et al. (2018)根据TLS数据和异速生长算法模拟树木分枝结构的生长,参考真实针叶形状创建单位针叶,并按假设的针叶长度和角度放置于生成的树枝上,最终按地块的叶面积指数、空隙度等生成地块森林。该方法虽可产生逼真的三维树模型,但存在步骤复杂、难以调参、假设条件多等缺陷,且其树叶位置非真实,需后续根据物种、叶倾角分布等信息按照假设规律添加。3)体素化表示方法,将研究空间按照一定的分辨率划分

为立方体网格,并对每个体素赋予材料属性(Bienert et al., 2014; Li et al., 2018; Weiser et al., 2021)。初期,研究者通常使用较粗分辨率(分米或米级)的体素来描述森林三维结构,每个体素定义为均匀的浑浊介质,体素内部需设定叶面积密度和叶倾角分布等统计参数,但该方法描述精度较低,且每个体素所需的统计参数也增加了其在应用中的复杂度(Schneider et al., 2014; Widlowski et al., 2014)。针对上述问题, Li et al. (2018)使用厘米级的高分辨率体素,显著提高了森林三维重构的精度,将每个体素定义为固体介质,避免了浑浊介质所需的统计参数,降低了体素化方法的复杂度。一些研究也证明了对TLS点云数据使用分辨率为0.02 m的固体体素进行三维重构可以取得较高的模拟精度(Weiser et al., 2021; Li et al., 2024)。但该方式对内存消耗较大,需要使用八叉树结构进行优化。综合来看,基于简单几何体的表达方式对树木结构的描述精度最低;三维显式建模可达到较高精度的重构效果,但需要用户对给定的物种模型准确地设置符合现实树木结构的模型参数,在现实操作中较为复杂;体素化是3种方式中最简单的,当体素的分辨率较高时该方法可达到与三维显式建模接近的重构效果。

由于体素化方法的易操作性,目前已被广泛应用于LiDAR点云数据处理、森林三维重构(Weiser et al., 2021; Li et al., 2024)和辐射传输模拟(卞尊健等, 2021)。传统的体素化方法大多采用的是规则排列的立方体结构,虽然计算速度较快但在森林三维重构中易导致叶片面积被高估,在森林冠层辐射传输模拟中也会造成植被的冠层阴影偏大及辐射亮度被低估(Li et al., 2018)。当激光束击中的某点位于叶片时,该点的重建表示是否应当选用与真实树叶更接近的薄片形式,是否应将每个点云可能的旋转和非立方体情况纳入考虑,仍需深入探讨。鉴于此,本研究创新性地对树叶的表征形状和旋转状态进行改变,探究旋转薄片体素与传统的规则立方体素的表示方法相比,能否产生更高精度的森林三维结构重建。

1 数据与方法

1.1 场景数据

虚拟森林数据网站(RAMI, radiation transfer model intercomparison), 常用于评估控制实验条件下冠层辐射传输模型结果间的一致性(Pinty et al., 2001)。本研究选用其中的 Järvelja Birch Stand 场景(图 1a), 其位于爱沙尼亚的一个实验林区(27.26°E, 58.30°N), 范围为 100 m×100 m, 详细测量了林区内每棵树的参数(树种、年龄、胸径、树高等)以及树叶、树枝和树干的光谱属性(反射率、透射率和吸收率)。每棵规定参数下的单木提供有 OBJ 格式的显式模型可用, 其叶片形状由真实照片近似建模。场景内共 1 029 棵树, 包含枫树(*Acer platanoides*)ACPL、垂枝桦(*Betula pendula*)BEPE、欧洲椴木(*Alnus glutinosa*)ALGL、心叶椴(*Tilia cordata*)TICO、颤杨(*Populus tremuloides*)POTR、欧洲云杉(*Picea abies*)PIAB、欧洲白蜡树(*Fraxinus excelsior*)FREX 7 个物种, 共 18 棵单木模型(Widlowski et al., 2015)。

本研究还基于德国西南部 Baden-Württemberg

的真实森林数据集(8.68°E, 49.01°N)进行合成, 产生了另一个虚拟森林场景(Weiser et al., 2022a)。该数据集集中的 BR01 地块包含 2019 年实地扫描获取的 ALS 数据, 其在 1 hm² 地块内详细测量了单木参数(树种、树高、胸径等), 部分单木同时包含了 TLS、ALS 和无人机激光雷达(ULS, UAV-borne laser scanning) 3 种平台的点云数据且提供了详细的扫描参数(Weiser et al., 2022b)。该地块是一片阔叶针叶混合林, 其中有 30% 的山毛榉(*Fagus sylvatica*)FS, 22% 的欧洲云杉(*Picea abies*)PA, 16% 的鹅耳枥(*Carpinus betulus*)CB 及 16% 的橡树(*Quercus petraea*)QP (Schäfer et al., 2023), 地形坡度约为 15°。研究范围内未能同时提供每棵单木的 TLS 及对应的 ALS 数据, 故将该地块机载 ALS 数据裁剪到 100 m×100 m 范围内, 使用 Li et al. (2012) 的单木分割方法识别可能存在树木的位置。对研究区内 4 个主要物种分别选取 1 棵同时具有 TLS、ALS 及单木参数的样本树, 按照物种比例随机在单木位置上排列放置 4 类树木。该场景为借助真实点云数据人工合成的虚拟场景, 具体树种及位置分布见图 1b。

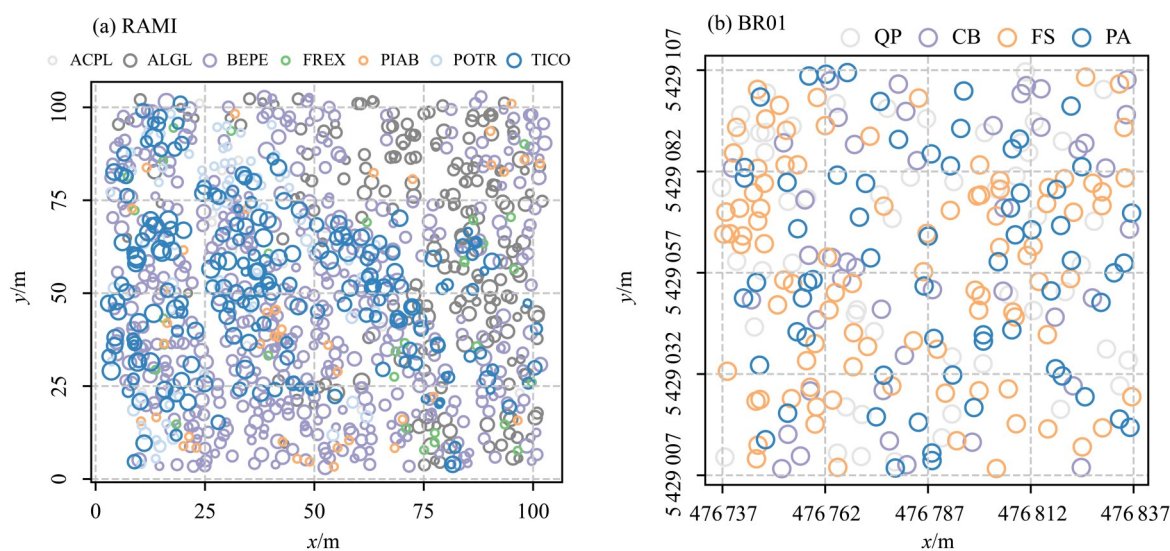


图 1 虚拟森林场景 RAMI 和 BR01 的单木分布位置

Fig. 1 Distribution positions of individual trees for RAMI and BR01 in virtual forest scenes

1.2 基于薄片化旋转化体素的单木模拟和场景构建

本研究提出的薄片化旋转化单木建模需要借助能提供详细枝叶结构的 TLS 数据。RAMI 场景的 TLS 数据借助开源的 LiDAR 虚拟器 HELIOS++ (Heidelberg LiDAR operations simulator) (Esmoris et al., 2022) 模拟产生, 扫描参数与 BR01 中真实 TLS

数据的扫描参数保持一致, 在距离树 25 m 的前、后、左、右 4 个方位分别扫描 2 次以保证点密度(图 2), 扫描仪器采用 RIEGL VZ-400, 旋转镜垂直扫描角度为 -40°~80°, 水平旋转扫描角度为 -45°~45°, 扫描分辨率为 0.2°, 扫描频率为 84 Hz, 传感器精度可达 0.005 m。扫描结果中默认提供了分类字段, 可直接将地面、树干和树叶的点云分离。

BR01 场景的 TLS 点云是真实的扫描数据, 需使用 CloudCompare 中的 CANUPO 插件进行枝叶分离。首先, 选取树叶和枝干 2 类样本点, 引入点云局部几何的多尺度维度分析构建分类器, 从而自动找到最佳的区分特征组合 (Brodu et al., 2012); 对分类完成后的点云使用 CloudCompare 中 Subsample 工具以随机降采样方法进行降采样。从视觉效果来看, 该降采样方法较好地保留了原始点云在三维空间的分布特征。RAMI 和 BR012 个场景内的树木属性如表 1 所示。

本研究的体素化方法从有分类信息的 TLS 点云数据出发, 使用 Blender 软件的 import-ply-as-verts 工具 (<https://github.com/TombstoneTumbleweedArt/import-ply-as-verts>) 进行节点编辑, 使用不同尺寸长方体块代替每个点云所在位置。与传统规则排列的立方体点云体素化不同, 本研究的方法还考虑了树

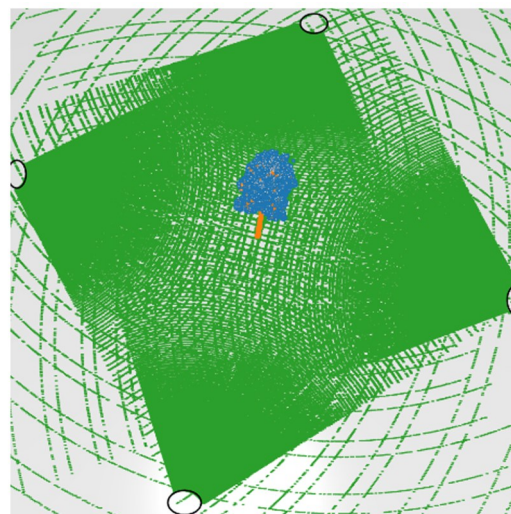


图2 HELIOS++平台模拟地基激光雷达扫描示意图

Fig. 2 Simulation of terrestrial laser scanning on the HELIOS++ platform

表1 RAMI及BR01场景内单木属性¹⁾

Table 1 Attributes of individual trees in RAMI and BR01

场景	树种	TLS 点数	降采样点/个	树高/m	胸径/cm	数量/棵	枝叶分类精度
RAMI	ACPL	11 117		15.37	11.5	16	
	ALGL1	13 363		19.35	15.0	50	
	ALGL2	22 033		22.58	21.0	97	
	ALGL3	29 444		25.76	28.0	38	
	ALGL4	39 513		27.09	35.0	11	
	BEPE1	9 769		19.86	11.5	115	
	BEPE2	16 856		25.49	17.5	246	
	BEPE3	31 744		27.99	26.0	92	
	BEPE4	31 880		30.51	31.0	12	
	FREX	11 187		13.72	9.5	30	
	PIAB	6 358		10.90	10.5	17	
	POTR1	16 714		25.27	17.0	61	
	POTR2	44 086		30.49	28.0	17	
	TICO1	7 422		5.91	7.0	17	
	TICO2	9 483		11.27	9.0	43	
TICO3	14 658		14.41	12.0	63		
TICO4	24 114		18.34	15.0	62		
TICO5	34 571		20.70	17.0	20		
BR01	FS	2 806 066	44 954	27.313	27.1	92	0.90
	PA	1 920 306	45 000	33.447	50.6	64	0.90
	CB	259 512	40 455	26.875	39.5	44	0.88
	QP	1 802 291	71 358	30.071	43.2	54	0.87

1) 空白代表无此项。

叶点云体素化过程中的薄片化和旋转化,体素的具体大小采用参数长(L)、宽(W)、高(H)表示;排列方式包括规则不旋转(N)和随机旋转(R)2种。对于阔叶树叶,仅改变体素的厚度即参数 H ,使其变薄;对于针叶林树叶则改变参数 W 和 H ,使其类似针状。在参数 L 、 W 、 H 后分别使用具体数值表示其大小,将 L 为10 cm、 W 为10 cm、 H 为5 cm、随机旋转的体素规则排列命名为L10W10H5N,以此类推,代

替点云所在位置以重构树木三维结构;若 L 、 W 、 H 的数值一致,则体素化用V表示,如V5R表示 L 、 W 、 H 均为5 cm且随机旋转的体素化。本研究的改进方法仅针对树叶,树干的表示方法统一使用基准数据或5 cm分辨率的规则立方体体素表达。本研究中的RAMI场景提供了显式的三角面元单木模型(OBJ格式),以此为基准数据,将其与各体素表示方法的示意图绘制如图3。

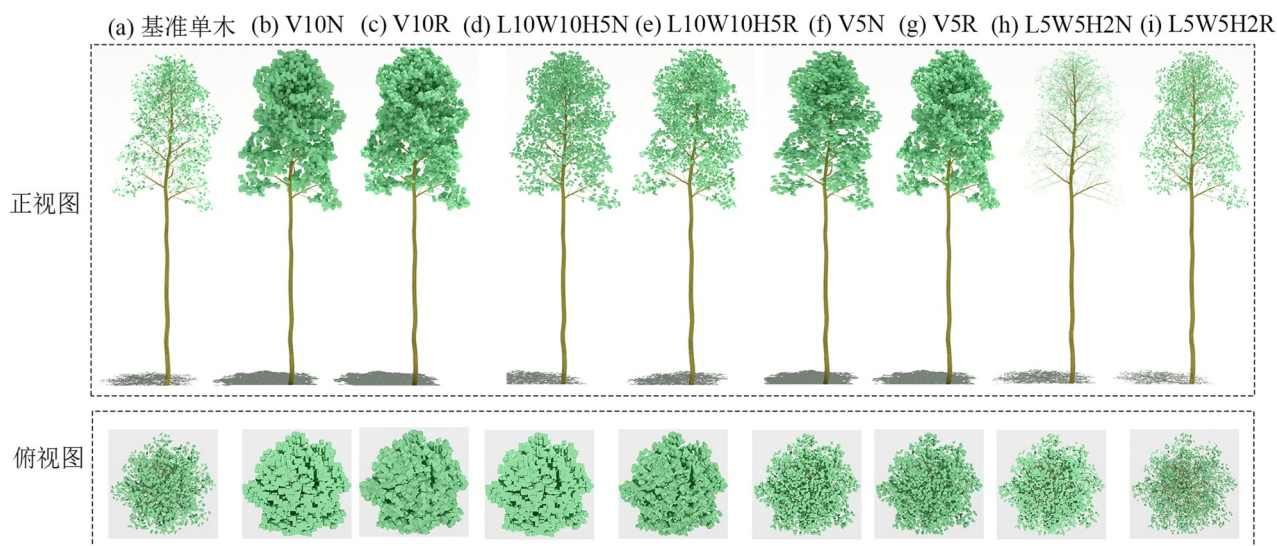


图3 TICO3基准树木模型与不同体素化树木模型的对比

Fig. 3 Comparison between the benchmark tree model and the different voxelized tree models of TICO3

1.3 基于传统立方体体素化的单木模拟和场景构建

传统的点云体素化方法将空间划分为排列规则的立方体单元,即体素。体素的边长定义为体素分辨率,当体素内至少包含1个点时使用实体的体素代替,稠密的点云数据转化为均匀的体素网格,从而形成简化的几何模型,有效减少高密度点云数据的存储和处理需求。VBRT(voxel-based radiative transfer)是一种基于传统立方体体素化的辐射传输模型,采用八叉树数据结构对高密度点云区域使用较小的体素,而在低密度点云区域使用较大的体素,可提高计算效率并减少内存需求。VBRT适用于密度较高的LiDAR点云数据(如TLS),其使用厘米尺度的高分辨率体素能够提供更加精确的场景模拟,可模拟太阳辐射传输、遥感影像和LiDAR扫描等过程。HELIOS++平台同样提供了立方体体素化点云数据的三维场景重建方法,将每个至少包含1个点的单位立方体视作1个非透明体素,借助KD树数据结构优化空间查询和射线追踪的效率

(Winiwarter et al., 2022)。为了将传统立方体体素化方法与本研究改进的方法进行对比,在实验中同时使用VBRT和HELIOS++对本研究场景中的TLS数据进行体素化建模,体素分辨率选择2、5和10 cm等。例如,HELIOS_V2和VBRT_V2分别表示使用HELIOS++和VBRT模型以2 cm分辨率进行体素化。

对RAMI和BR012个原始场景分别按25 m×25 m的范围构建了16个子地块(Milenkovic et al., 2017; White et al., 2017)。其中,RAMI场景的地面为虚拟平面;BR01场景的地面由真实ALS点云的地面点使用分箱法转为1 m分辨率的DEM(digital elevation model),并借助tin-terrain工具(<https://github.com/heremaps/tin-terrain>)将栅格化的地形数据转换为OBJ格式。此外,HELIOS++因内存限制无法处理数据量太大的TLS数据,而VBRT使用了八叉树结构对内存使用进行了优化。对RAMI场景,本研究对虚拟TLS数据的点密度进行了控制,产生的TLS点云可直接输入HELIOS++和VBRT进

行体素化。对 BR01 场景, 降采样后的点云被输入 HELIOS++ 和 VBRT 进行体素化, 以便和本文方法进行比较; 为探究降采样数据能否取得和非降采样数据相近的模拟结果, 本研究额外使用了内存效率较高的 VBRT 对未经降采样的 TLS 数据以 2 cm 的分辨率进行体素化。

1.4 方法验证

对于 RAMI 场景, 其原始三维单木模型组成的场景 (OBJ 格式) 作为基准场景模型, 输入 PBRT (physically based ray tracer) 和 HELIOS++ 模拟得到可见光影像、ALS 点云及波形数据作为基准数据。同时对原始三维单木模型的虚拟 TLS 数据使用本研究提出的改进体素化方法及传统的立方体体素化方法 (HELIOS++ 和 VBRT) 进行单木三维重构, 重建后的单木排列为全场景 (100 m × 100 m) 并使用对

应的方法模拟可见光影像、ALS 点云及波形数据; 将基于各种体素化方法的模拟结果与基准结果进行对比和评价 (图 4)。

与 RAMI 场景不同, BR01 场景是基于真实的 LiDAR 数据合成产生的, 缺乏 OBJ 格式的原始三维模型作为基准数据, 因此无法使用 PBRT 模拟基准的可见光影像, 只能对 ALS 点云及波形指标进行比较。首先, 将 BR01 场景中真实的单木 TLS 数据进行枝叶分类, 然后使用本研究提出的 HELIOS++ 和 VBRT 进行三维重构; 根据真实 ALS 点云使用 Li et al. (2012) 的单木分割方法得到单木位置, 选择重构之后的单木模型重组产生场景模型, 并使用 HELIOS++ 和 VBRT 对合成的森林场景模拟 ALS 点云和波形数据; 将模拟结果与真实数据进行对比和评价 (图 5)。

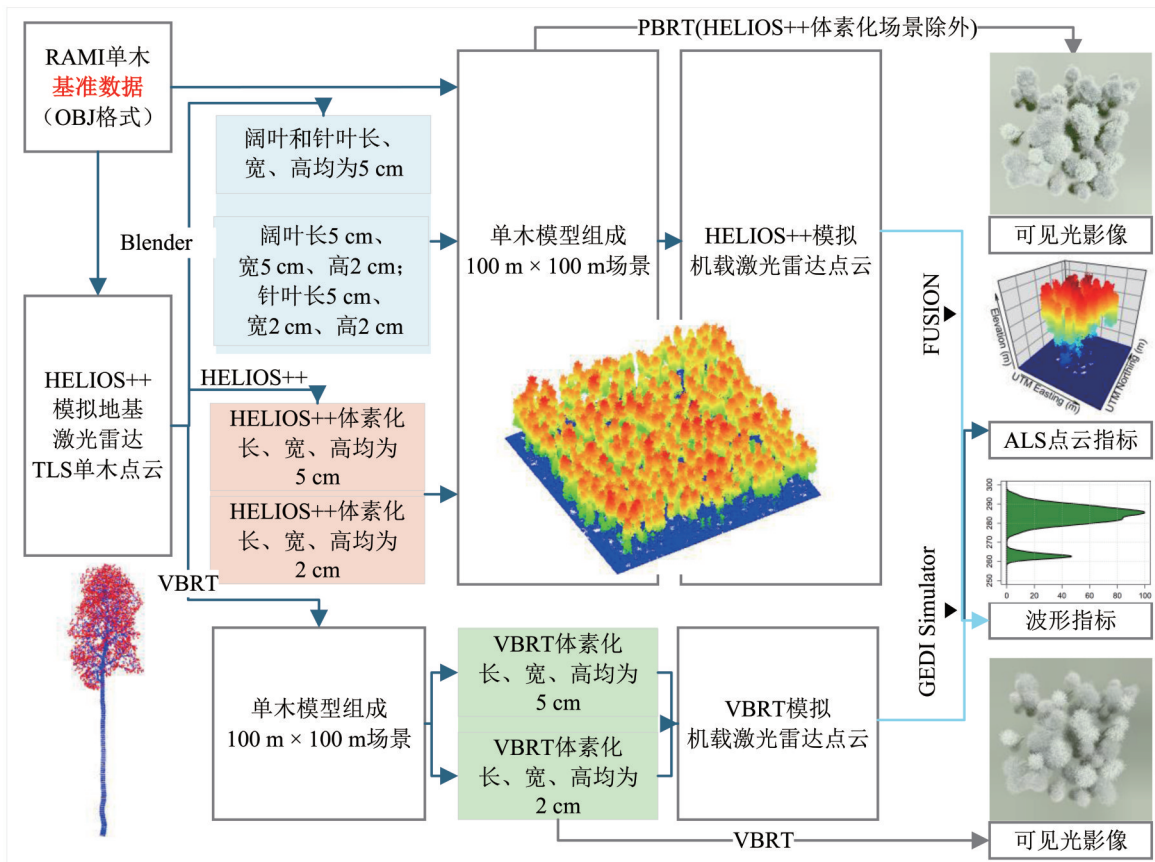


图 4 RAMI 场景体素化建模、模拟可见光影像及 ALS 的流程图

Fig. 4 Workflow of voxel-based modelling, simulation of visible imagery and ALS for RAMI scene

1.4.1 可见光图像的模拟与评价指标 PBRT 是由 Pharr et al. (2023) 开发的物理光线追踪渲染器, 适合多种几何形状类型场景的照片模拟; VBRT 是基于体素的辐射传输模型, 采用与 PBRT 相同的光线追踪算法, 适合基于高分辨率体素场景的照片模

拟 (Li et al., 2018)。因此, 本研究使用 PBRT 模型对基于三角面元的 RAMI 场景 (OBJ 格式) 渲染可见光影像作为基准图像; 同时使用 PBRT 和 VBRT 模型对其它体素化表征的场景进行渲染, 将模拟的图像与基准图像进行对比。场景内全部树木按照树种将

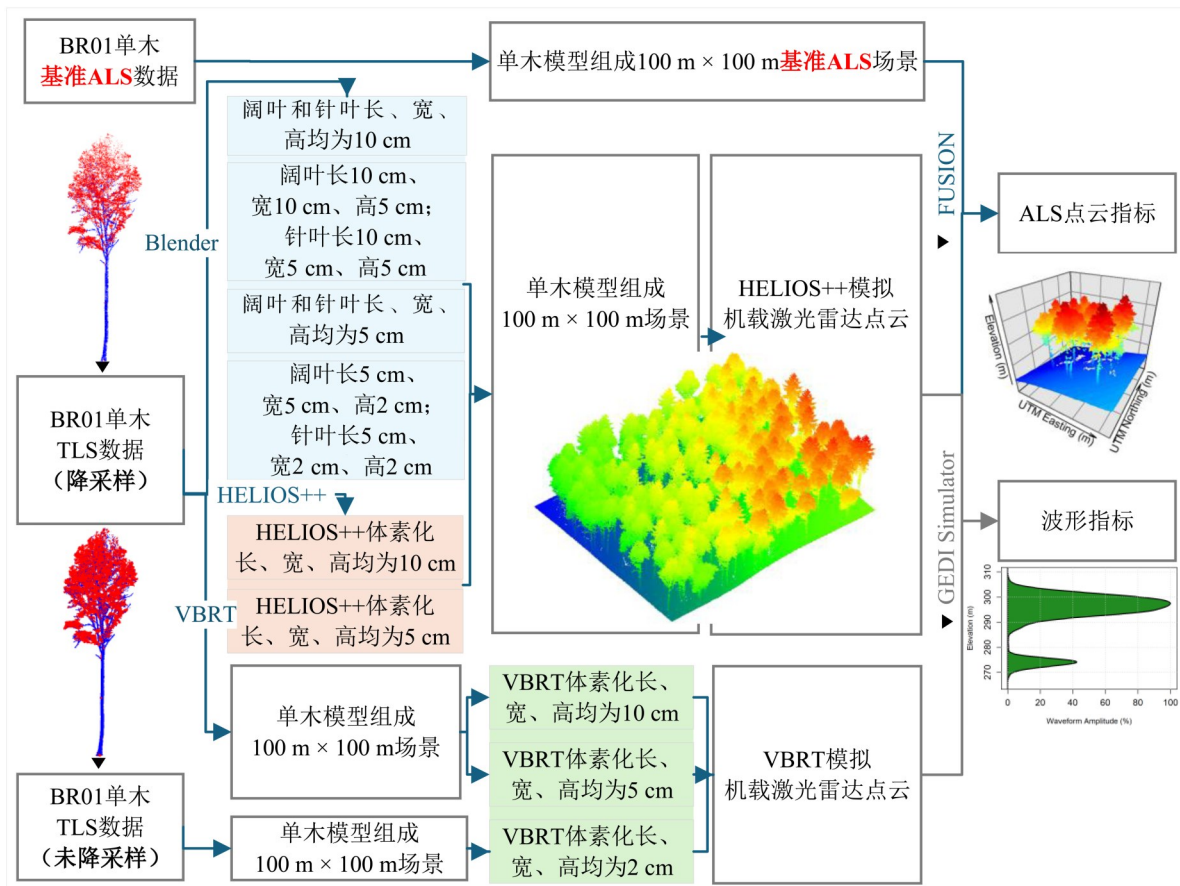


图5 BR01场景体素化建模及模拟ALS的流程

Fig. 5 Workflow of voxel-based modelling and simulations of ALS for BR01 scene

树叶和树干材质分类,各材质的光谱属性(包括反射率、透射率、吸收率)设置见增强出版:附表1。PBRT和VBRT的参数保持一致。入射光源(使用无限远光源模拟太阳辐射)的天顶角和方位角分别为 45° 和 135° ,光源强度为 $2.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,摄像机位置为每一场景中心位置上方 90 m ,视场角FOV(field of view)固定为 25° ,单像素光子采样数为64,图像像素为 512×512 。此外,BR01场景缺乏具有三角面元的基准场景,故未对该场景进行图像模拟;HELIOS++模型无图像模拟功能,故HELIOS++体素化的场景无法进行图像模拟。

为对不同表征方式下的模拟图像进行对比研究,使用Tonemapping函数将PBRT和VBRT模拟的可见光图像色调映射至同一区间范围 $0 \sim 255$,分别将红(R)、绿(G)、蓝(B)3个波段的直方图进行比较,并计算不同模型像素之间的皮尔逊相关系数(COR)和均方根误差(RMSE)。RMSE计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-\text{sim}})^2}{n}}$$

式中 n 为图像的总像素数, x_i 为基准模型对像素 i 的模拟值, $x_{i-\text{sim}}$ 为其它模型对像素 i 的模拟值。

1.4.2 ALS点云模拟与评价 本研究同时使用HELIOS++和VBRT,对上述薄片化旋转化和传统立方体体素化搭建的2个场景(共32个地块)进行ALS扫描模拟。为确保模拟结果和真实的ALS数据具有可比性,所有扫描参数、路线行进方式等均保持一致。每个场景共设计2条平行航线从相反方向进行扫描,航线间的距离为 175 m ,飞行高度为距离地面 650 m ;扫描平台移动速度为 51 m/s ,扫描角度为 $\pm 30^\circ$,脉冲频率为 100 kHz ,扫描频率为 225 Hz 。

本研究中,点云指标的计算采用专用于LiDAR数据处理的软件包FUSION 4.61 (<http://forsys.cfr.washington.edu/FUSION/fusionlatest.html>),对每个 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 的网格单元,提取ALS点云的冠层高度指标与垂直结构指标(Kissling et al., 2023)。选取平均高度(Elev mean)和不同回波百分比高度(Elev

P30、P50、P70、P90、P99)描述植被冠层高度;选取标准差(stddev)、变异系数(CV)、偏度(skewness)、峰度(kurtosis)、均值的绝对偏差(ADD)及剖面面积(Profile area)的垂直结构指标,表征单元内植被的垂直分布和变异性。对于具有基准数据的RAMI场景,使用FUSION的GridMetrics指令计算每个基准ALS点云与模拟ALS点云在各地块单元内的统计指标,并进一步计算相对误差进行比较。对于BR01场景,由于虚拟场景的树木与真实ALS点云的树木结构不一致、地面点不统一,真实ALS点云的地面点仅用于产生场景的DEM,不能直接与虚拟ALS点云相关联进行对比,故需提取各模拟方法ALS点云的地面点,并将其假设为真实的地面点云与基准ALS融合为1个点云数据,以此作为“基准点云”与其它方法进行比较。

1.4.3 星载LiDAR GEDI波形模拟与评价 GEDI(global ecosystem dynamics investigation)是NASA用于全球生态系统动态变化研究的星载激光雷达卫星(Dubayah et al., 2020)。该系统搭载于国际空间站,可在南、北纬 51° 之间区域进行全天候、大足迹(直径约25 m)全波形激光测距观测。为克服真实GEDI的地理偏移误差, Hancock et al.(2019)开发了GEDISimulator波形模拟器。该工具以ALS数据作为输入,模拟大足迹全波形LiDAR,生成类似GEDI的波形及相关指标。这些指标一方面能用于卫星发射前仪器性能评估,也可在大范围内表征植被参数及森林结构,帮助森林的保护监测(Liang et al., 2023; Wang et al., 2024)。此外,还可以利用机器学习算法,结合GEDI和光学影像等数据绘制区域内植被高度图像(吴贞江等, 2023; Ticehurst et al., 2024)、开发空间尺度上的森林结构模型(Martins et al., 2024)、进行森林生物量估算(Huettermann et al., 2022; 孟鸽等, 2024)等。

对RAMI和BR01场景共32个子地块使用GEDISimulator模拟波形数据,并使用gediMetric指令以25 m为间隔提取常用的波形指标,包括相对高度(rh, relative height)及随高度变化垂直叶剖面指数(LAI, leaf area index)。其中, rh为给定返回能量百分比对应的高度,如rh98表示98%波形能量所对应的高度,是冠层高度的良好指标(Lahssini et al., 2024);而rh100的结果通常比较嘈杂且不稳定,不宜表示冠层顶部高度(Qi et al., 2019)。本研究选用由高斯算法拟合的rhGauss30、rhGauss50、rhGauss70、

rhGauss90、rhGauss98 5个相对高度指标和地面高程指标gHeight进行评价(Hofton et al., 2000);以5 m为间隔计算的0~30 m范围的高斯拟合垂直叶剖面指标gLAI(冠层顶部到地面固定范围内LAI的表征值),可指示从顶部到地面冠层结构垂直投影的覆盖变化(如:gLAI25t30指25~30 m高度范围内对应的LAI)和树冠覆盖度(cover)指标。采用1.4.2相同的方法,计算出RAMI场景中各虚拟地块波形数据指标与基准数据场景对应的波形指标间的误差,以及BR01场景的全部13个模拟方法得到的波形指标与13个“基准数据”波形指标计算的相对误差。

2 结果与讨论

2.1 可见光图像相关度

通过RAMI基准场景经PBRT渲染得到的基准图像与各种体素化场景经VBRT渲染图像的对比可知(图6,以地块15为例),从视觉效果来看L5W5H2R的表示方法与三角面元的基准数据更具相似性。相对于传统立方体体素,薄片化的体素形式减轻了叶片的厚重感和颗粒感,叶片的旋转则减弱了规则排列叶片的尖锐感,在视觉上更具真实感。

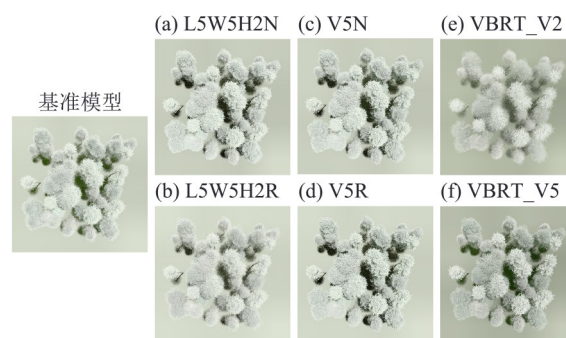


图6 RAMI场景可见光图像对比

Fig. 6 Comparison of visible-band rendered images in RAMI scene

图6对应地块渲染图像的红、绿、蓝3波段的频数分布图(图7,以地块15为例)显示,旋转化叶片分布图整体与基准数据分布图呈现出良好的匹配情况;非旋转的图像则呈现出“左移”变化,如V5N在像素值约200处出现尖端式的集中,V5R则集中在像素值约210处;L5W5H5N集中于像素值约200处,L5W5H5R则集中在像素值约210处。这可能是由于薄片化随机旋转的叶片使得叶片间的空隙增加,降低了规则排列体素对冠层的遮挡,故渲染图

像中的阴影减少而辐亮度值增大。进一步对全部 16 个地块各波段对应的像素值与基准场景影像对照, 计算相关系数和 RMSE(表 2), 所有随机旋转的场景如 L5W5N2R 和 V5R 均表现出了比未旋转的规则

排列方式更小的 RMSE, 特别是薄片旋转化后的体素表示方法 L5W5H2R 在相关系数和 RMSE 具有综合最优表现, 这与之前目视判断模拟效果的结论一致。

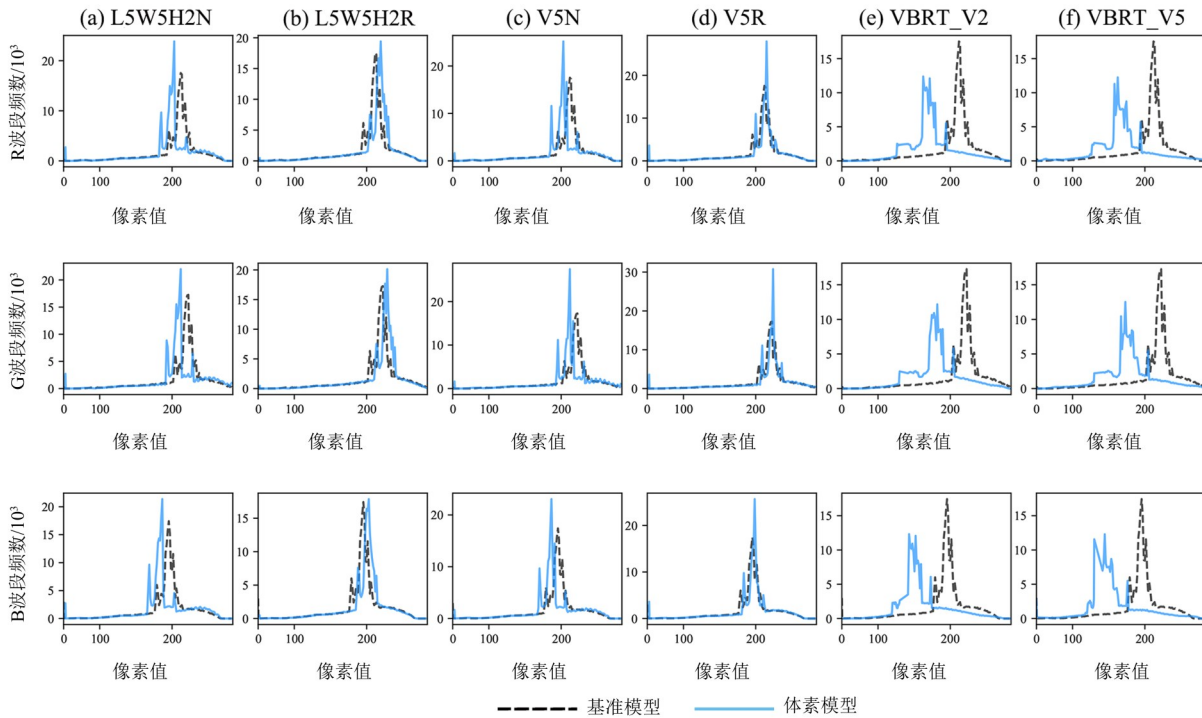


图 7 RAMI 场景可见光影像各波段频数分布曲线

Fig. 7 Frequency distribution curve for rendered images in RAMI scene

表 2 RAMI 基准场景与体素化场景模拟影像在红(R)、绿(G)、蓝(B)波段的相关系数及 RMSE

Table 2 Correlation coefficient and RMSE values between simulation images of RAMI scenes and voxelized scenes in the red, green and blue bands

体素化方法	R 波段		G 波段		B 波段	
	相关系数	RMSE	相关系数	RMSE	相关系数	RMSE
L5W5H2N	0.823 8	8.895 5	0.817 3	8.968 0	0.824 0	8.877 0
L5W5H2R	0.832 6	7.642 5	0.823 3	7.704 5	0.830 7	7.653 9
V5N	0.824 1	8.232 6	0.819 8	8.326 0	0.820 5	8.239 2
V5R	0.814 7	7.105 1	0.811 4	7.162 3	0.809 3	7.126 4
VBRT_V2	0.622 0	10.492 8	0.650 2	10.492 4	0.624 1	10.634 0
VBRT_V5	0.747 9	10.661 2	0.753 8	10.644 9	0.752 9	10.661 1

2.2 ALS 点云高度分布

RAMI 场景中各种体素化方法产生的模拟 ALS 点云中的地面点和非地面点高度分布大致接近 (VBRT 方法的地面点分布图除外), 其中与基准点云高度分布频率图的波形更为接近的是以 5 cm 为基础边长的 L5W5H2N 和 V5N; 而 VBRT 模型由于构建八叉树体素化模型时, 地平面也以八叉树体素

的形式表达, 当使用 2 和 5 cm 分辨率体素时, 其产生的地平面高度值也分别接近 2 和 5 cm, 从而高度分布图在 2 和 5 cm 形成峰值, 与其他方法的地面点高度峰值产生较大差别 (图 8a~b)。与 RAMI 场景不同, BR01 场景由真实的单木 ALS 数据组合形成, 故缺乏可对照的真实地面点。相比于其他方法, L5W5H2R 方法累积了最多的地面点数据, 这是由

于此时面片较薄且随机旋转导致树叶间空隙更大, 更多的辐射得以传输到达地面(图 8c)。根据增强出版:附表 2 所示, 各体素方法模拟产生的点云、基准点云与图 8 一致, 具有相似的平均高度和标准差, L5W5H2N 和 V5N 具有较高的相关系数和较低的

RMSE。总体而言, 新的体素化方法具有更高的模拟精度, 但其计算速度也比传统的体素化方法慢; 在传统的体素化方法中, VBRT 和 HELIOS++ 具有相似的精度, 但前者综合了多线程与多进程的并行计算故运行速度更快。

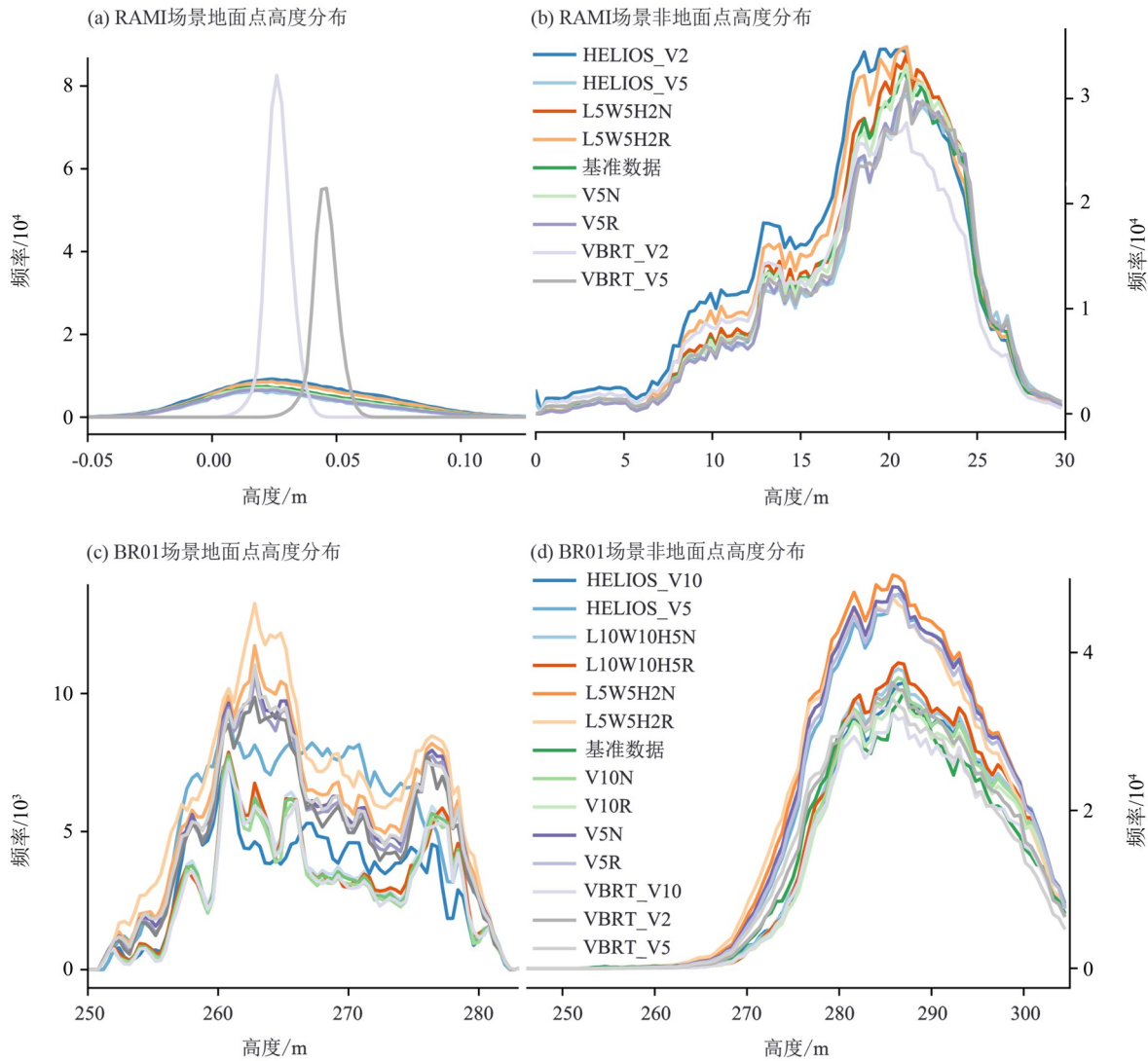


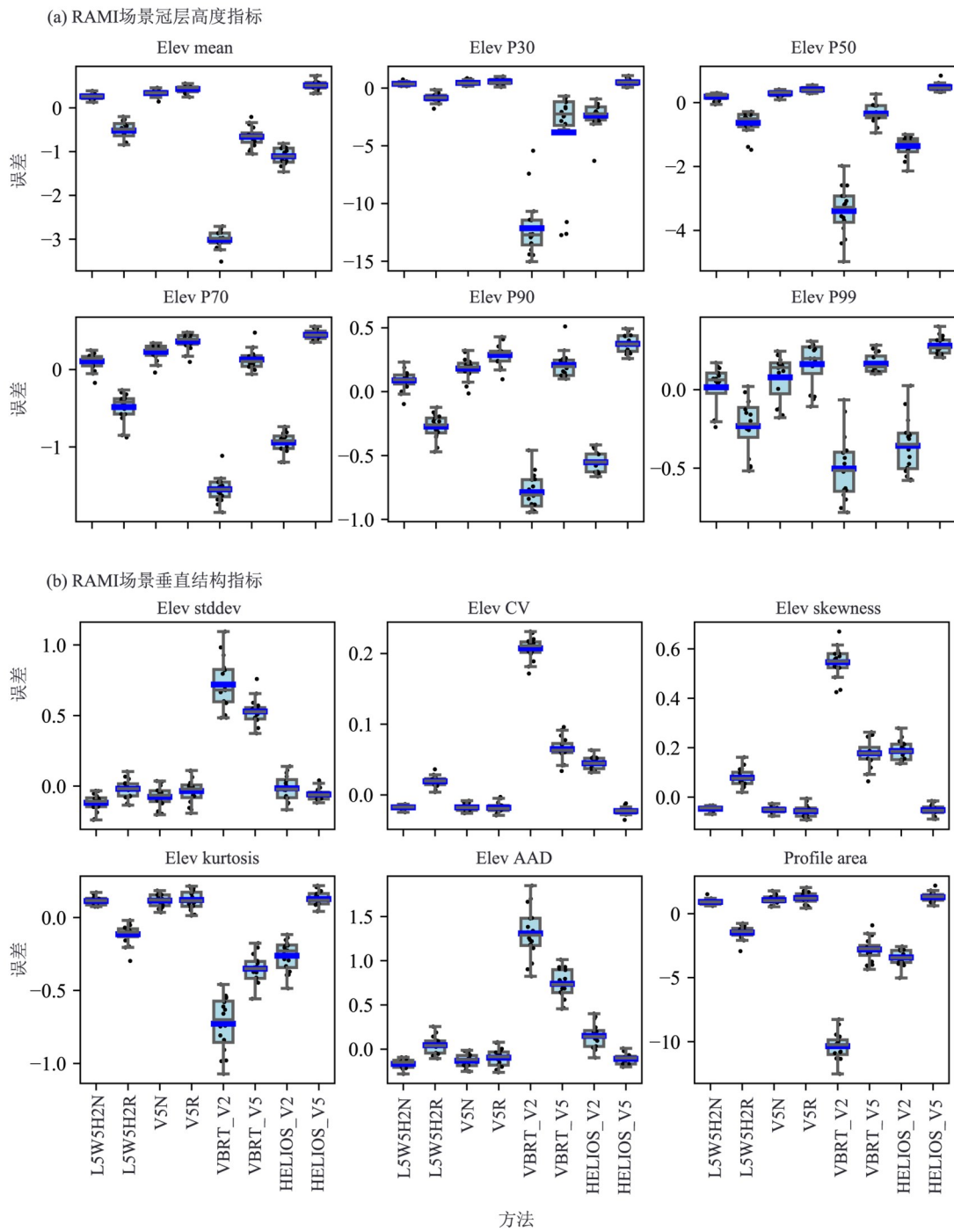
图 8 RAMI 及 BR01 场景中地面点及非地面点的高度值分布

Fig. 8 Height distributions of ground and non-ground points of simulated ALS in RAMI and BR01 scenes

2.3 ALS 点云指标与波形指标

图 9 和图 10 分别为 RAMI 场景中 ALS 指标及 GEDI 波形指标的误差箱型图, 其中蓝色短线表示每组模拟结果的平均误差值。多数情况下, 规则排列的体素比随机旋转体素的高度指标 (Elev P 和 rhGauss) 表现出和基准值更相近且更稳定的结果。其中 L5W5H2N, 即薄片化为 2 cm 且不随机旋转的体素呈现出最佳模拟效果, 误差几乎稳定在 0.5 之内; 在波形高度指标中, gHeight 呈现出较好的稳定

性, 而 rhGauss 30、rhGauss 50 整体呈现出更大的误差范围, 这主要因为模拟器在波形能量较弱区域对能量扰动的敏感性, Elev 50 以下指标通常不纳入各模型的建立中 (Duncanson et al., 2022)。主要用于反演地表树木高度的 rhGauss 98 在 L5W5H2N 方法中获得最佳模拟结果, 相对误差平均值稳定在 -0.2~0.2。对于垂直结构指标, 薄片化旋转体素误差更小且稳定在 0 左右, 优于立方体体素化; 在叶剖面指标中, 薄片化旋转体素仍然体现更低的误差, 但



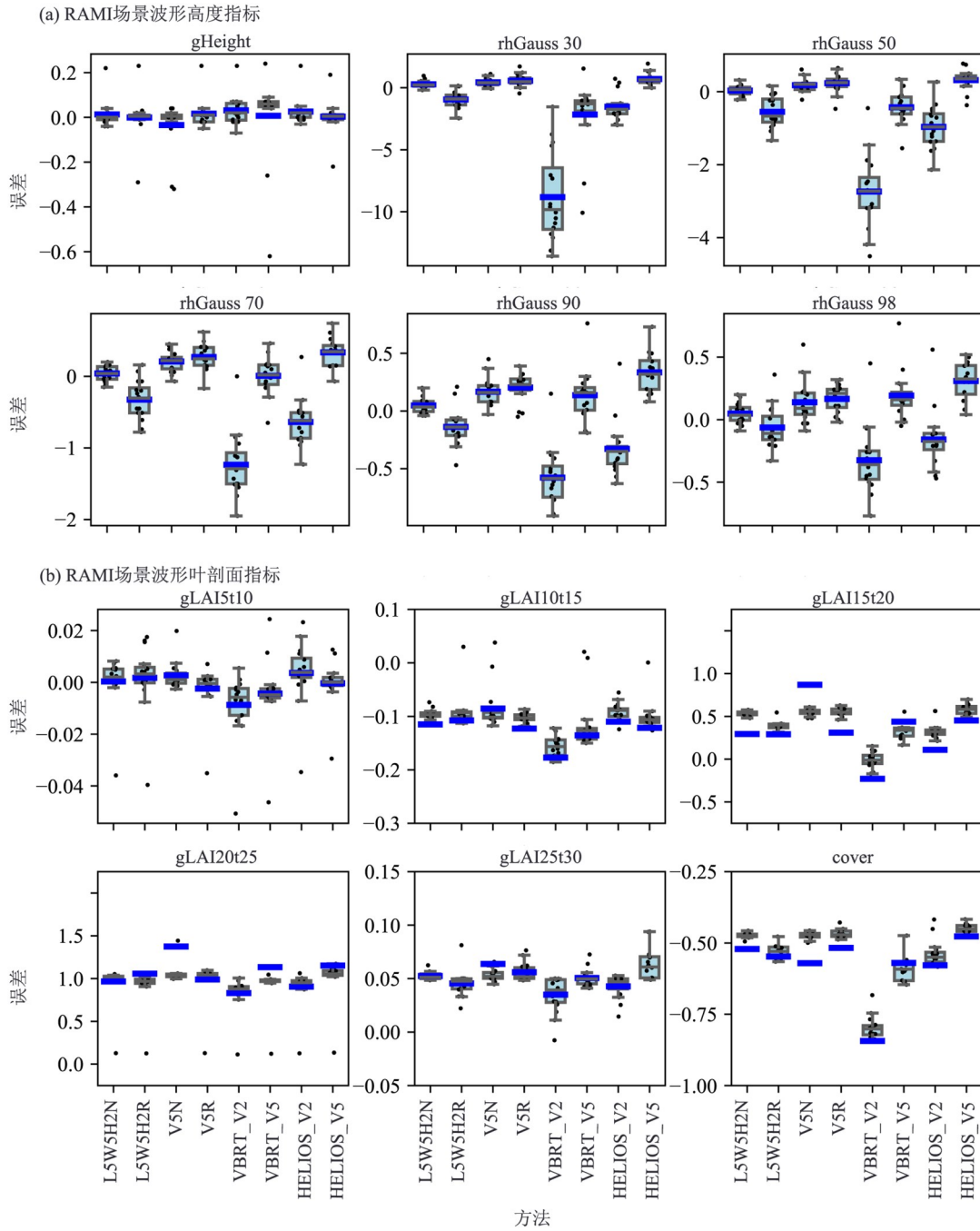
(a)的横坐标标题与(b)相同,蓝色短线为均值线。

图9 RAMI 场景中 ALS 指标对应箱型图

Fig. 9 Box plot of ALS indicator in the RAMI scene

各种方法在各项指标中的精度差距较小。从 VBRT 和 HELIOS++ 2 种平台的立方体体素化结果的比较来看,使用较低体素分辨率(5 cm)的模拟效果明显优于使用更高体素分辨率(2 cm);这可能因为点云密度不够大,故使用更高的体素分辨率反而效果变差(Li et al.,2018;Li et al.,2024)。场景 BR01 的冠层高度

指标中,以 10 cm 为基础边长的 6 类方法相对于基准数据整体偏高(图 11a),而以 5 cm 为基础边长的方法整体估算值偏低。随机旋转体素的方法并未显著优于规则排列体素。对于垂直结构,以 5 cm 为基础边长的方法产生的误差总体上比 10 cm 的方法更低,其中 L5W5H2R、VBRT_V2 和 VBRT_V5 呈现出



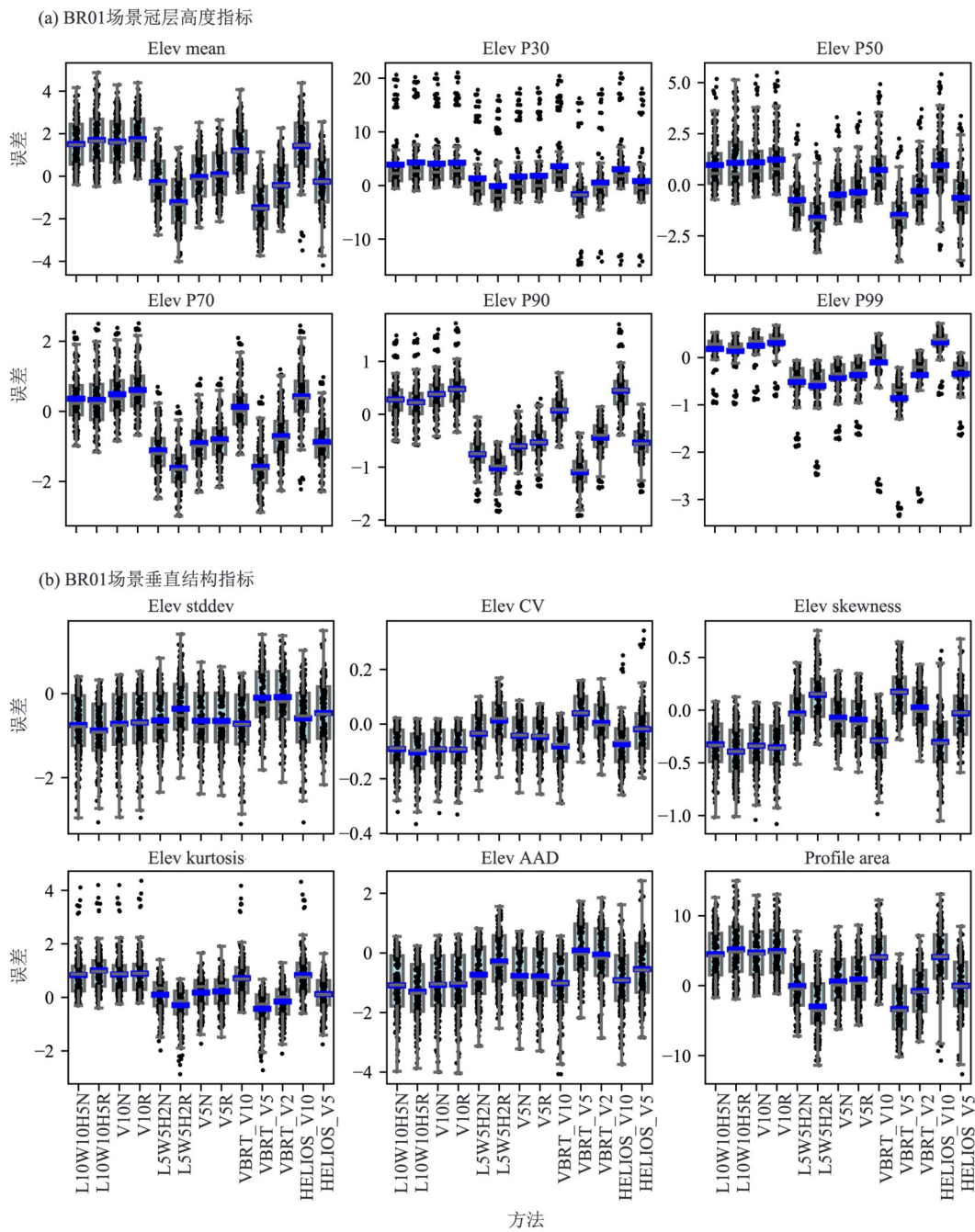
(a)的横坐标标题与(b)相同,蓝色短线为均值线。

图 10 RAMI 场景中 GEDI 波形指标对应箱型图

Fig. 10 Box plot of GEDI waveform indicator in the RAMI scene

最低误差(图 11b)。模拟的 GEDI 波形高度中, gHeight、rh50 及以上指标的误差更稳定, 其中 L5W5H2N 和 L5W5H2R 表现出较好的模拟效果(图 12a)。在叶剖面指数中(图 12b), 体素是否旋转产生的差异较小, 但体素大小对不同高度的 LAI 估算存在影响。在较低高度(如 gLAI5t10)下, 10 cm 体素方法的误差更低; 但随着高度增加(如 gLAI52t30), 5 cm 体素方法误差更低。对于 cover 指标, 各方法差异不显

著, 但 5 cm 体素方法表现出略优的精度。其原因可能是冠层的遮挡导致接近地面的 ALS 点云密度更低, 故适合更粗的体素分辨率; 而越接近冠层顶部点云密度越大, 故适合更高的体素分辨率。总体来看, 基于降采样 TLS 点云数据的 L5W5H2N 和 L5W5H2R 方法在多个指标上与使用非降采样 TLS 数据模拟的 VBRT_V2 方法具有接近甚至更优的模拟精度; 这可能是由于点云密度与体素尺寸相匹



(a)的横坐标标题与(b)相同,蓝色短线为均值线。

图 11 BR01场景中ALS对应箱型图

Fig. 11 Box plot of ALS indicator in the BR01 scene

配,一定程度上证实了降采样后点云在合适的体素化表示方法下可以取得理想的模拟效果。另外,与基于三角面元的基准场景(或真实场景)相比,各种体素化方法重构的森林模型仍存在不同程度的叶片面积高估问题。在不同的场景位置上会存在不同程度的遮挡效应,故模拟点云中点的数量和位置与基准点云并非一一对应,这导致在对每个地块计算

点云指标和波形指标时会出现异常值,如图9~12中的 Elev P30、rhGauss 98、gLAI20t25。

3 结 论

对LiDAR点云数据进行体素化是森林三维重建的常用方法。本研究对比了薄片化旋转化体素与传统立方体素在重建树木结构方面的精度。总体而

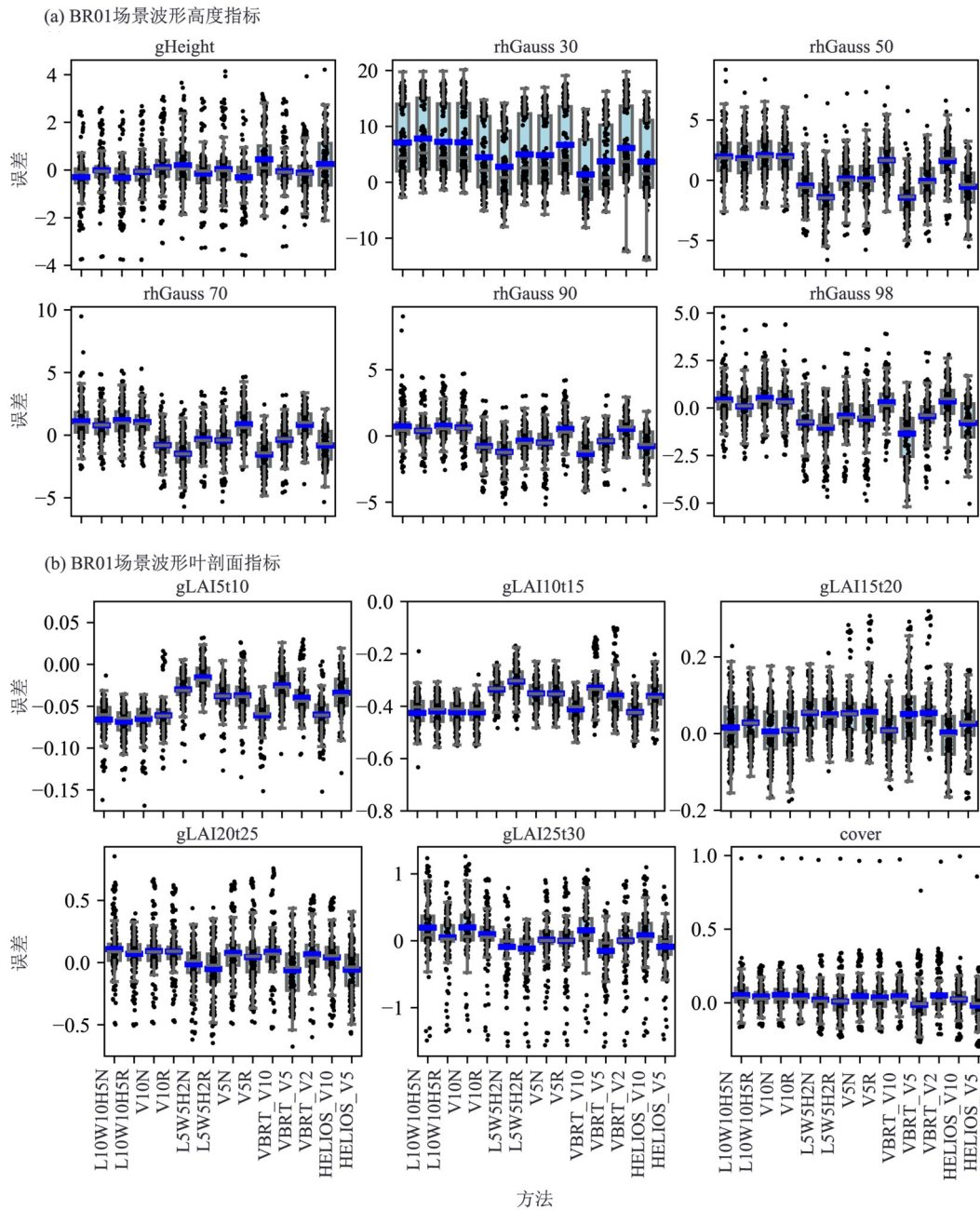


图 12 BR01 场景中 GEDI 波形指标对应箱型图

Fig. 12 Box plot of GEDI waveform indicator in the BR01 scene

言,在森林三维重建中薄片化旋转体素比传统的立方体体素效果更优,其对点云密度的要求也比传统的体素方法低。薄片化有助于提升点云指标精度,旋转化则显著增强了图像模拟的真实感及准确性。在实际应用中,薄片化体素的长、宽、高等参数可借助目视效果并考虑 LiDAR 点云密度、树叶形态特征进行调整。该方法适用基于 TLS 点云数据的森林三维场景重构,在森林参数获取、辐射传输模拟及生物量碳汇模型建立等方面具有良好的应用潜力。

本研究的 2 个场景数据分别具有基准场景或真实 ALS 点云可对照,在一定程度上相互补充证明了本研究方法的有效性,但两者作为人工合成的虚拟森林在方法有效性验证上仍存在一定的局限性。若可同时获取代表性研究区域森林地块的实地调查数据、TLS 数据、ALS 数据及无人机影像,将对该方法的有效性做进一步论证;但这对数据的详细程度和获取成本均提出了更高要求,可在未来研究工作做进一步探索。

参考文献:

- 卞尊健, 漆建波, 吴胜标, 等, 2021. 光学遥感三维计算机模拟模型的研究进展与应用[J]. 遥感学报, 25(2): 559-576.
- 曹伟, 陈动, 史玉峰, 等, 2021. 激光雷达点云树木建模研究进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 46(2): 203-220.
- 联合国粮农组织, 2021. 2020年全球森林资源评估: 主报告[M]. 罗马: 粮农组织: 1-164.
- 联合国粮农组织, 2024. 2024年世界森林状况: 促进林业部门创新, 迈向可持续未来[M]. 罗马: 粮农组织: 1-19.
- 孟鸽, 赵旦, 许聪, 等, 2024. 联合ICESat-2和GEDI星载激光雷达数据的森林地上生物量估算[J]. 遥感学报, 28(6): 1632-1647.
- 万杰, 汪长城, 朱建军, 等, 2024. 层析SAR三维成像方法与森林参数反演研究进展[J]. 遥感学报, 28(3): 576-590.
- 王嘉童, 牛春跃, 胡天宇, 等, 2022. 三维辐射传输模型在森林生态系统研究中的应用与展望[J]. 植物生态学报, 46(10): 1200-1218.
- 吴贞江, 张佳华, 2023. 基于激光雷达卫星(GEDI)的广东省森林冠层高度和生物量估算[J]. 测绘通报, (12): 102-105.
- BIENERT A, HESS C, MAAS H G, et al, 2014. A voxel-based technique to estimate the volume of trees from terrestrial laser scanner data [J]. ISPRS Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci, XL5: 101-106.
- BROCKERHOFF E G, BARBARO L, CASTAGNEYROL B, et al, 2017. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services[J]. Biodivers Conserv, 26(13): 3005-3035.
- BRODUN LAGUED, 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology [J]. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 68: 121-134.
- CHEN J M, LEBLANC S G, 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 35(5): 1316-1337.
- CÔTÉ J F, FOURNIER R A, FRAZER G W, et al, 2012. A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure [J]. Agric For Meteorol, 166: 72-85.
- CÔTÉ J F, FOURNIER R A, LUTHER J E, et al, 2018. Fine-scale three-dimensional modeling of boreal forest plots to improve forest characterization with remote sensing [J]. Remote Sens Environ, 219: 99-114.
- DUBAYAH R, BLAIR J B, GOETZ S, et al, 2020. The global ecosystem dynamics investigation: High-resolution laser ranging of the earth's forests and topography[J]. Sci Remote Sens, 1: 100002.
- DUNCANSON L, KELLNER J R, ARMSTON J, et al, 2022. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission[J]. Remote Sens Environ, 270: 112845.
- ESMORÍS A M, YERMO M, WEISER H, et al, 2022. Virtual LiDAR simulation as a high performance computing challenge: Toward HPC HELIOS++ [J]. IEEE Access, 10: 105052-105073.
- HANCOCK S, ARMSTON J, HOFTON M, et al, 2019. The GEDI simulator: A large-footprint waveform lidar simulator for calibration and validation of spaceborne missions [J]. Earth Space Sci, 6(2): 294-310.
- HOFTON M A, MINSTER J B, BLAIR J B, 2000. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 38(4): 1989-1996.
- HUETTERMANN S, JONES S, SOTO-BERELOV M, et al, 2022. Intercomparison of real and simulated GEDI observations across sclerophyll forests [J]. Remote Sens, 14(9): 2096.
- KISSLING W D, SHI Y, 2023. Which metrics derived from airborne laser scanning are essential to measure the vertical profile of ecosystems? [J]. Divers Distrib, 29(10): 1315-1320.
- LAHSSINI K, BAGHDADI N, Le MAIRE G, et al, 2024. Use of GEDI signal and environmental parameters to improve canopy height estimation over tropical forest ecosystems in Mayotte Island [J]. Can J Remote Sens, 50(1): 2351004.
- LI W, GUO Q, JAKUBOWSKI M K, et al, 2012. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud [J]. Photogramm Eng Remote Sensing, 78(1): 75-84.
- LI W, GUO Q, TAO S, et al, 2018. VBRT: A novel voxel-based radiative transfer model for heterogeneous three-dimensional forest scenes [J]. Remote Sens Environ, 206: 318-335.
- LI W, HU X, SU Y, et al, 2024. A new method for voxel-based modelling of three-dimensional forest scenes with integration of terrestrial and airborne LiDAR data [J]. Meth Ecol Evol, 15(3): 569-582.
- LIANG M, GONZÁLEZ-ROGLICH M, ROEHRDANZ P, et al, 2023. Assessing protected area's carbon stocks and ecological structure at regional-scale using GEDI lidar [J]. Glob Environ Change, 78: 102621.
- LIU C, CALDERS K, ORIGO N, et al, 2023. Reconstructing the digital twin of forests from a 3D library: Quantifying trade-offs for radiative transfer modeling [J]. Remote Sens Environ, 298: 113832.
- LUO Y, HUANG H, ROQUES A, 2023. Early monitoring of

- forest wood-boring pests with remote sensing [J]. *Annu Rev Entomol*, 68: 277–298.
- MARTINS F C, GODINHO S, GUIOMAR N, et al, 2024. Vegetation canopy height shapes bats' occupancy: A remote sensing approach [J]. *GISci Remote Sens*, 61(1): 2374150.
- MILENKOVIĆ M, SCHNELL S, HOLMGREN J, et al, 2017. Influence of footprint size and geolocation error on the precision of forest biomass estimates from space-borne waveform LiDAR [J]. *Remote Sens Environ*, 200: 74–88.
- MOUDRÝ V, CORD A F, GÁBOR L, et al, 2023. Vegetation structure derived from airborne laser scanning to assess species distribution and habitat suitability: The way forward [J]. *Divers Distrib*, 29(1): 39–50.
- O'SULLIVAN H, RAUMONEN P, KAITANIEMI P, et al, 2021. Integrating terrestrial laser scanning with functional-structural plant models to investigate ecological and evolutionary processes of forest communities [J]. *Ann Bot*, 128(6): 663–684.
- PHARR M, JAKOB W, HUMPHREYS G, 2023. Physically based rendering: from theory to implementation [M]. Fourth Edition Amsterdam: Elsevier.
- PINTY B, 2001. Radiation transfer model intercomparison (RAMI) exercise [J]. *J Geophys Res Atmos*, 106(D11): 11937–11956.
- QI W, SAARELA S, ARMSTON J, et al, 2019. Forest biomass estimation over three distinct forest types using TanDEM-X InSAR data and simulated GEDI lidar data [J]. *Remote Sens Environ*, 232: 111283.
- SCHÄFER J, WEISER H, WINIWARTER L, et al, 2023. Generating synthetic laser scanning data of forests by combining forest inventory information, a tree point cloud database and an open-source laser scanning simulator [J]. *Forestry (Lond)*, 96(5): 653–671.
- SCHNEIDER F D, LEITERER R, MORSDORF F, et al, 2014. Simulating imaging spectrometer data: 3D forest modeling based on LiDAR and *in situ* data [J]. *Remote Sens Environ*, 152: 235–250.
- TAN S, ZHANG Y, QI J, et al, 2024. Exploring the potential of GEDI in characterizing tree height composition based on advanced radiative transfer model simulations [J]. *J Remote Sens*, 4: 132.
- TICEHURST C, NEWNHAM G, 2024. Producing annual Australia-wide vegetation height images from GEDI and Landsat data [J]. *Int J Remote Sens*, 45(18): 6445–6469.
- TORRESANI M, ROCCHINI D, ALBERTI A, et al, 2023. LiDAR GEDI derived tree canopy height heterogeneity reveals patterns of biodiversity in forest ecosystems [J]. *Ecol Inform*, 76: 102082.
- WANG Z, LIU J, SHENG Y, et al, 2024. Intercomparison of the DART model and GEDI simulator for simulating GEDI waveforms in forests [J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 134: 104148.
- WEISER H, SCHÄFER J, WINIWARTER L, et al, 2022a. Terrestrial, UAV-borne, and airborne laser scanning point clouds of central European forest plots, Germany, with extracted individual trees and manual forest inventory measurements [DB/OL]. (2022-03-31) [2025-02-12]. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.942856>.
- WEISER H, SCHÄFER J, WINIWARTER L, et al, 2022b. Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests [J]. *Earth Syst Sci Data*, 14(7): 2989–3012.
- WEISER H, WINIWARTER L, ANDERS K, et al, 2021. Opaque voxel-based tree models for virtual laser scanning in forestry applications [J]. *Remote Sens Environ*, 265: 112641.
- WHITE J C, TOMPALSKI P, VASTARANTA M, et al, 2017. A model development and application guide for generating an enhanced forest inventory using airborne laser scanning data and an area-based approach [R]. Victoria: Natural Resources Canada: 1–38.
- WIDLOWSKI J L, CÔTÉ J F, BÉLAND M, 2014. Abstract tree crowns in 3D radiative transfer models: Impact on simulated open-canopy reflectances [J]. *Remote Sens Environ*, 142: 155–175.
- WIDLOWSKI J L, MIO C, DISNEY M, et al, 2015. The fourth phase of the radiative transfer model intercomparison (RAMI) exercise: Actual canopy scenarios and conformity testing [J]. *Remote Sens Environ*, 169: 418–437.
- WINIWARTER L, ESMORÍS PENA A M, WEISER H, et al, 2022. Virtual laser scanning with HELIOS++: A novel take on ray tracing-based simulation of topographic full-waveform 3D laser scanning [J]. *Remote Sens Environ*, 269: 112772.
- XIE D, WANG X, QI J, et al, 2018. Reconstruction of single tree with leaves based on terrestrial LiDAR point cloud data [J]. *Remote Sens*, 10(5): 686.