

DOI: 10.20103/j.stxb.202312012630

邱瑶, 石龙宇, 罗涛, 赵宇. 基于无人机影像的城市单木三维绿量模拟. 生态学报, 2025, 45(11): 5378-5385.

Qiu Y, Shi L Y, Luo T, Zhao Y. Three-dimensional green biomass simulation of urban individual tree based on UAV imagery. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5378-5385.

基于无人机影像的城市单木三维绿量模拟

邱 瑶^{1,2}, 石龙宇¹, 罗 涛^{3,4,*}, 赵 宇⁵

1 中国科学院城市环境研究所区域与城市生态安全全国重点实验室, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 福州大学建筑与城乡规划学院, 福州 350108

4 福州大学福建省国土空间分析与模拟数字技术重点实验室, 福州 350108

5 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

摘要: 三维绿量的科学测算对于评估城市绿化水平和开展生态效益定量研究至关重要。目前广泛应用的基于遥感影像的绿量测量方法需结合实地调查, 获取树种信息并构建不同树种树冠形态参数关系模型, 这一过程费时费力。研究基于高分辨率遥感影像可直接量化的因子模拟单木绿量, 旨在提高绿量测算效率, 为绿量测算提供新方案。利用无人机航拍获取福州城市地区厘米级遥感影像, 采用遥感影像法测算不同地区(街道、街区及城市地区)单木及总绿量; 对比分析不同地区绿量特征; 构建基于遥感影像可直接量化的因子与不同地区绿量的回归模型。结果表明: (1) 福州市街道内行道树种类相对单一, 以榕树为主(占比 61.3%); 而街区内树种配置多样, 各树种占比相对均衡。街道、街区及城市地区平均单木绿量存在较大差异, 分别为 351.6、143.7、161.4 m³。(2) 利用树冠投影面积、树冠投影周长与街道、街区及城市地区单木绿量构建的回归模型, 校正后 R^2 分别为 0.921、0.873 和 0.882, 表明利用回归模型可快速且精确地测算不同地区单木及总绿量。

关键词: 无人机影像; 三维绿量; 树冠投影面积; 街道与街区; 福州

Three-dimensional green biomass simulation of urban individual tree based on UAV imagery

QIU Yao^{1,2}, SHI Longyu¹, LUO Tao^{3,4,*}, ZHAO Yu⁵

1 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Architecture and Urban Planning, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

4 Fujian Key Laboratory of Digital Technology for Territorial Space Analysis and Simulation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

5 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Accurate measurement of three-dimensional green biomass is essential for assessing urban greening levels and conducting quantitative ecological benefit studies. Current remote sensing-based green biomass measurement methods require time-consuming field surveys to collect tree species data and establish species-specific crown morphological parameter models. This study develops an efficient green biomass estimation approach by simulating individual-tree green biomass using directly quantifiable parameters from high-resolution remote sensing imagery. First, centimeter-level UAV imagery was acquired across Fuzhou's urban areas, and remote sensing methods were employed to measure the individual and total green biomass in different areas (streets, neighborhoods, and urban areas). Next, the green biomass characteristics of different

基金项目: 十三五国家重点研发计划课题(2018YFC0704705); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42201200)

收稿日期: 2023-12-01; **采用日期:** 2025-04-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tluo@iue.ac.cn

areas were compared and analyzed. Finally, regression models were constructed using directly quantifiable factors from remote sensing imagery to estimate the green biomass in various regions. Key findings reveal: (1) Street trees in Fuzhou show low species diversity (61.3% *Ficus* spp.), while neighborhoods maintain balanced species distributions. Significant green biomass variations exist across spatial scales (streets: 351.6 m³; neighborhoods: 143.7 m³; urban areas: 161.4 m³). (2) Regression models using canopy projection area and perimeter achieved high precision (adjusted R²: 0.921 for streets, 0.873 for neighborhoods, 0.882 for urban areas), demonstrating an accurate, efficient solution for multi-scale green biomass assessment.

Key Words: UAV imagery; 3D green biomass; canopy projection area; streets and neighborhoods; Fuzhou City

中国城市规划与管理中常用的绿地率、绿化覆盖率和人均绿地面积等二维指标,在一定程度上反映了城市绿地的覆盖情况和数量多寡,但这些指标仅局限于二维层面,不能准确地反映绿地内部的空间结构,也难以描述植被在三维空间中的生物量规模、相对位置和空间分布^[1]。随着绿地生态效益研究的不断深入,以及城市规划实践对生态变化预测精确性和可调控性的需求,三维层面的指标(即三维绿量)被提出^[2]。相较二维指标,三维绿量更能反映出城市绿化的空间结构量值,与绿地降温增湿、固碳释氧等生态效益的关联性也更为紧密^[3-4]。

“绿量”一词起源于 20 世纪 80 年代,是三维绿量的简称,指地面上植物绿色部分的总和,反映了绿色植物的总量和质量^[5]。绿量的测量是评估城市绿地生态效益的前提,是城市生态系统研究的重要内容。目前绿量测算方法可分为两支:叶面积说和体积说^[6]。前者采用植物叶片面积的总量来度量绿量,通常用叶面积指数表示(单位为 m²)^[1];后者则将绿量表达为生长中植物所占据的空间体积(单位为 m³)。叶面积指数的测定方法包括直接法(如破坏性取样法、异物生长方程法等)^[7]和间接法(如遥感技术、光学仪器测量等)^[8]。然而,由于植物冠层结构复杂,这些方法在实际应用中存在操作难度较大,适用场景受限等问题。与之相比,基于植物体积的绿量测算方法具有操作简便、效率高、普适性强等优势^[9]。此外,乔木树冠作为植物发挥生态效益的主要功能单元,其绿量贡献显著高于冠下植被层和灌木草本层^[10-11]。基于上述考量,本文采用体积说作为理论基础,重点关注乔木树冠体积的测算,即本文所指的绿量为乔木树冠所占据的空间体积。

目前,体积说绿量测算方法主要包括 3 类:实地测量法、遥感影像法和三维激光扫描技术^[12]。(1)实地测量法通过实地采集物种信息、冠幅(冠径)、冠高、树高和胸径等参数,结合树冠几何形态(如卵形、球形等),应用体积计算公式计算单木绿量^[13]。该方法精度较高,但繁琐耗时,适用于单木或小尺度(范围)绿量测算。(2)随着遥感技术的日益成熟,遥感影像法逐渐成为当前绿量测算的主要技术手段,具体可分为 4 种:立体摄影测量法^[14]、平面量模拟立体量法^[15]、立体量模拟立体量法^[16]和遥感植被指数法^[1]。前 2 种方法以测树学为基础,利用无人机遥感技术获取树高或冠径,结合实地调查,量化不同树种树冠参数并构建“树高-冠高”或“冠径-冠高”关系模型。基于此模型可计算地区单木绿量及总绿量。这 2 种方法时效性强、数据采集成本较低^[17],已广泛应用于校园、街道和街区等中观尺度的绿量测算。例如,陈荻等^[9]利用无人机高分辨率遥感影像测定树冠覆盖面积、株数和冠径等参数,再根据地区常见树种“冠径-冠高”关系模型计算树木冠高,实现校园内绿量的定量分析。与之相比,立体量模拟立体量法是通过实地测量不同功能和郁闭度等级的城市森林单位面积绿量,再根据这些参数对遥感影像进行数字化处理,进而估算地区绿量^[16]。而遥感植被指数法则利用高光谱遥感影像丰富的光谱信息构建植被指数,建立植被指数与实测样地三维绿量的回归模型,实现地区三维绿量的反演^[1]。后 2 种方法的精度相对较低,依赖于大量野外实测数据以确保回归模型的可靠性,通常适用于城市或区域等宏观尺度。(3)三维激光扫描技术可以获取精确的点云数据,常用于单木或中小尺度绿量的高精度测算,主要方法包括凸包法、台积法和体素法等^[17]。例如,Zhou 等^[18]利用点云数据估算了 64 株银杏单木绿量。然而,由于仪器价格高昂,该技术难以普遍推广^[12]。

综上所述,上述 3 类绿量测算方法在适用条件与尺度上各有差异。其中,基于遥感影像的测算方法虽为

街区或校园等中观尺度绿量测算的主要技术手段,但仍需结合实地调查获取树种信息及树冠形态参数,并构建不同树种的“树高/冠径-冠高”关系模型,这一过程耗时费力。为此,本文利用无人机航拍获取的厘米级遥感影像作为数据源,采用遥感影像法测算城市不同地区(街道、街区及城市地区)单木及总绿量,对比分析不同地区绿量特征,并提出了基于遥感影像可直接量化的因子模拟城市不同地区单木绿量的新方案。该方案旨在避免现有遥感影像法中过度依赖实地调查及构建树冠形态参数关系模型的繁琐步骤,以期在城市绿量快速测量提供新思路,为城市绿地空间结构优化和生态效益的定量评估提供更高效的技术手段。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

福州市(25°15′—26°39′N、118°08′—120°31′E)位于福建省东部(图1),因广植榕树又称“榕城”,属亚热带季风气候,夏季酷热多雨,冬季温和湿润,年平均气温 17.8—25℃,平均年降水量 1348.8mm。截至 2021 年,福州市城镇化率 73.0%,城市绿地率 40.7%,城市绿地面积 14199hm²。其中,公园绿地、防护绿地和附属绿地占全市绿地面积的 94.1%。在绿地分布方面,晋安区和仓山区绿地面积较大,分别占全市绿地面积的 38.4%和 37.7%。就绿化树种而言,福州植物种类丰富,绿化树种约 160 科 1136 种^[19],乡土树种繁多,主要树种包括榕树、樟树、木棉、芒果、糖胶树、羊蹄甲、小叶榄仁、天竺桂和桂花等。

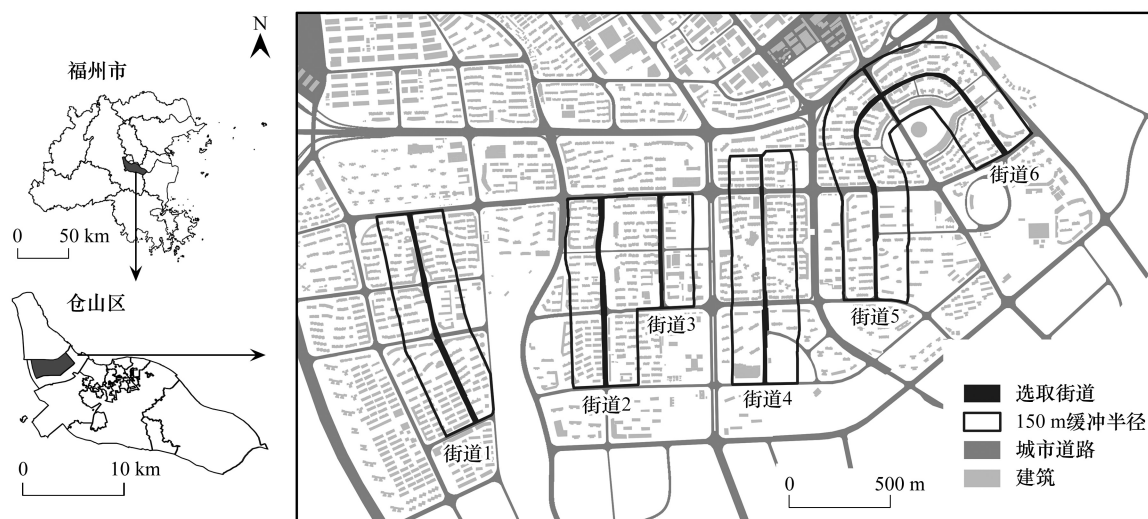


图1 研究区区位和街道、街区选取

Fig.1 Location of the study area and selection of streets and neighborhoods

1.2 街道与街区选取

本文重点关注城市街道与街区,并将街道及其周边街区在空间上的组合视为城市地区,主要基于以下 3 方面考量:(1)人本交互特征:街道与街区是城市中人环境互动最频繁的空间载体,其环境质量直接影响居民生活品质。通过优化其空间单元的绿化配置,可为营造宜居型城市环境提供科学依据。(2)城市构成基础:街道与街区是构成城市空间的两大基质要素,前者形成城市骨架网络,后者作为被街道围合的功能单元,两者共同构成城市规划与管理的基本单元^[20–21]。本文研究结果可为城市绿化方案的精细化制定提供决策支持。(3)尺度适配性:街道与街区等中观尺度的气候变化与人居环境舒适度的关联最为密切,现有绿地生态效益的研究也多在此尺度开展^[22]。

本文基于《厦门市街道设计导则》的街道分类标准,重点考察以生活服务功能为主,兼具交通集散作用的社区级街道(在城市街道总量中占比较高)^[23]。遵循代表性与典型性原则,综合考虑街道行道树数量、种植密度及周边街区绿地覆盖情况,本文在福州市仓山区选取了滨江路、上雁路、石边路、金康路、林洲路和金环路

6条与居民生活紧密联系的社区级街道作为研究对象,并以每条街道为中心构建了150m缓冲区,代表城市街区(图1)。选择缓冲区代表城市街区,而非选择完整的街区,是考虑到该方法具有以下优势:(1)空间覆盖全面:150m缓冲区可同时整合街道两侧多个街区,且覆盖单个街区50%以上的用地面积;(2)数据代表性好:街区样本数量增加与多样性提升可有效表征街区内树种配置的空间分布特征,同时可提高后续统计分析结果的可靠性。

1.3 无人机影像采集与处理

试验于2022年5月18日和19日11:00进行,风力和能见度状况较好。正值春末季节,植被茂盛,成像质量较好,适合绿量测算研究。使用固定翼无人机(经纬Matrice 200 V2)搭载1600万像素、30mm镜头焦距的数码相机,采用航拍高度200m、航向重叠率85%和旁向重叠率75%的参数设定,分2次航拍研究区,共计获取421张有效照片。照片拼接工作在Pix4D mapper软件中进行,最终生成分辨率为0.06m的数字正射影像(DOM)和数字表面模型(DSM)。

1.4 绿量关联因子选择

城市单木绿量与多种影响因子显著相关,这些因子主要可分为3类:树种特征(如树种信息、树冠几何形态)、二维形态参数(如冠幅、树冠投影面积)以及三维结构参数(如树高、冠高)^[13]。在城市地区,绿地类型复杂、树种配置多样,使用可见光遥感影像难以准确地识别树种信息,且遥感影像具有的二维性特征,使研究人员难以直接获取植被三维结构参数。本文在与城市单木绿量显著关联的二维形态参数中,从长度、面积和周长3个维度初步筛选出冠幅、树冠投影面积和树冠投影周长作为模拟绿量的3个关联因子。基于现有研究成果与预实验结果,发现这3个关联因子之间存在不同程度的相关性^[24],其中冠幅与树冠投影面积、树冠投影周长均呈现显著强相关(相关系数 >0.6)^[25],树冠投影面积与树冠投影周长之间具有显著相关性,但相关性较弱。结合王琨等^[26]的研究发现,乔木覆盖率的降温效应相较于其他树冠形态指标(如冠幅、叶面积指数等)更为显著。为了减少自变量之间的强相关性对回归分析结果的影响,同时避免单一自变量难以有效解释因变量的变化情况,综合考虑后,最终选择树冠投影面积和树冠投影周长作为后续模拟单木绿量的2个关联因子。

1.5 绿量及其关联因子测算

本文基于平面量模拟立体量方法,分别测算街道与街区单木绿量,累计单木绿量可得到城市不同地区总绿量(图2)。首先,借助eCognition 9.0软件在DOM上对研究区的单木树冠进行分割。分割方法参考何艺等^[27]的研究成果,利用ESP工具,计算树冠分割参数(最佳分割尺度、紧凑度和形状指数)。经过多次试验,发现分割尺度为140、形状参数为0.5、紧致度参数为0.7时,树冠分割效果最好。

其次,对照DOM剔除建筑、道路和绿地等干扰物,并通过目视解译对树冠边界进行校正,以减少树冠的欠分割和过分割情况,并参考汪小钦等^[28]和Su等^[29]研究成果,计算研究区的可见光波段植被差异指数(VDVI)和归一化数字地表高程模型(nDSM),根据 $VDVI>0.04$ 和 $nDSM>2$ 区分植被与非植被、林冠与非林冠。将非植被和非林冠要素剔除,可得到更为精准的树冠分割结果。

再者,利用ArcGIS 10.5软件测算树冠多边形东西和南北2个方向长度均值作为冠幅,计算树冠在垂直方向的投影面积和投影周长。将树冠多边形的中心作为树木的位置,生成X、Y地理坐标,对每株树木进行地理定位,通过实地调查核实乔木株数,并逐株记录乔木树种信息。

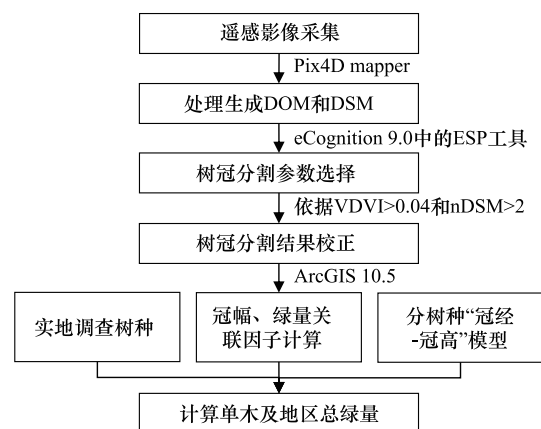


图2 绿量及其关联因子测算流程图

Fig.2 Green biomass and associated factors calculation flowchart

ESP:评估尺度参数 Estimation scale parameter; VDVI:可见光波段植被差异指数 Visible-band difference vegetation index; nDSM:归一化数字地表高程模型 Normalized digital surface model

最后,对于研究区内数量较多的 27 种常见树种,如榕树(包括小叶榕、高山榕和大叶榕)、樟树、羊蹄甲、芒果、白玉兰和桂花等,参考季彪俊等^[30]研究得出的“冠径-冠高”相关方程计算不同树种的冠高,并根据树冠几何形态,依体积计算公式求得树冠部分的体积^[13]。对于无相应文献成果的树种,则按其树冠几何形态选择近似树种的方程代替^[9]。例如:银杏采用南洋杉的方程;杜仲采用樟树的方程;栎树、天竺桂和非洲楝采用芒果的方程。

1.6 分析方法

根据本文划定的街道与街区范围及乔木树冠外轮廓所在的空间位置,使用 ArcGIS 10.5 软件分别计算街道、街区及城市地区总株数、总绿量、平均单木绿量、平均树冠投影面积和平均树冠投影周长,以开展不同地区绿量特征分析。在此基础上,将不同地区树冠投影面积和树冠投影周长作为自变量,单木绿量作为因变量,利用 SPSS 24 软件进行多元逐步线性回归分析,构建适用于不同地区的单木绿量模拟回归模型。

2 结果与分析

2.1 绿量特征分析

由表 1 与图 3 可知,福州市街道与街区的绿量特征存在显著差异,而街区与城市地区的绿量特征较为一致。具体而言,街道内行道树种类相对单一,榕树为基调树种,占比高达 61.3%,其他主要树种及其占比分别为糖胶树(13.5%)、羊蹄甲(11.1%)、樟树(6.4%)和棕榈(3.5%)。与之相比,街区内树种多样、配置均衡,主要树种及其占比依次为:榕树(16.2%)、樟树(16.1%)、糖胶树(10.4%)、白玉兰(7.9%)、桂花(7.6%)、棕榈(7.3%)、芒果(6.3%)、假槟榔(4.6%)和羊蹄甲(3.4%)。街道与街区总绿量分别为 400462.1m³和 1755956.0m³,分别占城市地区绿量的 18.6%和 81.4%,这也解释了街区与城市地区绿量特征较为接近的原因。此外,街区平均树冠投影面积为 29.9m²,平均单木绿量为 143.7m³,远小于街道的平均树冠投影面积 55.5m²和平均单木绿量 351.6m³,后两者数值约为前两者的 2 倍。这一差异主要归因于福州市街道内行道树多为榕树、糖胶树和羊蹄甲等遮荫效果显著、树冠体积较大的树种,而街区内植物种类丰富、树种配置多样,观赏性树种(如白玉兰、桂花、假槟榔和棕榈等)树冠体积较小的树种占比较高。

表 1 街道、街区及城市地区绿量特征

Table 1 Green biomass characteristics of streets, neighborhoods and urban areas

城市不同地区 Different urban areas	总株数 Total tree count/株	总绿量 Total green biomass/m ³	平均树冠投影面积 Mean canopy projection area/m ²	平均树冠投影周长 Mean canopy projection perimeter/m	平均单木绿量 Mean individual tree green biomass/m ³
街道 Streets	1139	400462.1	55.5	40.8	351.6
街区 Neighborhoods	12219	1755956.0	29.9	26.2	143.7
城市地区 Urban areas	13359	2156418.1	32.1	27.5	161.4

2.2 三维绿量模拟

根据回归分析结果(表 2),街道、街区及城市地区单木绿量与树冠投影面积、树冠投影周长均呈现显著相关性。说明树冠投影面积越大、树冠投影周长越长,单木绿量往往越大。根据拟合度 R²(校正后)可知,各回

表 2 街道、街区及城市地区单木绿量回归模拟

Table 2 Regression simulation of individual tree green biomass in streets, neighborhoods and urban areas

城市不同地区 Different urban areas	模拟方程 Regression equation	校正后 R ² Adjusted R ²	P	样本数 Sample size
街道 Streets	$Y = 5.376X_1 + 4.225X_2 - 119.134$	0.921	<0.001	1140
街区 Neighborhoods	$Y = 5.474X_1 + 1.279X_2 - 53.318$	0.873	<0.001	11219
城市地区 Urban areas	$Y = 5.414X_1 + 1.994X_2 - 66.870$	0.882	<0.001	13359

R²:拟合度 Coefficient of determination; Y:绿量 Green biomass; X₁:乔木树冠投影面积 Canopy projection area; X₂:乔木树冠投影周长 Canopy projection perimeter

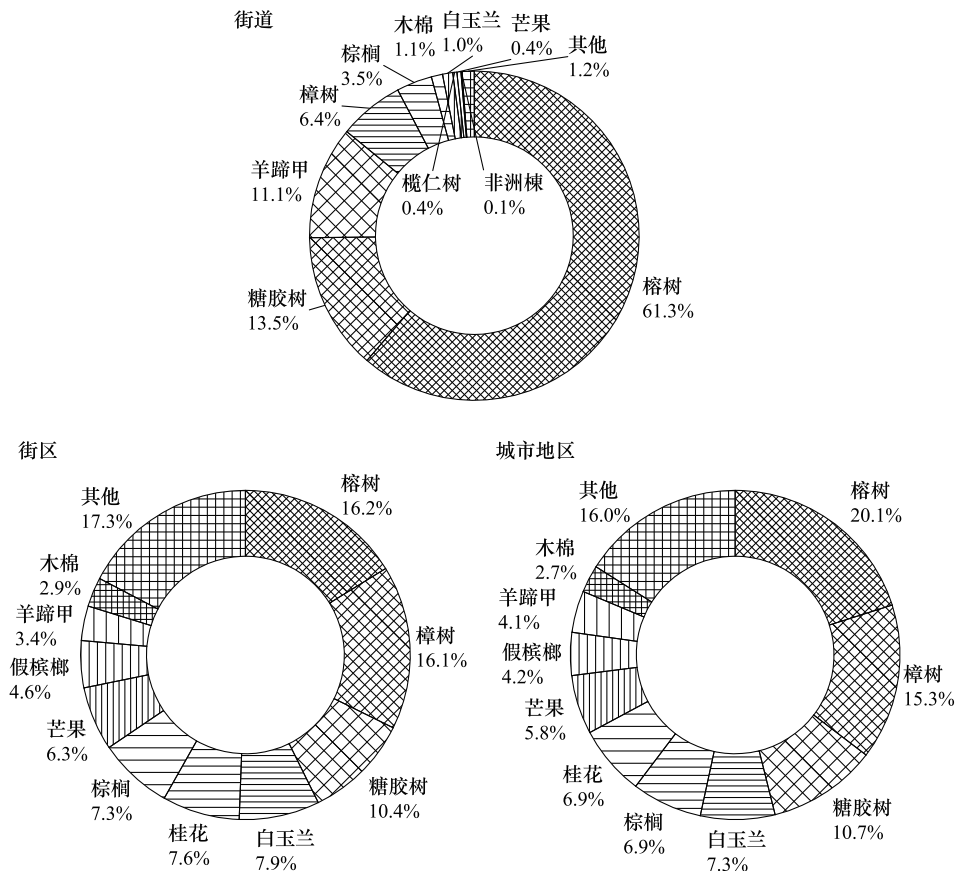


图3 街道、街区及城市地区常见树种及其所占比例

Fig.3 Common tree species and their proportions in streets, neighborhoods, and urban areas

归模型拟合度存在一定差异。街道回归模型的拟合度最高 ($R^2 = 0.921$), 其次是城市地区模型 ($R^2 = 0.882$), 街区回归模型的拟合度相对较低 ($R^2 = 0.873$)。但所有模型 R^2 均大于 0.80, 即树冠投影面积和树冠投影周长能够解释 80% 以上单木绿量变异情况, 方程拟合度较优。因此, 通过这 2 个因子可以较为精确地模拟街道、街区及城市地区的单木绿量。

3 讨论

城市街道与街区是人与环境密切交互的集中区域, 也是落实规划实践的基本单元。二者植物群落构建与乔木树种配置应基于景观美学价值和生态效益等多方面考量。本文发现, 福州市街道内行道树种类较为单一, 常绿树种占主导地位, 主要包括榕树、糖胶树和羊蹄甲等, 其中榕树占比高达 61.3%, 而观花树种如白兰花和桂花较少。该结论印证了尤美子等^[31]的研究结果。榕树作为福州的市树, 在城市行道树绿化中广泛应用, 彰显了福州浓厚的“榕城”文化特色。然而, 相关研究指出, 缺乏物种多样性的植物景观不符合生态学的原则, 也在美学上有所欠缺^[32]。游惠明等^[19]研究发现, 福州市常见树种的美学评价指数依次为: 南洋楹 > 木棉 > 白兰花 > 樟树 > 羊蹄甲 > 榕树。榕属和樟属植物大多为常绿树种, 具有较强的生态功能, 但因缺乏明显的季相变化, 美学表现相对较弱。因此, 对于绿化覆盖率较高的街道, 可考虑将部分榕树、樟树等常绿树种替换为彩色叶或观花树种。在确保生态效益的前提下, 既丰富了街道的植物配置, 又提升了行人的审美体验。

绿量对城市气候状况和宜居性的改善效果已被广泛认知^[33], 但绿量规模并非越大越好。王云才等^[34]发现, 绿量需在一定取值范围内才能充分发挥其生态效益。当绿量较小时, 植被体量和群落层次不够强大, 呼吸作用大于光合作用, 限制了植被降温增湿和固碳释氧的能力; 当绿量过大时, 群落郁闭度增加, 植被叶片相互

遮蔽,在一定程度上阻碍了光合作用,从而削弱了植被的生态效益^[25]。本文的前置性研究发现,在热舒适视角下,绿量存在最优构成模式,即在 50m 缓冲半径内(面积为 7850m²),当平均单木绿量为 211m³,乔木株数为 62 株时,乔木对于环境温湿度的调控效果更接近于人体的热舒适度需求^[11]。本文中的街道、街区及城市地区的平均单木绿量分别为 351.6m³、143.7m³和 161.4m³,在占地面积 7850m²的空间范围内,乔木平均株数分别为 65 株、57 株和 58 株。由此可见,街道的平均单木绿量和乔木株数已超过绿量最优构成模式,而街区及城市地区的平均单木绿量远小于 211m³。为提高城市地区的整体生态效益,建议在现有绿量空间分布基础上,将街道内一些树冠体积较大乔木移至街区内部,同时在街区内适当增加树冠体积较大乔木的配置。

本文还发现,利用树冠投影面积和树冠投影周长这 2 个通过遥感影像可直接量化的因子,结合回归模型可以准确地计算不同地区单木绿量。街道、街区及城市地区的回归模型拟合度 R^2 分别为 0.921、0.873 和 0.882,其中街道的回归模型拟合度最高。这是因为街道内榕树占比较高,且榕树的树冠形态与绿量具有显著的相关性,因此构建的回归模型受榕树的占比及其树冠形态与绿量相关性的影响较大。相较于姚崇怀和李德玺^[1]、李露等^[35]构建的绿量与归一化植被指数(NDVI)回归模型(R^2 分别为 0.750 和 0.723),本文各回归模型拟合度 R^2 均较高。说明在利用遥感影像测算三维绿量方面,本文各回归模型在拟合精度方面具有一定优势。郑俊鸣等^[13]在针对山地公园绿量测算的研究中,构建了基于植物群落结构特征指数(如丰富度指数、树高、盖度和乔灌比等)的绿量回归模型 $Y=4.596X_{22}-0.233X_{20}-0.481$ (Y 为样地绿量; X_{22} 为植被盖度; X_{20} 为乔灌比),其拟合度 R^2 为 0.944,高于本文构建的回归模型。这是因为该模型引入了三维结构参数(乔灌比),在一定程度上提高了拟合度。然而,此类三维结构参数通常需要实地调研获取,过程繁琐耗时。而本文针对街道、街区及城市地区的不同绿量特征,基于遥感影像可直接量化的二维因子,构建了适用于不同地区的绿量模拟回归模型。一方面,本方法避免了实地调查获取三维结构参数所耗费的大量时间、人力与物力成本,可实现绿量的快速测算;另一方面,这些模型聚焦于不同地区单木绿量的模拟,通过累计单木绿量可计算地区总绿量,为绿量计算提供了兼具针对性和灵活性的解决方案。

4 结语

本文利用无人机获取高分辨率遥感影像,基于平变量模拟立体量方法测算街道、街区及城市地区的单木及总绿量,对比分析了城市不同地区的绿量特征,并利用遥感影像可直接量化因子实现了对城市不同地区单木绿量的模拟。这一测量方案为城市单木及总绿量的科学、快速估算提供了新思路和新方案,但也存在一定局限:(1)在郁密度较高且上下层植物遮挡严重的城市森林中,冠下小乔木易被忽略,通过回归模型计算的单木及地区总绿量略低于实际值;(2)本文构建回归模型的基础数据来自福建福州地区,模型的普适性在一定程度上受福州常见树种及其树冠形态参数关系模型的影响,因此该回归模型主要适用于与福州地区的常见树种较为一致的中国南方城市。后续研究拟结合三维激光雷达技术获取高精度点云数据,以提高乔木株数识别和树冠分割的精度,进一步减小绿量测算误差。同时,还需开展中国南北方城市绿量模拟方案的对比研究,为城市绿地结构优化和三维绿量的快速评测提供科学依据。

绿量指标地出现在一定程度上弥补了绿地率和绿化覆盖率等二维指标在评估三维空间绿化水平和生物量规模时的不足。尽管当前绿量指标尚未纳入现有的城市绿化测量体系,但通过进一步有针对性地实证研究和标准化,绿量将成为城市绿化评估不可或缺的重要支撑。

参考文献(References):

- [1] 姚崇怀,李德玺. 绿容积率及其确定机制. 中国园林, 2015, 31(9): 5-11.
- [2] 高吉喜,宋婷,张彪,韩永伟,高馨婷,冯朝阳. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响. 资源科学, 2016, 38(6): 1028-1038.
- [3] He C, Convertino M, Feng Z K, Zhang S Y. Using LiDAR data to measure the 3D green biomass of Beijing urban forest in China. PLoS One, 2013, 8(10): e75920.
- [4] 侯文硕,张瑶,张颖,杨菲,王洪成. 城市绿地固碳释氧效益对植物群落特征因子响应分析. 风景园林, 2024, 31(6): 55-61.

- [5] 王云才, 黄俊达. 生态智慧引导下的太原市山地生态修复逻辑与策略. 中国园林, 2019, 35(7): 56-60.
- [6] 谭瑛, 刘思, 郭苏明. 城市历史文化街区的绿量测算方法研究. 现代城市研究, 2018, 33(9): 115-124.
- [7] 邹杰, 阎广建. 森林冠层地面叶面积指数光学测量方法研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2971-2979.
- [8] Küßner R, Mosandl R. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(3): 440-447.
- [9] 陈荻, 李卫正, 孔文丽, 申世广. 基于低空高分辨影像的三维绿量计算方法——以南京林业大学校园为例. 中国园林, 2015, 31(9): 22-26.
- [10] Abdi B, Hami A, Zarehaghi D. Impact of small-scale tree planting patterns on outdoor cooling and thermal comfort. Sustainable Cities and Society, 2020, 56: 102085.
- [11] 邱瑶, 罗涛, 王琼, 蒋思雨. 夏热冬暖地区绿量构成对城市热环境的影响——以福州居住区为例. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1932-1940.
- [12] 周宏轩, 陶贵鑫, 炎欣烨, 孙婧, 吴岳. 绿量的城市热环境效应研究现状与展望. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2804-2816.
- [13] 郑俊鸣, 朱丹丹, 蒋梦莹, 方笑, 邓传远. 福州市 3 个山地公园三维绿量与其影响因子特征研究. 中国园林, 2018, 34(2): 89-93.
- [14] 周廷刚, 罗红霞, 郭达志. 基于遥感影像的城市空间三维绿量(绿化三维量)定量研究. 生态学报, 2005, 25(3): 415-420.
- [15] 周坚华, 孙天纵. 三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算. 环境遥感, 1995(3): 162-174.
- [16] 刘常富, 何兴元, 陈玮, 赵桂玲, 徐文铎. 沈阳城市森林三维绿量测算. 北京林业大学学报, 2006, 28(3): 32-37.
- [17] 李肖肖, 唐丽玉, 黄洪宇, 陈崇成, 何建国. 基于点云数据的单木三维绿量估算方法. 遥感技术与应用, 2022, 37(5): 1119-1127.
- [18] Zhou L, Li X J, Zhang B, Xuan J, Gong Y L, Tan C, Huang H G, Du H Q. Estimating 3D green volume and aboveground biomass of urban forest trees by UAV-lidar. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5211.
- [19] 游惠明, 游秀花, 陈笑玲, 王彦涛, 何东进. 福州市行道树种综合评价与分级选择. 中国城市林业, 2009, 7(1): 15-17.
- [20] 韩冬青, 宋亚程, 葛欣. 集约型城市街区形态结构的认知与设计. 建筑学报, 2020, (11): 79-85.
- [21] 肖笃宁, 高峻, 石铁矛. 景观生态学在城市规划和管理中的应用. 地球科学进展, 2001, 16(6): 813-820.
- [22] 邵钰涵, 刘滨滨. 城市街道空间小气候参数及其景观影响要素研究. 风景园林, 2016, 23(10): 98-104.
- [23] 祁艳. 街道设计引导体系构建初探——以《厦门市街道设计导则》为例. 上海城市规划, 2020(3): 109-116.
- [24] 汪小爽. 城市街道峡谷行道树覆盖下大气颗粒物空间扩散规律与调控[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [25] 杨鑫, 高雯雯, 李莎, 李冠衡. 基于遥感影像估算的北京中心城区碳储量与气候环境关联性研究. 风景园林, 2022, 29(5): 31-37.
- [26] 王琨, 王竞娴, 田朝阳, 薛思寒. 乔木覆盖率及形态特征对公园夏季微气候舒适性的调节作用——以郑州市绿荫公园为例. 中国园林, 2022, 38(11): 94-99.
- [27] 何艺, 周小成, 黄洪宇, 许雪琴. 基于无人机遥感的亚热带森林林分株数提取. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 168-176.
- [28] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 吴云东. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取. 农业工程学报, 2015, 31(5): 152-157, 159, 158.
- [29] Su W, Zhang M Z, Bian D H, Liu Z, Huang J X, Wang W, Wu J Y, Guo H. Phenotyping of corn plants using unmanned aerial vehicle (UAV) images. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2021.
- [30] 季彪俊, 孙小芳, 孙依斌. 遥感在城镇绿化植物三维绿色生物量和生态环境效应估算中的应用. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2005, 34(1): 102-107.
- [31] 尤美子, 黄晓霞, 徐伟涛, 马红艳, 赖日文. 城市道路绿带遥感绿量与地温相关性研究. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 266-272.
- [32] 段敏杰, 王月容, 谢军飞, 郭佳. 基于美景度评价法的北京城市公园植物景观美学质量评价. 科学技术与工程, 2018, 18(26): 45-52.
- [33] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 孟长来, 徐嘉. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益. 生态学报, 2013, 33(12): 3878-3887.
- [34] 王云才. 让自然做工: 自然过程主导的太原城市生态系统修复. 中国园林, 2019, 35(10): 19-23.
- [35] 李露, 周刚, 姚崇怀. 不同类型城市绿地的绿量研究. 中国园林, 2015, 31(9): 17-21.