

Research progress on carbon sequestration measurement methods for urban forests

Ling Huang Lin Zhang Kang Zhu Xianghan Pang Erhao Pan

Nanning College of Technology, Guilin, Guangxi, 541006, China

Abstract

Advances in Measurement Methodologies for Urban Forest Carbon Sequestration Urban forest carbon sinks represent a crucial pathway for achieving the “Dual Carbon” goals. This paper systematically reviews three methodological approaches: carbon flux monitoring, biomass estimation, and carbon stock measurement, with particular focus on technological innovations in multi-source data fusion for urban environments. Research demonstrates that integrating ground observations, remote sensing, and modeling simulations to establish a “point-area-volume” collaborative measurement system can significantly enhance the accuracy of urban forest carbon sink assessments. Future efforts should prioritize standardization of methodologies and improvement of monitoring-reporting-verification systems to provide scientific support for urban carbon neutrality.

Keywords

urban forest; carbon sink measurement; multi-source data fusion; carbon neutrality

城市森林碳汇计量方法研究进展

黄玲 张琳 朱康 庞翔瀚 潘尔豪

南宁理工学院, 中国 · 广西 桂林 541006

摘 要

城市森林碳汇是实现“双碳”目标的重要途径。本文系统综述了碳通量监测、生物量估算和碳储量计量三类方法, 重点探讨了城市环境下多源数据融合的技术创新。研究表明, 通过整合地面观测、遥感和模型模拟, 构建“点-面-体”协同计量体系, 可显著提升城市森林碳汇估算精度。未来需加强方法标准化研究, 完善碳汇监测-报告-核证体系, 为城市碳中和提供科学支撑。

关键词

城市森林; 碳汇计量; 多源数据融合; 碳中和

1 引言

在全球气候变化的大背景下, 城市森林碳汇作为陆地下垫面生态系统中碳循环的重要组成部分, 近年来受到了广泛关注。城市森林作为城市的重要生态功能区, 为城市生态环境提供了多种生态服务, 不仅能够提升城市生物多样性, 在增强区域小气候稳定性, 减少局部空气污染, 降低城市碳排放方面也发挥着重要作用。

近年来, 城市森林在固碳方面的作用逐渐受到重视, 《2020 年全球森林资源评估报告》指出城市森林每年的碳汇量是全球碳排放量的 0.75%。其中亚洲城市森林碳汇量约为全球城市森林碳汇的 48%。因此准确计量城市森林碳汇、

深入了解其影响因素并探索有效的提升策略, 对于推动城市可持续发展、助力实现“双碳”目标具有重要意义。本文通过对城市森林碳汇的研究进展、碳汇计量方法进行综述, 旨在为该领域的进一步研究和实践提供参考。

2 城市森林碳汇功能概述

2.1 城市森林的定义与生态定位

城市森林是指以城市为载体, 在城市建成区范围内以各种树木为主体, 包括灌、草、水域等成分及其所处的人文自然环境所构成的森林生态系统, 以实现森林景观与人文景观的有机结合, 促进城市、环境、居民的和谐共存, 推动城市的可持续发展^[1]。城市森林是一种新型的森林生态单元, 主要分布于高度受到人类作用的区域, 呈高度破碎化分布, 这也为城市森林碳汇的估算带来一定的挑战。

2.2 碳汇过程及机制

碳汇是指植被吸收空气中的无机碳, 通过光合作用将其转化为有机碳固定在植被或土壤中的过程, 是一种动态变

【基金项目】广西高校中青年教师基础能力提升项目(项目编号: 2022KY1656)。

【作者简介】黄玲(1986-), 女, 工程师, 从事资源环境遥感研究。

化的过程, 植被在光合作用中不仅吸收也释放二氧化碳, 当植被的二氧化碳吸收量大于释放量时, 表现为碳汇, 反之则为碳源。

城市森林碳汇主要吸收来自工业生产、人口流动及生产所产生的 CO_2 , 城市中的土壤及植被起到主要的固碳作用, 由于土壤的固碳量较固定, 植被在生长过程中通过光合作用所吸收二氧化碳的作用就显得尤为关键。

2.3 城市森林碳汇的特殊性

不同类型的植被, 其固碳能力存在显著差异。乔木通常具有较大的生物量和更高的光合效率, 在城市森林生态系统中, 乔木的碳吸收和碳汇能力较强, 碳汇能力较为突出。灌木和草本植物的固碳能力相对较弱, 但乔、灌、草的能够丰富垂直森林生态结构空间上植被的层次结构, 提高生态系统的稳定性, 共同增强城市森林的固碳功能。

城市森林的固碳能力是评估其碳汇功能的核心指标, 可通过多维度方法进行量化测算, 主要包括: 基于碳通量的动态监测、基于生物量的估算方法, 以及通过碳密度和碳储量计算碳汇效率及空间分布。

3 碳通量动态监测方法

森林碳通量基于光合作用和生态系统呼吸作用的复合过程, 在单位时间内测量森林生态系统与大气之间的碳交换量, 一般用 CO_2 通量来衡量, 单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}$ 。通过直接监测大气与植被的 CO_2 交换 (如涡度相关法) 量化生态系统的净碳吸收 (NEE), 适用于揭示碳汇的短期动态机制。相应的典型通量组分包括总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP)、净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP)、净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP)、净生物群系生产力 (Net Biome Productivity, NBP) 等, 其中在数值上 NBP 相当于全球变化中的陆地碳源/汇的概念基本一致^[2]。虽然碳通量观测获取的是碳汇的动态过程, 而碳储量是碳汇的静态存储量, 两者间相互转换的较为困难但 Nowak 等结合涡度相关与树木普查数据, 考虑道路粉尘对光合的抑制建立通量-储量转换系数矩阵^[3]。随着城市化进程发展, 明确自然森林与城市森林碳循环特征的异同, 对完善全球碳收支评估具有重要意义。

3.1 观测技术

在研究中碳通量的计算方法包括通量观测、遥感模型估算等。通量观测以涡度相关法和箱式法为主要观测手段, 遥感与模型估算方法包括光能利用率模型和过程模型模拟。

①通量观测。

涡度相关技术在全球自然森林中已形成标准化观测网络 (FLUXNET), 其 $0.1\text{--}1\text{ km}^2$ 的空间代表性在均质化生态系统中表现良好^[4]。但城市环境中, 建筑湍流可使 NEE 测量误差增至 15%^[5], 需开发城市特定的湍流修正模型^[6]。

箱式法通过密闭采样系统测量植被或土壤局部的 CO_2 交换速率。虽然空间代表性有限, 但其操作简便, 适用于不同树种光合特性比较及土壤呼吸测定。针对城市森林破碎化特征, 移动式箱式系统 (Picarro G4301) 结合 GIS 定位技术显著提升了离散植被的采样效率^[7]。

②遥感模型估算。

基于遥感的光能利用率模型利用植被指数、光合有效辐射等参数估算初级生产力 (GPP)。应用 MODIS 数据开发出 GPP 产品在自然森林中空间分辨率 (1 km) 基本满足需求^[8], 但在城市环境中需融合更高分辨率的光学影像或 LiDAR 数据实现单株识别^[9]。过程模型则通过耦合光合-呼吸-物候等生态过程, 模拟生态系统碳循环。Xing 等以气候因子 (温度、降水、辐射) 为核心驱动变量, 同时整合植被生理参数 (LAI、物候) 和土壤特性 (质地、湿度) 等多维数据, 基于 BEPS 模型模拟自然森林碳循环^[10]。而城市版本需增加人为热辐射参数^[11]。在此基础上 i-Tree 模型引入道路粉尘沉降系数, 使洛杉矶城市 GPP 估算偏差降低 8.7%^[12]。新加坡智慧城市项目通过物联网实时数据同化, 构建了动态碳汇预测系统^[13]。

4 生物量估算方法

4.1 直接测量法

生物量法是城市森林碳汇计量的重要技术手段, 主要包括直接测量法和间接测量法两类方法体系。直接测量法通过破坏性采样获取树木各器官的生物量数据, 获取时需要按照国际树木测量标准选择标准木进行全株解析, 分别测定树干、枝、叶、根等器官的鲜重, 在实验室采用恒温烘干法测定干重, 并使用元素分析仪进行有机碳含量测定。该方法虽然具有较高精度 (误差通常小于 5%), 但由于其破坏性强、成本高等特点, 主要作为间接测量法的基准数据使用, 较难应用于大面积估算。

4.2 间接测量法

间接测量法通过建立异速生长方程来估算生物量, 在城市环境中, 需要对传统方程进行修正, 通常引入冠幅变量和修剪影响系数等参数。在实际应用中, 往往采用多源数据融合的策略, 结合地面调查数据和遥感技术。地面调查主要包括每木检尺等传统方法, 遥感技术通过融合多源卫星遥感数据、机载激光雷达和地面观测网络, 构建了空-天-地一体化的监测体系。其中光学遥感可大范围获取植被的冠层信息, 监测植被覆盖动态, 激光雷达刻画森林三维结构, 地面传感器则提供关键参数标定。这种多尺度协同观测方式, 不仅实现了森林生物量和碳储量的空间化估算, 还能通过时序分析揭示固碳能力的动态变化规律。在城市森林生物量估算研究中, 北京市采用 Landsat 8 OLI 影像数据和 ALOS-2 PALSAR-2 数据建立了不同树种生物量的回归模型取得了较好的效果^[14]。新加坡的研究充分利用行道树数据库与 TLS

扫描数据,开发了适用于热带城市树种的回归方程^[15]。结合多源数据的地面-遥感协同方法是当前城市森林生物量估算的主要发展方向,为城市绿地碳汇功能评估和低碳规划提供了重要的数据基础。

5 碳密度与碳储量计量技术

5.1 基于遥感的反演方法

碳密度与碳储量计算是评估生态系统固碳能力的关键,其核心在于将生物量通过含碳率(通常 45%~50%)转换为碳指标。生物量反映植被有机物质总量,而碳密度(单位面积碳质量)和碳储量(区域碳总量)则是碳汇功能的直接体现。对于碳密度与碳储量的计算,主要依托遥感技术和生态模型,在遥感方面,光学遥感(Landsat/Sentinel)通过植被指数、纹理特征等多为参数反演生物量,激光雷达(LiDAR)精准获取三维结构参数,微波遥感(SAR)实现全天候观测,结合多源数据,不断提升估算精度。

5.2 生态模型应用

生态模型发展迅速,InVEST 模型通过整合多源遥感数据和生态系统服务评估框架,实现了碳储量的空间显式化计算;BIOME-BGC 等过程模型则通过耦合光合-呼吸等生理生态过程,动态模拟碳循环机制。对于碳储量的研究也不再仅局限于生态功能,而是深度融入碳汇经济发展体系。在全球碳达峰、碳中和背景下,碳储量计量已成为碳汇交易的核心基础。在中国,碳储量研究正深度融入“双碳”战略实施,通过建立区域性碳汇交易试点(如福建林业碳汇项目),探索生态产品价值实现路径。未来,碳储量研究将进一步与绿色金融、生态补偿等政策工具创新结合,为全球气候治理和生态文明建设提供科学支撑。

6 发展与展望

在全球“双碳”战略目标引领下,城市森林碳汇正成为实现碳中和的关键环节。作为城市生态系统的重要组成部分,城市森林不仅能够提升碳汇能力,还能显著改善城市环境质量。然而,城市森林碳储量计量研究面临着诸多独特挑战,城市森林的高度异质性往往导致模型缺乏普适性。这种特殊性要求我们必须对现有计量方法进行针对性改进。要实现准确可靠的森林碳储量估算,通过有机整合地面实测数据的高精度优势、遥感反演技术的广覆盖特点以及模型模拟的系统性特征,形成“点-面-体”相结合的多尺度协同的计量体系。这种综合方法不仅能有效解决单一技术的局限性,还能显著提升估算结果的准确性,从而为“双碳”目标的实现提供更加科学可靠的数据支撑和技术保障。

参考文献

- [1] 王成,蔡春菊,陶康华.城市森林的概念、范围及其研究[J].世界林业研究,2004(2):23-27.
- [2] YANG Y, SHI Y, SUN W, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. Science

China Life Sciences, 2022, 65(5): 861-895.

- [3] NOWAK D J, GREENFIELD E J, HOEHN R E, et al. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States[J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 229-236.
- [4] BALDOCCHI D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future[J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 479-492.
- [5] HELFTER C, TREMPER A H, HALIOS C H, et al. Spatial and temporal variability of urban fluxes of methane, carbon monoxide and carbon dioxide above London, UK[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(16): 10543-10557.
- [6] VELASCO E, ROTH M. Cities as Net Sources of CO₂: Review of Atmospheric CO₂ Exchange in Urban Environments Measured by Eddy Covariance Technique[J]. Geography Compass, 2010, 4(9): 1238-1259.
- [7] HENNINGER S, KUTTLER W. Methodology for mobile measurements of carbon dioxide within the urban canopy layer[J]. Climate Research, 2007, 34: 161-167.
- [8] RUNNING S W, NEMANI R R, HEINSCH F A, et al. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production[J]. BioScience, 2004, 54(6): 547.
- [9] ALONZO M, BOOKHAGEN B, MCFADDEN J P, et al. Mapping urban forest leaf area index with airborne lidar using penetration metrics and allometry[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 162: 141-153.
- [10] XING X, WU M, ZHANG W, et al. Modeling China's terrestrial ecosystem gross primary productivity with BEPS model: Parameter sensitivity analysis and model calibration[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 343: 109789.
- [11] YAO R, WANG L, GUI X, et al. Urbanization Effects on Vegetation and Surface Urban Heat Islands in China's Yangtze River Basin[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 540.
- [12] MCPHERSON E G, BERRY A M, VAN DOORN N S. Performance testing to identify climate-ready trees[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 29: 28-39.
- [13] DENG T, ZHANG K, SHEN Z J (Max). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021, 6(2): 125-134.
- [14] ZHU Y, FENG Z, LU J, et al. Estimation of Forest Biomass in Beijing (China) Using Multisource Remote Sensing and Forest Inventory Data[J]. Forests, 2020, 11(2): 163.
- [15] STOVALL A E L, VORSTER A, ANDERSON R, et al. Developing nondestructive species-specific tree allometry with terrestrial laser scanning[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2023, 14(1): 280-290.