

基于三维点云测量个体树木疏透度的方法研究

魏云琦¹, 王 旻¹, 李加忠², 牛兰永^{3*}

1. 北京林业大学园林学院, 北京 100083

2. 中国城市建设研究院有限公司建筑三院, 北京 100000

3. 山东农业大学艺术学院, 山东 泰安 271018

摘 要: 树木疏透度表征树木孔隙特征, 研究其测量方法对于树木热舒适调节研究具有重要意义。传统树木疏透度测量方法较为烦琐, 受限于摄影图像的获取难度而难以应用于单棵树木水平面疏透度测量, 且测量精度易受自然光线影响。本文借助三维点云技术探索高效提取树木个体疏透度参数的技术流程。在辨析疏透度相近概念并明确本文研究对象之后, 随机挑选5棵常用园林绿化树木, 分别采集其点云数据和摄影图像。借助二维分箱思想和点云边界提取方法统计树木点云正投影平面剪影孔隙区域和非孔隙区域网格数量, 计算基于点云的树木疏透度, 并借助树木摄影图像按照传统方式计算树木疏透度作为对比参照, 对点云方法进行误差检验和准确性检验, 验证方法有效性。经验证, 点云方法测量的疏透度结果与传统方法测量结果高度相关且接近1:1的关系, 本文提出的基于三维点云测量树木疏透度的方法具有较高的准确性, 且可以成功应用于树木水平面疏透度测量。研究结果可以代替传统方法实现树木个体疏透度参数的高效提取, 并成功弥补了传统方法难以测量树冠水平疏透度的问题, 为精细化树木遮荫效益和热舒适调节效益评估实践奠定基础。

关键词: 树木疏透度; 三维点云技术; 热舒适评估; 二维分箱

中图法分类号: S731.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)05-0797-12

Research on a Method for Measuring Individual Tree Optical Porosity Based on Three-dimensional Point Cloud

WEI Yun-qi¹, WANG Yang¹, LI Jia-zhong², NIU Lan-yong^{3*}

1. College of Landscape Architecture/Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Third Institute of Architecture/China Urban Construction Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100000, China

3. College of Art/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: Tree optical porosity is characterized by the pore structure of trees, and studying its measurement methods is crucial for research on tree thermal comfort regulation. Traditional tree optical porosity measurement methods are cumbersome, constrained by the difficulty of acquiring photographic images, making them impractical for measuring horizontal porosity of individual trees. Moreover, measurement accuracy is easily affected by natural light. This paper employs 3D point cloud technology to explore an efficient workflow for extracting individual tree canopy openness parameters. After distinguishing the similar concepts of tree optical porosity and clarifying the research objects of this paper, five commonly used garden trees in urban greening in the north and south are randomly selected, and their point cloud data and photographic images are collected respectively. By means of the 2D-binning concept and point cloud boundary extraction method, the number of grids in the pore area and non-pore area of the orthographic projection plane silhouette of tree point clouds is counted. The tree porosity based on the point cloud is calculated, and it is compared with the traditional method using tree photographic images as a reference. Then, error tests and accuracy tests are conducted on the point cloud method to validate its effectiveness. Verification demonstrates that the canopy optical porosity results measured by the point cloud method show a high correlation with those from the traditional method, with a close 1 : 1 relationship. The proposed 3D point cloud-based method for measuring tree canopy openness exhibits high accuracy and can be successfully applied to horizontal canopy openness measurements. The research results can replace traditional methods for the efficient extraction of individual tree canopy openness parameters, successfully addressing the limitation of conventional approaches in measuring horizontal canopy openness. This establishes a practical foundation for refining assessments of tree shade benefits and thermal comfort regulation.

Keywords: Tree optical porosity; three-dimensional point cloud technique; thermal comfort evaluation; 2D-binning

收稿日期: 2025-10-24

修回日期: 2026-09-09

第1作者简介: 魏云琦(1996-), 女, 博士研究生, 研究方向: 数字景观, 植物景观与微气候环境。E-mail: weiyunqi8023@bjfu.edu.cn

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail: 13953801862@163.com

充分发挥树木的热舒适调节效应是调节地表温度、缓解城市热岛效应的重要策略。树木冠层非孔隙区域对太阳辐射的遮荫作用以及孔隙区域对风流动的空气动力学影响是树木发挥热舒适调节作用的关键途径^[1,2]。树冠顶平面通过反射太阳辐射,并利用枝叶间的孔隙改变日光入射角度,在地面形成遮荫区域,从而降低树下平均辐射温度^[3]。同时,树冠迎风面密集枝叶所形成的孔隙会产生阻力,导致风速降低和冠层湍流增强;穿过孔隙的风流速度亦会因孔隙的形状、密度和体积而发生改变^[4]。树木垂直面孔隙和水平面孔隙分别是调节其防风和遮荫效果的重要结构特征,树木垂直面疏透度和水平面疏透度都是影响树木热舒适效果的关键因素。研究树木在两个平面疏透度的测量方法对于深入理解和优化树木的热舒适调节功能具有重要的理论与实践意义。

个体树木疏透度测量方法的复杂性,已成为长期制约其在热舒适相关研究中的关键原因。虽然群体树木疏透度可以借助冠层分析仪、鱼镜头等设备快速获取,但无法代替个体树木疏透度这一参数在精细化评估各树木产生的差异性遮荫和通风效果方面的重要应用价值。目前常用的疏透度测量方法依赖于图像处理软件,如 Photoshop^[5]、Image-Pro Plus^[6]、ENVI^[7]和 CIAS^[8]等,首先需将树木图像转换为灰度模式,并调整为高对比度的黑白剪影,再通过分析灰度差异分割枝叶和孔隙区域,统计像素占比以计算疏透度。这一方法虽已被广泛验证,但若逐一计算个体树木疏透度,操作烦琐。因此,亟需在传统方法基础上,探索更为高效的个体树木疏透度提取技术。

现有少量个体树木疏透度测量技术相关研究主要依托树木摄影图像,借助图像处理算法^[9-11]测量垂直面疏透度,鲜见水平面疏透度相关研究,这与单体树冠水平面完整摄影图像在现实中的难获得性相关^[12],且已成为树木遮荫效果模拟评估的一大瓶颈。树木水平面疏透度是树木遮荫效果模拟评估的重要参数,此类研究需利用 Envi-met 等软件构建表面无孔隙的树木数字模型^[13,14]开展微气候模拟分析。从严谨角度而言,需引入各单体树冠水平面疏透度这一参数作为模型表面材质参数,以保证遮荫效果评估的模拟精度,但由于该参数的获取过程相对烦琐,实

际应用该参数的研究相对较少^[15],制约了热舒适精细化评估的未来发展。尽管苏宏霖^[16]等人通过高精度还原的树木枝叶孔隙三维模型以及光线穿透模型冠层孔隙的实时追踪,规避了疏透度参数的使用,实现了三维场景的精细化树荫模拟与量化,但该方法操作较为复杂,有必要在常用无孔隙树木数字模型中推广应用水平面疏透度参数。此外,现有高效测量单棵树木垂直面疏透度的方法需借助树木正立面实拍照片,易受自然环境因素影响导致孔隙结构部分图像灰度差异不清晰,造成一定测量误差,需要摆脱摄影图像对个体树木疏透度测量的限制,探索高效测量单棵树木水平面和垂直面疏透度参数的新技术。

近年来,三维点云技术在其广泛应用中屡次展现高于摄影图像的可视性、高效性和准确性^[17],但借助点云技术计算树木疏透度的研究少之又少。鉴于此,本文在传统基于图像的疏透度测量方法的基础上,借助三维点云技术探索一种高效测量单株树木疏透度参数的技术流程。该研究对于推动树木遮荫、通风效果评估以及树木热舒适调节效益的精细化评估具有重要意义。

1 疏透度概念辨析

现有国内外研究在探讨疏透度相关问题时,偶见概念混淆现象,会影响测量方法的选择。因此,有必要在探讨个体树木疏透度测量方法之前,系统梳理相关概念。

疏透度概念在防风林带、林分结构和个体树木遮荫效果三个方面的研究中均以不同含义展开应用。在防风林带相关研究中,为表征水平风对林带垂直面的空气动力学影响,需研究树干、树枝、和树叶等所形成孔洞空间占树木总体空间的比例,国外在 20 世纪中期将其定义为孔隙率 (porosity)^[18],但因现实中难以准确测量防风林的空气动力学孔隙体积,学者们普遍以二维光学孔隙率 (optical porosity, OP)^[19]作为三维空气动力学孔隙率 (Aerodynamic Porosity, AP) 的等效替代,该参数测量只需用普通数码相机拍摄防风林正立面照片统计落在孔隙上的图像栅格即可^[20-22]。在林分结构相关研究中,OP 这一概念可用于描述自然光在森林冠层水平面的照射情况。由于森林树木通常冠形高大,单一冠层水平面图像难以准确描述林分中光学孔隙的分布,因

此可对林分冠层进行多次平行水平切面,以确定光学分层孔隙率(Optical stratification porosity, OSP)^[23,24],在单株树木的研究中,也可采用单层的OP进行简化替代^[25]。自此,光学孔隙率OP虽不同于三维空气学孔隙率AP,也已成为同时普遍应用于防风林防风效果评估和林分结构评估的重要概念,相应地在国内常被翻译为孔隙率和疏透度,后者又被园林专业沿用于描述单体树木遮荫效果的冠层疏透度。

尽管光学孔隙率的概念在上述三个领域均有应用,但其内涵与测量方法存在显著差异(表1)。在内涵上,防风林相关研究侧重于水平风对林带垂直面的空气动力学作用,而林分冠层结构研究和遮荫效应研究则关注自然光对冠层顶部水平面的光学作用。在测量方法上,林分研究中常采用

鱼眼镜头^[26-28]对多棵树木同时进行拍摄,而对于单体树木的研究则无需采用半球摄影,使用普通的数码相机拍摄单棵树木的冠层顶视图即可。

本文所研究的疏透度实质是树木光学孔隙率,其测量对象主要集中于表1所述的树木垂直面和水平面影像,需要测量的是个体树木的水平面疏透度和垂直面疏透度。

2 研究对象与数据采集

2.1 研究对象与数据采集

本文筛选研究对象时综合考虑可能影响树木疏透度的主要因素,如树种、树冠疏密程度及养护管理状况等^[29-31],选取表2所示5棵南北方城市绿化环境中常见园林树木作为研究对象,且各树木疏透度具有较明显的异质性。

表1 不同研究领域基于摄影成像测量光学孔隙率方法的对比
Table 1 Comparison of optical porosity measurement methods based on photographic imaging in different research fields

研究领域 Research areas	光学孔隙率应用含义 Implications of optical porosity	研究维度 Research dimensions	光学孔隙率测量方式 Optical porosity measurement methods			参考文献 References
			测量对象 Measurement object	测量工具 Measuring tools	测量平面 Measurement plane	
防风林防风效果研究 A study on the windbreak effectiveness of windbreak forests	水平风对林带垂直面的空气动力学影响 Aerodynamic effects of horizontal wind on the vertical plane of a forest strip	三维 3D	背景单一整洁的林带或单棵树木普通照片 Ordinary photos of a single, neat row of trees or a single tree against a plain background	普通数码相机 Standard digital camera	垂直面 Vertical plane	[10]
林分结构特征研究 A study on the structural characteristics of forest stands	自然光对林分尺度群体树木冠层顶部水平面的照射与穿透效果 Effects of natural light on illumination and penetration at the top of the canopy plane of tree populations at the stand scale	分层二维 Layered 2D	背景为天空的林分冠层顶视图半球照片 A hemispheric photograph of a forest canopy viewed from above, with the sky in the background	鱼眼镜头 Fisheye lens	水平面 Horizontal plane	[28]
个体树木遮荫效果研究 A study on the shading effects of individual trees	自然光对个体树木冠层顶部水平面的照射和穿透效果 Effects of natural light on illumination and penetration at the top of individual tree canopies	单层二维 Single-layer 2D	背景为天空的单棵树木冠层顶视图普通照片 A standard photograph showing a top-down view of the canopy of a single tree against a sky background	普通数码相机 Standard digital camera	水平面 Horizontal plane	[12]

注:该表格未对各种分类进行穷举,仅以典型案例揭示各视角之间的差别和联系。
Note: This table does not exhaust all possible categories but uses typical cases to illustrate the differences and connections between various perspectives.

表 2 研究对象摄影图像示意
Table 2 Schematic illustration of photographic images of research subjects

项目 Project	树种 Tree species	处理后的摄影图像 Processed photographic images
1	西府海棠 <i>Malus micromalus</i>	
2	大叶香樟 <i>Cinnamomum septentrionale</i> Hand.-Mazz	
3	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	
4	白玉兰 <i>Yulania denudata</i>	
5	大叶女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	

数据采集工作主要包括点云数据采集和树木摄影图像采集两个方面。本文于 2025 年 4 月光照较弱、多云无风的天气条件下,应用 FARO Focus Plus S70 激光扫描仪扫描点云,共设置 20 个扫描站点,点云配准精度达到 10.25 mm。该扫描仪的扫描频率为 100 万点/s,视场角为垂直 300°、水平 360°,相对精度为 2 mm,角度分辨率为 0.005 28°,典型距离下光斑尺寸为 2.12 mm。摄影图像采集于同月份晴朗无风天气,使用 vivo X Flip 手机在研究对象周围拍摄树木图像。为保证图像的完整性,垂直面影像的拍摄距离通常选择在 20-30 m,拍摄高度为 1.5 m。从中选取效果最佳的 5 张影像,并使用 Photoshop 软件进行处理,仅保留树木主体部分,用于后续实验结果的对比验证(详见表 3)。

需要注意,本文经多次正交试验,发现在人眼视角下,即使通过调整手机与树木之间的距离,仍然难以利用手机前置摄像头结合手机支架获取未被树干遮挡的完整树冠顶视图。正交试验参考钟汝琪等^[12]的研究,设置手机镜头与树干

的起始距离为 20 cm,并以 50 cm 为递增间距,分别设定 20 cm、70 cm、120 cm 和 170 cm 四个距离水平;同时,设定手机平面与地面之间的距离分别为 50 cm、100 cm 和 150 cm,共进行 12 次(表 4)。确认几乎无法获取树木水平面摄影图像后,本文最终在 Cloudcompare 点云可视化软件中采集单株树木点云的树冠水平面图像。

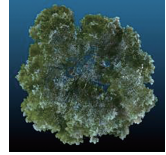
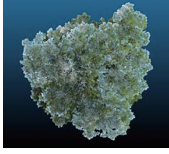
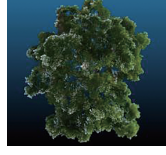
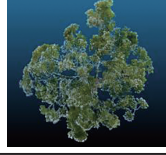
3 树木疏透度测量方法

本文以孔隙剪影图像栅格方式^[9]为原理参考,垂直面和水平面的测量方法仅在点云降维时不同,其余相同(图 1)。

3.1 基于三维点云的疏透度测量方法

3.1.1 点云预处理 首先手动剔除激光扫描仪获取的建筑物、路灯、行人等非树木点云,保留完整且独立的单株树木点云数据。值得注意的是,传统点云预处理常采用点云下采样提升运算速度,但该操作会降低原始点云密度,影响疏透度计算精度,因此本文无需下采样,直接利用完整

表3 处理后的单体树木点云图像和摄影图像
Table 3 Processed point cloud images and photographic images of individual trees

树木编号 Tree number	树种 Tree species	处理后的摄影图像 Processed photographic images	点云图像 Point cloud image	
			垂直面图像 Vertical image	水平面图像 Horizontal image
1	西府海棠 <i>Malus micromalus</i>			
2	大叶香樟 <i>Cinnamomum septentrionale</i> <i>Hand.-Mazz</i>			
3	朴树 <i>Celtis sinensis</i>			
4	白玉兰 <i>Yulania denudata</i>			
5	大叶女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>			

单株树木点云计算其疏透度,以保证数据的原始性。之后根据测量平面的不同,在测量树木垂直面疏透度时舍弃所有点云的 Y 坐标或 Z 坐标。该操作能够在一定程度上弥补因跳过下采样流程而导致的点云运算速度降低问题,同时减少约三分之一的数据量。

3.1.2 点云二维分箱与测量精度控制 按照栅格图像统计测量疏透度的原理,本文将点云疏透度测量问题转化为离散点二维分箱问题。二维分箱(2D binning)本质是将二维数组进行分组,通过规划一定密度的平面正交网格并统计每个格子是否落入离散点,可将网格划分为有无离散点两组数据。离散点坐标的取整化即相当于按照 1 为单位划分坐标网格(图2),公式为:

$$f(x)=[x],x\in R \tag{1}$$

一般地,有 $[x]\leq x\leq [x]+1$,即 $[x]$ 为不超过 x 的最大整数。

网格的大小决定数据统计的精度,通过激光扫描仪获取的点云数据默认以 m 为单位,即划分网格尺寸为 $1\text{ m}\times1\text{ m}$,为提升测量精度,本文将点云原始坐标整体乘 10,可取整化至原始数据的小数点后一位数,相当于同样的点云区域范围内,网格数量扩大 100 倍(图3)。倍数越大网格数量越多,精度越高,计算速度也会相应更慢。经测试,本文认为原始坐标乘 10 倍即可实现精度和速度的平衡。

3.1.3 网格统计 二维分箱划分的网格线具有交点坐标,但坐标数量不等于网格的数量,例如图4,当有 9 个坐标点时,只有 4 个格子,本文在统计网格数量时,将最后一列坐标之外的所有坐标点在 x 和 y 轴方向平移 0.5 个单位,以此获取网格中每个方格的中心点,统计所有中心点数量即为网格数量。该方法虽比传统的数学规律计算更为复杂,但其优势性将在后文呈现。

表 4 人眼视角下采集的树冠水平面影像
Table 4 Tree canopy horizontal plane image captured from the human-eye perspective

编号 Number	手机镜头与树干 之间的距离/cm The distance between the cell phone camera and the tree trunk	手机平面与地面 之间的距离/cm Distance between the phone's surface and the ground	拍摄效果 Shooting results	编号 Number	手机镜头与树干 之间的距离/cm The distance between the cell phone camera and the tree trunk	手机平面与地面 之间的距离/cm Distance between the phone's surface and the ground	拍摄效果 Shooting results
1	20	50		7	120	50	
2	20	100		8	120	100	
3	20	150		9	120	150	
4	70	50		10	170	50	
5	70	100		11	170	100	
6	70	150		12	170	150	

3.1.4 树木剪影区域总面积统计 树木剪影即树木原始点云生成的投影点云外轮廓点连线所形成的闭合区域。本文借助 α -shapes 算法将树木投影点云简化为若干轮廓点^[32],通过判断该轮廓点连线闭合区域内的方格数量确定树木区域剪影总面积。在闭合区域边缘的网格若满足至少一半面积在闭合区域内,则视为区域内网格,低于一半面积则不计数。满足条件的判定以每个方格中心点是否在闭合区域内为标准,这也是前述采取中心点计数方式而非数学规律计算方式的优势性和便捷性。

根据数学几何定理,若某点与多边形任意边的夹角和为 360 度,则该点在多边形内部。本文根据这一原理采用 Python 基础程序包 Shapely 中的 contains 算法判断网格中心点与闭合区域的包含关系,从而统计树木剪影区域网格数量。然而该算法的使用需要确保输入的多边形顶点,即点云外轮廓点按照顺时针顺序依次输入。为此本文需计算出点云轮廓点所围合多边形的中心点,将各轮廓点按照相对于中心点的角度进行排序,确保 contains 算法的正常运行。最终在区域内的网格中心点数量即为树木剪影区域的总网格数量。

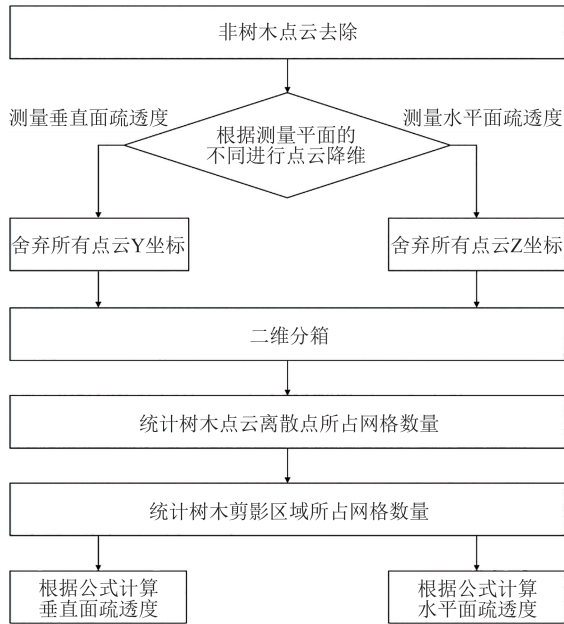


图1 树木疏透度测量技术路线图

Fig. 1 Technical roadmap for tree optical porosity measurement

3.1.5 基于三维点云的树木疏透度测量计算公式 本文方法基于传统疏透度测量方法提出。在传统疏透度测量方法中,曹新孙等^[33]已总结出经典的疏透度计算公式:

$$\beta = \frac{s}{S} \times 100\% \quad (2)$$

其中, β 表示疏透度, s 表示透光孔隙投影面积(m^2), S 表示树木投影总面积(m^2)。

树木非孔隙部分即为 S 与 s 的差值,本文提出的基于三维点云方法测量疏透度的计算公式应为:

$$\beta = (1 - \frac{g \cdot N_p}{S}) \times 100\% \quad (3)$$

其中, g 表示调节后测量精度对应的单位网格面积(m^2), N_p 表示采用离散点坐标取整化方式统计的树木点云所占网格数量(个), $g \cdot N_p$ 对应树木非孔隙部分面积(m^2),即为式(2)中 S 与 s 的差值,传统方法直接统计透光孔隙投影面积,点云方法则直接统计非孔隙区域投影面积,两者均需统计树木投影总面积 S ,经简单推导,可知本文提出的式(3)与经典式(2)完全对应,本文提出的点云测量疏透度方法在原理上可行。

3.2 基于传统方式的疏透度测量

在完成基于三维点云的疏透度测量方法之后,为验证该方法的准确性,与传统测量方法测得的疏透度作对比。首先对图像进行剪影化处理,利用Photoshop将采集的树木彩色RGB图像灰度化^[34],参考Gillies^[18]提出的光学孔隙率统计标准,灰度化处理后的图像应尽可能清晰呈现所有能透过光且相邻两片叶子或枝条之间的间隙小于叶片封闭区域宽度四分之一的孔隙。之后将树木图像输入Image-Pro Plus^[4]软件,分析图像灰度差异并将其孔隙区域栅格与树木区域栅格进行分割,统计各自区域的栅格面积以计算疏透度作为树木的真实疏透度参考值。

3.3 准确性检验方法

基于三维点云获取疏透度的方法验证分为误差检验和准确性检验两大步骤。点云测量疏透度方法准确性的检验需要与传统Image-Pro Plus软件及其相关算法(以下简称IPP方法)测量结果进行对比,首先通过正态性检验和配对样本 t 检验,确认两种方法没有因人为因素导致的系

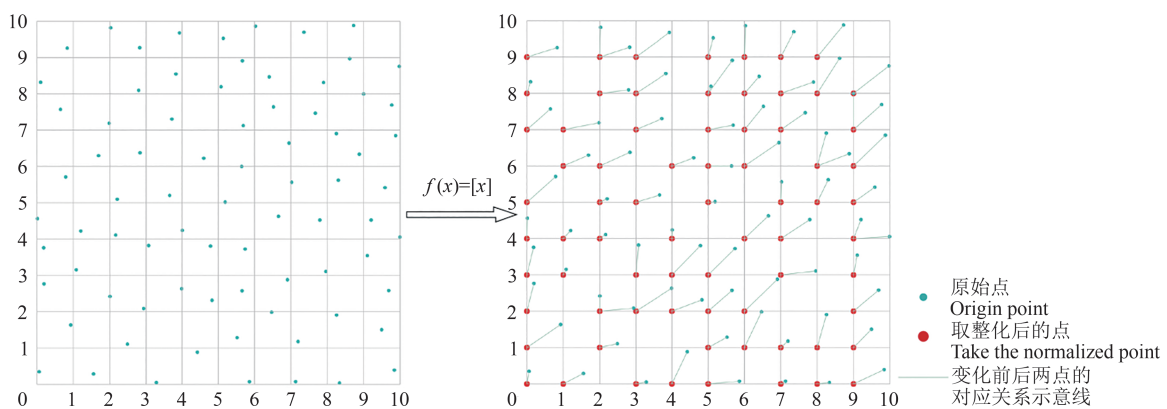


图2 离散点坐标取整原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram for principle of discrete point coordinate rounding

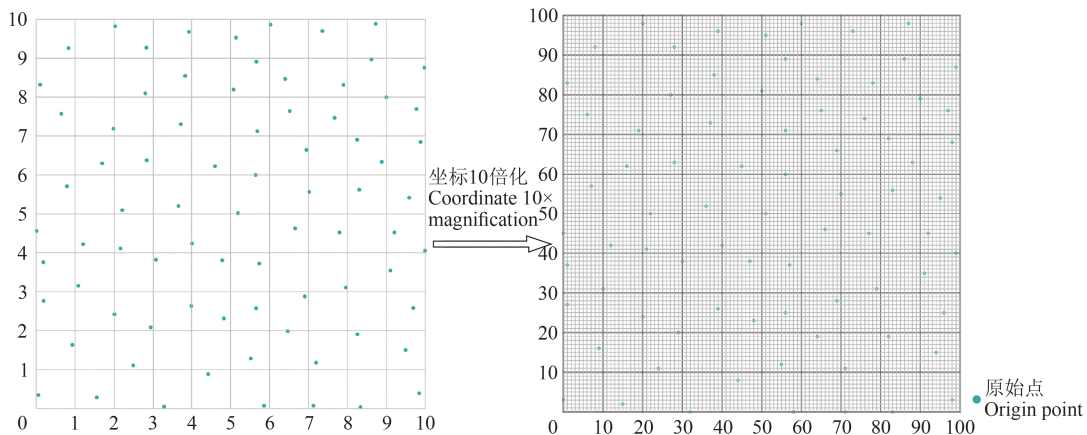


图3 坐标十倍化提升测量精度原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram for principle of ten-fold magnification of coordinates to improve measurement accuracy

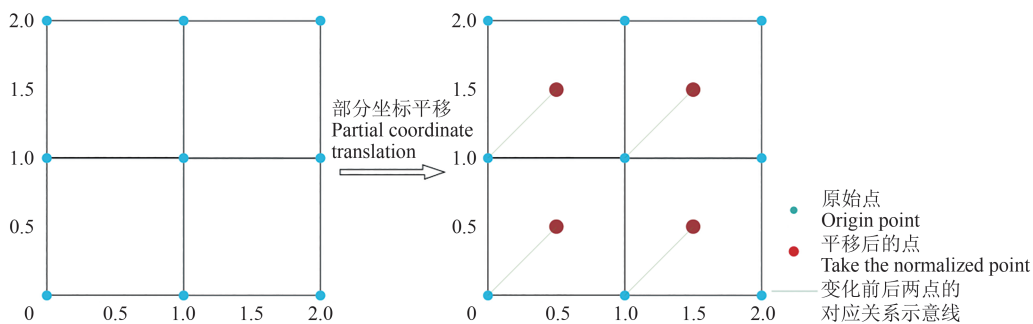


图4 网格统计原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grid statistics principle

统性显著差异,之后才可进一步验证方法准确性,由于本文样本量相对较少,采用回归分析效果不佳,因此借助百分比差异法^[10]验证点云测量方法的准确性。值得注意的是,由于树木冠层无法从树下仰视拍摄完整冠层水平图像,无法以树木水平面摄影图像进行验证,因此只能借助Cloudcompare中获取的树冠顶视图代替树木水平面摄影图像进行验证。

4 研究结果

采用传统IPP方法和本文点云方法测量的5棵树木垂直面和水平面疏透度结果如表5所示。对两种方法变量的峰度和偏度进行正态性检验,两者的Z评分绝对值分别为-0.806和0.328,均在 ± 1.96 检验标准之间,且S-W检验和K-S检验,满足正态分布,可以进行配对样本t检验,结果如表6所示。传统方法检验结果($M=0.208, SD=0.204$)高于点云方法检验结果($M=$

$0.208, SD=0.206$),此差异是统计学非显著的, $t(9)=0.213, p>0.05, d=0.068, 95\%CI[-0.005; 0.006]$,说明两种方法处理的数据结果没有显著性差异,基本可以认为两种方法没有较大系统误差,可以继续准确性检验。

经准确性检验,点云测量方法与传统IPP测量方法所得垂直面和水平面疏透度测量结果的百分比差异绝对值介于0.9%至6.2%之间(表7),正值表示点云测量结果大于IPP测量结果,负值则相反。其中5号树木垂直面疏透度最高,点云测量结果偏小,差异也最为显著(-6.173%)。对两组数据进行回归分析后,发现点云方法测量的疏透度结果与IPP方法测量结果高度相关($R^2=0.993$)(图5),表明虽然5号树等存在超过5%的百分比差异,整体而言点云方式与传统应用的IPP方式测量结果高度接近,本文提出的基于三维点云测量树木疏透度的方法具有较高的准确性。

表5 两种方式树木垂直面疏透度测量结果表
Table 5 Results of vertical porosity measurement of trees using two methods

树木编号 Tree number	树木种类 Tree species	垂直面测量结果		水平面测量结果	
		Vertical surface measurement results		Horizontal level measurement results	
		传统 IPP 方法 Traditional IPP methods	点云方法 Point cloud methods	传统 IPP 方法 Traditional IPP methods	点云方法 Point cloud methods
1	西府海棠 <i>Malus micromalus</i>	0.163	0.171	0.203	0.201
2	大叶香樟 <i>Cinnamomum septentrionale Hand.-Mazz</i>	0.727	0.739	0.051	0.052
3	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	0.213	0.207	0.018	0.019
4	白玉兰 <i>Yulania denudata</i>	0.080	0.077	0.085	0.087
5	大叶女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.243	0.228	0.301	0.298

表6 两种方式树木垂直面疏透度测量结果的配对样本 t 检验表
Table 6 Paired-sample t-test on vertical surface optical porosity of trees measured by two methods

数据名称 Data name	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	差值 95% 置信区间		T值 T-value	自由度 Degrees of freedom	显著性 Statistical significance
			95% confidence interval for				
			the difference				
			下限 Lower limit	上限 Upper limit			
传统测量方法减点云测量方法 Traditional Measurement methods minus point cloud measurement methods	0.005 00	0.074 12	-0.004 803	0.005 803	0.213	9	0.878
传统测量方法 Traditional measurement methods	0.208 40	0.203 735					
点云测量方法 Point cloud measurement methods	0.207 90	0.206 489					

表7 两种方式树木疏透度测量结果百分比差异表
Table 7 Percentage differences in vertical surface optical porosity measurement results of trees by two methods

树木编号 Tree number	树木种类 Tree species	垂直面疏透度百分比差异/% Percentage difference in vertical surface porosity	水平面疏透度百分比差异/% Percentage difference in horizontal permeability
1	西府海棠 <i>Malus micromalus</i>	4.908	-0.982
2	大叶香樟 <i>Cinnamomum septentrionale Hand.-Mazz</i>	1.651	1.961
3	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	-2.817	5.556
4	白玉兰 <i>Yulania denudata</i>	-3.750	2.353
5	大叶女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	-6.173	-0.997

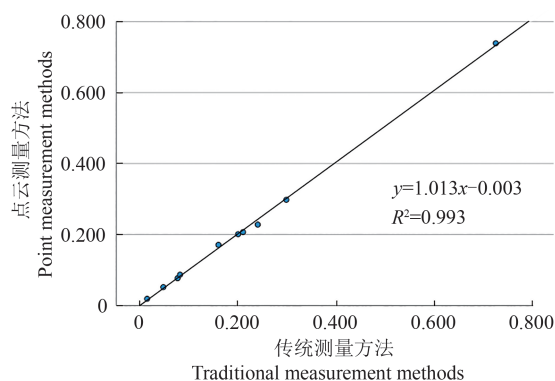


图5 两种方法测量结果的回归分析

Fig. 5 Regression analysis of measurement results from two methods

5 讨论

5.1 点云方法与传统IPP方法对比验证

前人研究中采用单一真实林带^[6]、单株模型树重复排列形成的林带^[9]和3株模型树苗^[10]这三类研究对象获取树木疏透度计算结果,本文选取5株真实树木作为研究对象,并以树种的差异化增强样本疏透度的差异性,能够较好地测试本文方法对树木疏透度测量的适用性。

回归分析结果表明,文中方法可以较好地获得与上述传统IPP测量方法高度接近的测量结果。早期测量方法借助人眼识别树木实体区域易受主观因素的影响,为此前人先后提出借助Otsu算法^[9]、分水岭算法^[10]等处理树木图像的方法,虽无需人工干预,但拍摄树木图像时,均以模型树的形式开展于光线良好的实验室环境,而在自然环境下拍摄的树木影像通常难以避免因光线折射反射现象导致的树木孔隙区域图像灰度偏黑的问题,因此基于图像处理技术的树木疏透度测量方法在适用于真实树木的疏透度时仍存在一定问题。本文借助点云识别树木孔隙区域的做法则较好地回避了主观因素和自然光线对孔隙判断的影响,对于实际树木的疏透度测量具有一定参考价值。

5.2 两种测量方法百分比差异的影响因素

垂直面疏透度差异整体高于水平面疏透度差异,主要是由于垂直面疏透度以摄影图像作为传统IPP方法的测量对象,水平面疏透度则采用精度更高的树木点云冠层顶视图像,导致水平面

疏透度的两种测量结果更为接近。

在同一测量平面内,测量结果和传统IPP测量方法的百分比差异绝对值大小与树木自身冠形特征有关。一方面,冠形轮廓凹凸性较强的易导致点云测量方法树木投影总面积偏大。例如3、4、5号垂直面树冠结构较为分散,分支离散,树冠整体性较差,在将树木投影点云简化为轮廓点连线所形成的闭合区域时,易包含较多非真实树冠的空白区域,导致树木剪影区域总面积统计结果偏大,整体点云测量结果偏小,因而百分比差异为负值。其中5号树立面轮廓参差变化较大,整体性最差,其百分比差异也最大(-6.173%)。另一方面,整体较为密集树冠易导致传统IPP测量方法孔隙投影面积偏小。例如1、2号垂直面树冠整体性较强,树冠较为密集,孔隙区域小而散,易在传统的IPP测量中导致部分小孔隙因灰度偏黑被误判为非孔隙区域,致使IPP测量结果相比于真实疏透度略小,这与周杰等^[6]的验证结果相一致,因此百分比差异为正值。其中1号树为西府海棠,其叶片相较于1号大叶香樟更为狭长,冠层空隙更为细碎,IPP方法的阈值误判现象更为严重,导致其百分比差异也大于1号树。此外,树木自身疏透度大小也会影响百分比差异,例如2、3号树水平面疏透度变化幅度相同,3号树自身水平面疏透度显著更低,两者的百分比差异也更显著。

5.3 树木水平面疏透度测量可行性

前人研究普遍聚焦于个体树木垂直面疏透度测量,鲜见个体树木水平面疏透度测量的相关研究,主要是因为树冠水平面图像难以获取。具体而言,当镜头靠近树干时,树干遮挡严重影响了图像采集;而保持镜头与树干间距大于1.5 m时,虽可避免树干遮挡,却又无法保证冠层图像的完整性。因此,传统基于树冠图像和栅格统计的疏透度计算方法难以直接应用于树冠水平疏透度的测量,进而限制了其在树木遮荫效果评估中的应用。相比之下,点云数据获取摆脱了人体身高限制,能够便捷、准确地提供完整的树冠顶视图像,借助点云数据,可以同时有效测量树冠垂直面疏透度和树冠水平面疏透度。

5.4 树木水平面疏透度差异性

研究结果表明,不同园林树种的水平面疏透

度存在显著差异,且易受养护管理水平等因素的影响,这与陈耀华^[30]等人的研究结果一致。例如,5号树木整体冠层较为稀疏,养护管理状况相对较差,其水平面疏透度最高(0.298);而3号树木树冠浓密,生长态势良好,水平面疏透度最低(0.019)。此外,在养护管理水平相近的情况下,枝叶向外伸展的树木往往表现出更高的水平面疏透度,如1号西府海棠。鉴于树木水平面疏透度的个体差异性,在评估树木遮荫效果时,除传统的株高、冠幅、胸径等形态参数外,应充分考虑并纳入水平面疏透度这一重要指标。

6 结论

针对目前高效提取单株树木疏透度参数技术方法匮乏的现状,本文提出了一种基于三维点云技术的树木个体疏透度参数提取技术流程。该方法充分利用三维点云技术在个体树木信息采集方面所具备的高效性、客观性和准确性优势,并依托传统图像疏透度测量(IPP)原理,将点云疏透度提取问题转化为离散点二维分箱计数问题,同时引入坐标十倍化的策略以提升二维分箱统计精度。经公式推导,该方法在原理上具备可行性。研究发现,点云测量结果与传统IPP测量结果的百分比差异主要与冠形轮廓凹凸性、树冠整体密集性和树木自身疏透度大小相关,三种因素分别导致点云测量结果,IPP测量结果和疏透度变化幅度相应变化。总体而言,实验验证结果表明该方法具有较高的准确性,与传统测量结果呈现高度相似且接近1:1的线性关系。该点云测量方法可以作为一种高效的替代方案,实现树木个体疏透度参数的快速提取。

本文提出的点云测量方法相比传统基于图像处理的测量方法有效避免了自然光线对树木孔隙区域误判的问题,有利于真实树木疏透度的测量,从而提升了基于垂直面疏透度评估防风林防风效果的效率,并弥补了传统无孔隙树木数字模型缺乏疏透度参数的不足。此外,研究凭借点云技术在三维可视化方面的优势摆脱了传统摄影图像难以获取单体树木冠层水平面图像的内在劣势,成功测得单体树木水平面疏透度,为利用水平面疏透度精细化评估树木遮荫效果提供了新的途径。

鉴于作者在前期研究已探索了基于树木点

云构建精细化树木数字模型的工作流程^[32],本文可视为该研究的拓展与深化。未来,可将两者有效结合,借助包含水平面疏透度参数的精细化树木模型,实现树木遮荫效果的精确模拟评估,进而推动基于热舒适性提升的树木配置策略优化,为其实践提供更具科学性的指导。

为保证树木固有的疏透度特征,本研究在点云预处理阶段未采用点云下采样技术以降低原始点云密度。尽管通过点云数据降维在一定程度上缩减了数据量,但计算过程仍然对硬件算力提出了要求。未来研究方向应着重于算法优化,探索更高效、更省时的基于三维点云测量树木个体疏透度的方法。

参考文献

- [1] Jiao M, Jenerette G D, Zhou W, et al. Adaptive shading: How microclimates and surface types amplify tree cooling effects?[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2024, 101: 128546.
- [2] Zhou S Q, Yu Z W, Ma W Y, et al. Vertical canopy structure dominates cooling and thermal comfort of urban pocket parks during hot summer days[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2025, 254: 105242.
- [3] Song L, Tang Z, Zhang X, et al. Assessing effects of seasonal variations in 3D canopy structure characteristics on thermal comfort in urban parks[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2025, 112: 128901.
- [4] Li R, Zhao Y, Wang L L, et al. Numerical investigation of the blockage effect of trees on airflow distributions in a wind tunnel[J]. *Building and Environment*, 2024, 263: 111848.
- [5] Jia X, Xiao H, Xin Z, et al. Determining the structural characteristics of farmland shelterbelts in a desert oasis using LiDAR[J]. *Forests*, 2025, 16(8): 1221.
- [6] 周杰,雷加强,孙琳,等. Image-Pro Plus 数字图像分析软件计算防护林疏透度的可行性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 109-114.
- [7] 万猛,潘存德,王梅,等. 农田防护林林带疏透度数字化测定方法及其应用[J]. *干旱区地理*, 2005(01): 120-123.
- [8] 关文彬,李春平,李世锋,等. 林带疏透度数字化测度方法的改进及其应用研究[J]. *应用生态学报*, 2002(06): 651-657.
- [9] 李晓辉,王克俭,谷建才,等. 基于图像处理的疏透

- 度测定及结构关系研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(01): 239-245.
- [10] 李正农, 周立凡. 基于图像处理技术的树木疏透度确定方法研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(05): 175-182.
- [11] Kučera J, Fukalová P, Středová H, et al. Evaluation of the spatial structure of windbreaks from digital photography[J]. Journal of Ecological Engineering, 2024, 25(10): 381-391.
- [12] 钟汝淇, 黄秋燕, 杨建欣, 等. 园林树木冠层疏透度测度及遮荫功能综合评价[J]. 四川林业科技, 2024, 45(3): 122-130.
- [13] Qian C, Yao C, Ma H, et al. Tree species classification using airborne LiDAR data based on individual tree segmentation and shape fitting[J]. Remote Sensing, 2023, 15(2): 406.
- [14] Wang L, Chen T, Yu Y, et al. Impacts of vegetation ratio, street orientation, and aspect ratio on thermal comfort and building carbon emissions in cold zones: A case study of Tianjin[J]. Land, 2024, 13(8): 1275.
- [15] 刘芳妮, 尹 豪, 刘芝若. 宅旁绿化对北京市建筑冬季日照的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(02): 114-122.
- [16] 苏宏霖, 唐丽玉, 陈季委, 等. 三维场景树荫模拟与量化——以城市街道为例[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(11): 2493-2505.
- [17] Deng S, Xu Q, Yue Y, et al. Individual tree detection and segmentation from unmanned aerial vehicle-LiDAR data based on a trunk point distribution indicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108717.
- [18] Raine J K, Stevenson D C. Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1977, 2(2): 159-180.
- [19] Loeffler A E, Gordon A M, Gillespie T J. Optical porosity and windspeed reduction by coniferous windbreaks in Southern Ontario[J]. Agroforestry Systems, 1992, 17(2): 119-133.
- [20] Aishajiang Aili; Xu Hailiang; Abdul Waheed, et al. Synergistic windbreak efficiency of desert vegetation and oasis shelter forests[J]. PLOS One, 2024, 19(10): e0312876.
- [21] George E J, Broberg D, Worthington E L. Influence of various types of field windbreaks on reducing wind velocities and depositing snow[J]. Journal of Forestry, 1963, 61(5): 345-349.
- [22] Gillies J A, Nickling W G, King J. Drag coefficient and plant form response to wind speed in three plant species: Burning Bush (*Euonymus alatus*), Colorado Blue Spruce (*Picea pungens Glauca.*), and Fountain Grass (*Pennisetum setaceum*) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, 107 (D24): ACL 10-1-ACL 10-15.
- [23] Zhu J J, Matsuzaki T, Gonda Y. Optical stratification porosity as a measure of vertical canopy structure in a Japanese coastal forest[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 173(1): 89-104.
- [24] Cui H, Wang C, Lu F, et al. Dynamic stratified porosity computation from canopy interaction simulation between airflow and leaves[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1238160.
- [25] 郭宇彤. 基于疏透度的林木冠层降雨截留功能遥感模拟[D]. 福州:福建农林大学, 2023.
- [26] Zhang Y, Feng X, Chang X, et al. Impacts of canopy structure on the sub-canopy solar radiation under a deciduous forest based on fisheye photographs[J]. Research in Cold and Arid Regions, 2023, 15(3): 150-160.
- [27] Hederová L, Macek M, Wild J, et al. Ecologically relevant canopy openness from hemispherical photographs[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 330: 109308.
- [28] Anderson M C. Studies of the woodland light climate: I. The photographic computation of light conditions[J]. Journal of Ecology, 1964, 52(1): 27-41.
- [29] Smithers R J, Doick K J, Burton A, et al. Comparing the relative abilities of tree species to cool the urban environment[J]. Urban Ecosystems, 2018, 21(5): 851-862.
- [30] 陈耀华. 关于行道树遮荫效果的研究[J]. 园艺学报, 1988(02): 135-138.
- [31] Fujiwara K, Ito K, Ignatius M, et al. A panorama-based technique to estimate sky view factor and solar irradiance considering transmittance of tree canopies [J]. Building and Environment, 2024, 266: 112071.
- [32] 魏云琦, 王 旻, 尹 豪. 面向城市绿化精细管理的低密度树木数字孪生模型——以树木风灾风险管理为例[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(03): 139-150.
- [33] 曹新孙. 农田防护林学[M]//北京:中国林业出版社, 1983.
- [34] 何定颖, 李正农. 行道树风致响应的风洞试验研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(03): 44-53.