北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

融合长时序遥感和地面实测的北京城市森林碳汇功能多尺度评估及其影响因素

牛可 孙妍 程于桑 王骁扬 毕英东 姜志逸 戴子云

Multi-scale assessment of carbon sequestration function of urban forests in Beijing and its influencing factors by integrating long-time-series remote sensing and field survey

Niu Ke, Sun Yan, Cheng Yusang, Wang Xiaoyang, Bi Yingdong, Jiang Zhiyi, Dai Ziyun

引用本文:
牛可, 孙妍, 程于桑, 王骁扬, 毕英东, 姜志逸, 戴子云. 融合长时序遥感和地面实测的北京城市森林碳汇功能多尺度评估及其影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):26–38. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250120
Niu Ke, Sun Yan, Cheng Yusang, Wang Xiaoyang, Bi Yingdong, Jiang Zhiyi, Dai Ziyun. Multi–scale assessment of carbon sequestration function of urban forests in Beijing and its influencing factors by integrating long–time–series remote sensing and field survey[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):26–38. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250120

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250120

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

北京市森林碳汇能力评价
Evaluation of forest carbon sequestration capacity in Beijing
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 108–119. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220436

城市公园树木安全风险评估
Tree safety risk assessment in urban parks: taking Beijing Zoo as an example
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 128–138. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210200

基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素
Driving factors of carbon sink in natural *Larix gmelinii* forests based on structural equation models
北京林业大学学报, 2024, 46(9): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230284

全球森林碳汇功能评估研究进展
Review on the evaluation of global forest carbon sink function
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220242

中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析
Coupling and long–term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220257

基于NbS的北京市乔木林固碳能力分析
Carbon sequestration capacity of Beijing arbor forest based on NbS
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200145

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250120

融合长时序遥感和地面实测的北京城市森林碳汇功能多尺度评估及其影响因素

牛 可[1] 孙 妍[1] 程于桑[1] 王骁扬[1] 毕英东[1] 姜志逸[1] 戴子云[2]
（1. 北京林业大学林学院，城市林业研究中心，森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083；
2. 北京市园林绿化科学研究院，北京 100102）

摘要:【目的】城市森林作为城市生态系统的重要组成部分，具有巨大的碳汇潜力。本研究旨在对受城市化影响最严重的北京中心城区进行大样本量的城市森林调查，融合多源数据开展长时间序列多尺度的碳储量动态变化及其影响因素研究，以期为我国城市林业管理政策的制定提供重要参考。**【方法】**以北京市为研究对象，在 2023—2024 年夏季对中心城区典型城市公园进行样地调查，结合多种遥感数据比较分析北京市五环内、老城区及老城区典型城市公园的碳储量；基于 NDVI–碳密度模型对近 10 年北京市不同空间尺度城市森林的碳汇潜力进行评估，利用多个城市公园的土地利用分类图，探究城市生态系统景观结构对碳密度的影响。**【结果】**(1)本研究实地调查共 118 个样地，碳密度最高的是地坛公园（106.4 Mg/hm^2，以 C 计，下同），碳密度最低的是景山公园(22.4 Mg/hm^2)。(2)对比不同空间分辨率影像碳密度估算结果，中高分辨率遥感影像（Sentinel-2A 和 Spot-6）对碳密度评估具有显著优势；低分辨率影像（Landsat-8）会不同程度地低估城市森林碳密度，且低估程度随着空间尺度的缩小而增加，公园尺度下被低估的尤为明显。(3)基于 Sentinel-2A 影像估算产品，北京市近 10 年（2015—2024）城市森林碳储量稳步增长，各空间尺度碳储量增幅显著。其中五环以内区域尺度的城市森林碳汇潜力最大，2024 年碳储量约为 2015 年的 1.9 倍。(4)在城市公园尺度，景观组成和构型对城市森林碳储量有显著影响，基于 Sentinel-2A 影像估算产品的城市公园碳密度与斑块密度、平均欧式最近邻域距离、景观分离度、香农多样性指数显著负相关。**【结论】**北京近 10 年城市森林碳汇能力在不同时空尺度呈现明显区别，北京市五环以内区域尺度的城市森林碳汇潜力最大，表明北京市森林碳储量稳步增长，增汇潜力不容忽视。大都市区的城市森林碳汇潜力评估需使用更高空间分辨率的遥感影像，才能揭示景观结构对城市森林碳储量的影响，融合高分辨率的多源数据进行超大城市核心区森林碳汇潜力研究可以为我国其他快速城市化区域的城市森林提质增效建设与管理提供重要参考。

关键词：城市林业；碳汇；景观结构；多尺度；北京
中图分类号：S731.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0026−13
引文格式：牛可，孙妍，程于桑，等. 融合长时序遥感和地面实测的北京城市森林碳汇功能多尺度评估及其影响因素［J］. 北京林业大学学报，2025，47(12)：26−38. Niu Ke, Sun Yan, Cheng Yusang, et al. Multi-scale assessment of carbon sequestration function of urban forests in Beijing and its influencing factors by integrating long-time-series remote sensing and field survey［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 26−38.

Multi-scale assessment of carbon sequestration function of urban forests in Beijing and its influencing factors by integrating long-time-series remote sensing and field survey

Niu Ke[1] Sun Yan[1] Cheng Yusang[1] Wang Xiaoyang[1] Bi Yingdong[1] Jiang Zhiyi[1] Dai Ziyun[2]

收稿日期: 2025−04−09 **修回日期:** 2025−06−19
基金项目: 北京市自然科学基金项目（8222067），国家自然科学基金项目（41801058），北京林业大学“5·5 工程”科研创新团队项目（BLRC2023B06），北京高校大学生创新创业训练项目（X202310022049）。
第一作者: 牛可。主要研究方向：城市森林生态系统服务权衡与协同。Email：niukkkeee@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 孙妍，副教授。主要研究方向：区域城市扩张与生态系统服务评价，城市森林碳汇监测与评价，城市森林人居健康效应评估。Email：yanearth@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

(1. School of Forestry, Institute of Urban Forestry, Key Laboratory for Silviculture and Forest Conservation of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Research Institute of Landscape Architecture and Greening, Beijing 100102, China)

Abstract:［**Objective**］As an important component of urban ecosystems, urban forests possess significant carbon sequestration potential. This study aims to conduct a large-scale field survey of urban forests in the central area of Beijing, which is most severely affected by urbanization, and to integrate multi-source data to investigate the long-term, multi-scale dynamics of carbon stocks and their influencing factors, intending to provide a crucial scientific reference for the formulation of urban forestry management policies in China.［**Method**］Taking Beijing as the study area, we conducted a field survey of typical urban parks in the central area during the summers of 2023 and 2024. We combined multiple remote sensing data to comparatively analyze the carbon stocks within the Fifth Ring Road, the old urban area, and typical urban parks within the old urban area. Based on the NDVI-carbon density model, we assessed the carbon sequestration potential of urban forests at different regional scales in Beijing over the past decade. Using land use classification maps of multiple urban parks, we investigated the influence of urban ecosystem landscape structure on carbon density.［**Result**］(1) A total of 118 sample plots were investigated in the field, with the highest carbon density found in Ditan Park (106.4 Mg/ha) and the lowest in Jingshan Park (22.4 Mg/ha). (2) A comparison of carbon density estimation results from imagery with different spatial resolutions reveals that medium- and high-resolution remote sensing imagery (Sentinel-2A and Spot-6) offers significant advantages for carbon density assessment. Low-resolution imagery (Landsat-8) tend to underestimate urban forest carbon density to varying degrees, and the degree of this underestimation increases as the spatial scale decreases, with the effect being particularly pronounced at the park scale. (3) Based on estimation products derived from Sentinel-2A imagery, the carbon sequestration capacity of Beijing's urban forests has continuously enhanced over the past decade (2015–2024). The increase in carbon storage is significant across all spatial scales. Among these, the urban forests within the 5th Ring Road exhibit the greatest carbon sequestration potential, with their carbon stock in 2024 being approximately 1.9 times that of 2015. (4) At the urban park scale, landscape composition and configuration significantly affected urban forest carbon stocks. Urban park carbon density, based on Sentinel-2A image estimation products, was significantly negatively correlated with PD, ENN_MN, DIVISION, and SHDI.［**Conclusion**］Beijing's urban forest carbon sequestration capacity has shown significant variations across different spatiotemporal scales over the past decade. The greatest carbon sink potential was observed at the regional scale within the Fifth Ring Road, indicating a steady increase in Beijing's forest carbon stock and a potential for sink enhancement that should not be overlooked. Assessing the carbon sink potential of urban forests in metropolitan areas requires higher spatial resolution remote sensing imagery to reveal the influence of landscape structure on carbon stocks. Research on the carbon sink potential of forests in the core areas of megacities, achieved by integrating multi-source data for spatially explicit analysis, can provide a crucial reference for the quality improvement, efficiency enhancement, and management of urban forests in other rapidly urbanizing regions of China.

Key words: urban forestry; carbon sink; landscape structure; multiple scale; Beijing

自工业革命以来，全球城市化进程不断推进，城市虽只占地球陆地不足 3% 的面积，却产生了全球 78% 的二氧化碳排放量[1]，气候变化影响下城市可持续发展问题日益严峻，高温热浪、极端降水及重污染天气愈发频发和剧烈[2]。作为城市生态系统的重要组成部分，城市森林不仅是主要的碳储存者，更因其巨大的固碳潜力，成为城市中最重要的碳汇载体之一[3−4]。美国环境保护署（EPA）估算，美国城市森林每年吸收的二氧化碳约为 2.30×10^7 t，相当于大约 50 万辆汽车每年的排放量；伦敦森林的碳汇能力在 2010—2014 年期间估算为每年吸收 2.00×10^6 t 二氧化碳，其中城市森林约占碳汇总量的 75%[5]。随

着我国城市化的发展和绿化技术的提高，城市森林覆盖率、绿化树木数量迅速增加，截至 2023 年底，北京市的森林覆盖率已达 44.9%，其中，城市绿化覆盖率达到 49.8%。城市森林已成为吸收城市碳排放的重要功能区，而这种固碳方式作为一项极其重要的自然气候解决方案，在维持城市生态系统弹性过程中发挥着关键作用[6]。

我国陆地生态系统碳汇能力易被低估，这可能与碳汇评估方法密切相关[7]。目前城市森林碳汇功能评估方法主要集中于模型估算法、森林清查资料法、遥感影像与实地调查相结合法[8]。每种方法的优缺点不同，模型估算法对于不同地区模型参数的获取存在较大的困难；森林清查资料法较为准确，但是耗费大量时间和资源，特别是在大尺度下，不适合广泛应用；遥感影像法具有信息量大、观测范围广、精度高、速度快以及实时性和动态性等特点，是植被碳储量研究的有效手段。例如 Landsat 系列在全球范围内以及我国的森林资源清查等宏观区域中得到了广泛应用[9]。Spot 系列则凭借其更高的空间分辨率，能够更精细地刻画地表景观结构[10]。而新一代的 Sentinel-2 卫星，凭借其丰富的光谱信息（尤其是红边波段）和优化的时空分辨率，为提升城市森林碳储量的估算精度提供了新的契机[11]。随着卫星遥感水平的提高，国内外学者利用多源数据（包括光学、激光雷达和基于微波的方法）在估算城市森林碳储量方面展开研究，并证明了其有效性。国际上，黄从红等[9]利用纽约州锡拉丘兹的 Landsat TM 图像，结合地面样本和美国林务局的城市树木模型，量化了城市树木的地上碳储量，并发现归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）与生物量之间存在显著的一致性。Rao 等[12]将遥感数据（包括基于 LiDAR 的树高估算）与实地观测数据相结合，绘制了 1 m 空间尺度下的冠层覆盖和地上树木碳储量，并对波士顿市的树冠覆盖率和碳汇潜力进行了估算。国内研究方面，Tao 等[13]基于 1986—2011 年一系列 Landsat TM 影像的精确空间数据集和 InVEST 模型对中国常州城市生物量和土壤碳储量进行估算，发现单位面积陆地覆盖碳储量随着城市发展强度的增加而减少。Ma 等[2]采用 i-Tree Eco 和 Kriging 插值法对北京市城市森林中树木的碳储存和固碳能力进行了量化和制图，发现北京市城市森林的碳储量和固碳模式具有明显的空间异质性，存在明显的高值区和低值区，且具有显著的统计学意义。Qin 等[14]在 2022 年创新地将 ICESat-2 激光雷达数据与 GF-2 高分二号影像相结合估算碳密度，发现与仅使用被动遥感数据的研究相比，这一方法估计的碳储量值更大，表明整合星载激光雷达和光谱数据可以提高对城市树木碳储量的估算精度。Li 等[15]利用高分辨率遥感影像（0.8 m）和 1 307 个野外调查样本对北京市不同类型的城市森林地上碳储量进行估算，发现绿化带和绿楔比建成区具有更高的蓝绿空间覆盖率和较大的蓝绿斑块，但它们在城市森林中的碳密度较低。

对于城市森林碳汇而言，城市区域高度异质性，城市树种分布格局相对复杂，城市森林景观结构破碎化程度高，这导致城市森林碳汇的时空变化特征数据的精确获取和可视化分析及其影响机制研建仍存在一定难度[16]。根据城市森林样地调查并结合多源遥感数据在不同尺度进行比较分析是城市森林碳储量研究的重要途径，但目前已有的研究多集中于某一时间点的碳储量研究，对大都市区城市森林碳汇时空特征及其影响机制的认识仍然十分匮乏，尤其是基于长时间序列、大样本量、超大城市核心区样地调查数据的定量分析。北京作为我国的首都和国际大都市，中心城区城市化程度高，其城市森林建设已进入从规模扩张向提质增效转型的新阶段。李思慧等[17]通过换算因子法计算北京市第 7～9 次森林碳储量，发现 3 次清查期间碳储量都在增加，并预计到 2045 年，北京森林碳储量将会达到 25.13 Tg（以 C 计，下同），为 2024 年碳储量的 1.6 倍，碳储量年均增加 0.3 Tg，碳密度也会明显增加，达到 44.29 Mg/hm^2，北京市森林碳汇潜力巨大。对北京市城市核心区森林碳汇潜力的研究，可为我国其他快速城市化区域的城市森林可持续发展建设和管理提供重要借鉴。尽管目前已有很多研究对北京森林碳储量进行分析，但研究区多为包括远郊山地的整个北京市，针对受城市化影响最严重的北京中心城区，尚缺乏大样本量的城市森林调查，以及融合多源数据的长时序多尺度碳储量动态变化、碳汇潜力和影响因素研究。因此，本研究拟以北京市为例，基于高度城市化区域的 118 个实地城市森林样方调查，结合不同空间分辨率尺度下 3 种遥感影像（Spot-6、Sentinel-2A 和 Landsat-8）的多期数据（2015 年、2019 年和 2024 年），对北京城市生态系统 3 种不同空间尺度（五环内中心城区、二环内老城区及其典型城市公园）碳储量进行空间清晰的定量分析，并对近 10 年（2015—2024 年）不同时空尺度的城市森林碳汇能力进行评估，探究景观组成和构型对超大城市核心区城市森林碳储量的影响。研究结果将揭示北京大都市区城市森林固碳功能的多尺度时空变化特征及其景观影响因素，为高度城市化区域的城市森林碳汇功能评估提供方法支撑，对于我国其他快速城市化区域的城市林业

管理具有重要的借鉴意义。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

北京市(39º28′～41º25′N, 115º25′～117º30′E)地处我国华北平原西北部，西、北、东北被燕山环抱，包括 16 个区，行政面积约 16 807 km^2，五环内面积约为 668.4 km^2，其中老城区(东城、西城)面积为 91.37 km^2。北京市的海拔较低，地处平原与山地的交界处，以暖温带大陆性季风气候为主。春季干旱，夏季炎热潮湿，秋季天空晴朗，冬季寒冷干燥。北京年无霜期约 186 d，年平均气温 10 ℃，年平均降水量 600 mm。国槐(*Styphnolobium japonicum*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、洋白蜡(*Fraxinus pennsylvanica*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)等为北京市典型乡土树种，本地种占全部物种的 70%以上；灌木中月季(*Rosa chinensis*)、紫叶李(*Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’)、大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)、海棠(*Malus spectabilis*)等利用率较高；草坪草中以早熟禾(*Poa annua*)、紫花地丁(*Viola philippica*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)等最为常用，耐寒抗旱，适应北京干燥气候及城市环境。且北京古树名木居多，如天坛古柏、颐和园古银杏等，构成历史文化载体，兼具生态与景观价值。2023 年北京的城市绿化覆盖率和绿地率分别达到了 49.80% 和 47.28%，人均公共绿地面积和公园绿地面积分别为 43.11 m^2 和 16.90 m^2。2000—2020 年，北京市经历了快速的城市扩张和社会经济发展，国内生产总值从 2000 年的 3 277.80 亿人民币增加到 2020 年的 36 102.60 亿人民币，总人口也从 1 381.9 万急剧增加到 2 189.3 万[18−19]。北京不断致力于生态经济和谐发展以及“双碳”目标的实现，2010—2020 年，北京市 CO_2 排放量总体呈下降趋势，减少了 27.8%[20]。1985—2020 年北京城区固碳量约 10.34 万 t[21]。截至 2020 年底，北京市的森林蓄积量增加到 2.52×10^4 m^3，森林覆盖率达到 44.4%，森林年碳汇量为 7.80×10^6 t[22]。

1.2　研究方法和数据来源

1.2.1　城市森林地面调查

1.2.1.1　抽样调查样方分布

为对比验证多尺度遥感影像用于估算城市森林碳储量的准确性，本研究对目前北京市城市核心区森林碳储量展开实地抽样调查。考虑到面积较小的公园碳储量不高，因此以公园面积作为筛选指标，排除面积小于 10 hm^2 的公园，最终选择在高度城市化区域空间分布中具有代表性且面积较大的 15 个城市公园作为实地调查对象，各城市公园概况见表 1。2023—2024 年夏季对选取的 15 个城市公园，采取

表 1　研究选取的北京城市公园概况

Tab. 1　Overview of Beijing city parks selected for the study

公园名称	样方数量	所在城区	面积/hm^2	公园类型	植被组成
五棵松公园	5	海淀区	11.0	综合性公园	油松，白皮松，洋白蜡，毛白杨，旱柳，垂柳，圆柏，碧桃，银杏，丁香，金银木
景山公园	5	西城区	26.6	文化遗址公园	桧柏，油松
天坛公园	10	东城区	273.0	文化遗址公园	银杏，圆柏，毛白杨，白蜡，油松，侧柏，栾树，垂柳，山桃
永定门公园	7	东城区	17.3	文化遗址公园	银杏，国槐，油松，白皮松，樱桃李，紫叶李，海棠香椿，栾树
陶然亭公园	6	西城区	52.1	综合性公园	国槐，圆柏，侧柏，黄栌，山桃，华山松，丁香，杏，金银木，毛白杨，美桐，苹果，油松，梧桐，白皮松，龙爪槐，海棠，毛泡桐，榆叶梅
玉渊潭公园	12	海淀区	136.7	综合性公园	白杨，银杏，海棠，白皮松，圆柏，国槐，旱柳，山桃，黑杨，垂柳，白蜡，樱花，构树，侧柏，西府海棠
日坛公园	6	朝阳区	20.6	文化遗址公园	国槐，栾树，油松，圆柏，元宝枫，胡桃，白杜，侧柏，黑桑，黄栌，银杏
地坛公园	5	东城区	30.6	文化遗址公园	侧柏，榆树，五角枫，法桐，杏，腊梅，流苏，油松，海棠，丁香，毛白杨，圆柏
青年湖公园	5	东城区	17.6	综合性公园	垂柳，樱桃李，圆柏，栾树，海棠，国槐，毛白杨，山楂，七叶树，法桐，白蜡，雪松，油松，银杏，云杉
庆丰公园	5	朝阳区	9.7	文化遗址公园	云杉，白蜡，国槐，白皮松，元宝枫，油松，白皮松，银杏，银白杨，黄栌，紫叶桃，紫叶李，鹅掌楸
团结湖公园	5	朝阳区	11.7	综合性公园	龙爪槐，西府海棠，雪松，圆柏，油松，桃树，垂柳，毛白杨，白蜡，紫叶李，银杏，胡桃，元宝枫，玉兰
朝阳公园	30	朝阳区	285.1	综合性公园	银杏，圆柏，油松，毛白杨，五角枫，白蜡，刺槐，垂柳，樱桃李，圆柏，山桃，金银木，榆树，国槐，白蜡，水杉，紫叶李
海淀公园	5	海淀区	34.0	综合性公园	旱柳，圆柏，毛白杨，油松，栾树，一球悬铃木，紫叶李，国槐
太阳宫公园	5	朝阳区	59.0	社区公园	油松，白蜡，垂柳，侧柏，圆柏，美桐，楸树，栾树，垂柳，国槐，樱桃李，银杏，白蜡，刺槐，山桃
将府公园	7	朝阳区	58.0	文化遗址公园	国槐，毛白杨，栾树，白蜡，旱柳

随机抽样的方法进行植被调查，在每个公园随机选取多个 30 m × 30 m，面积为 900 m^2 的样方。城市生态系统中绿地景观存在异质性，本研究中调查地块大部分为规则的方形，不规则形状的地块根据当地条件进行了调整，以保证调查面积一致(900 m^2)。由于城市地区 97% 的碳储量与乔木有关，灌木和草本植物对碳储量的贡献相对较小[23]，因此本研究主要关注城市乔木的地上碳储量估算。在每个样方内收集树木的以下信息：树种、胸径(1.3 m，胸径 > 5 cm)、树高、冠幅等因子，将调查结果记录到测定表格上，并对样地拍照记录。本研究共设置 118 个调查样方，样地分布如图 1。

1.2.1.2 实地碳密度估算

为提高实地生物量估算的准确性，选择与研究区域地理位置相近的生物量异速生长方程[10]来估算每棵被调查树木的生物量。每个树种的异速生长方程不同，将调查树木的胸径或胸径和树高代入每个树种的公式来计算。通过将茎、枝、叶生物量方程的计算结果相加得到该树的地上生物量。例如将样地中侧柏的胸径和树高数据代入侧柏的茎、枝、叶生物量方程，相加求和得到侧柏的地上生物量。有的树种没有对应的茎、枝、叶生物量方程，则直接使用与地上总生物量相关的方程来计算地上生物量。如果找不到特定物种的异速生长方程，则使用同一属或同一科的物种生长方程。如果没有找到属或科的方程，则使用由 Jo 和 McPherson[24]推导出的阔叶或针叶树种通用异速生长方程计算。最后，将单个树木生物量乘以 0.5 转化为碳储量。每个样方的平均碳密度(D)计算公式为

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{A} \tag{1}$$

式中：C_i 为该样方中第 i 个树种的碳储量；n 为样方中的树种数；A 是样方的面积，相当于 900 m^2。

1.2.2 多源遥感数据获取及碳储量估算

1.2.2.1 多源数据获取及 NDVI 提取

为探究不同分辨率影像在估算城市森林碳储量和碳汇功能上的差异，本研究在分辨率尺度上采用 Sentinel-2A(10 m，中分辨率)、Landsat-8(30 m，低分辨率)和 Spot-6(6 m，高分辨率)3 种遥感影像。Sentinel-2A L2A 级 2015、2019 年和 2024 年 3 期影像获取于欧洲航天局 ESA(https://browser.dataspace.copernicus.eu/)，欧洲航天局对外发布的 L1C 数据仅是经过几何校正的正射影像，L2A 数据则是使用 Sen2cor 插件对 L1C 级数据进行辐射校准和大气校正后的数据，因此无需再额外预处理。但 Sentinel-2A 遥感影像的空间分辨率在各个波段不完全相同，因此需使用 SNAP 软件(Sentinel 应用平台，由 ESA 开发的开源软件)将影像重新采样至 10 m，将处理后的波段数据保存为 ENVI 格式。同年 3 期 Landsat-8 影像获取于 USGS 网站(https://earthexplorer.usgs.gov/)。将 Sentinel 和 Landsat6 幅影像在 ENVI5.6 软件中进行波段融合和区域裁剪，得到不同空间尺度的遥感图像。2014 年老城区 Spot-6 影像获取于已发表文献[10]。

植被指数是森林碳储量估算的最常用的特征变量，其基于植被在不同波长下的光谱对比特征，是对

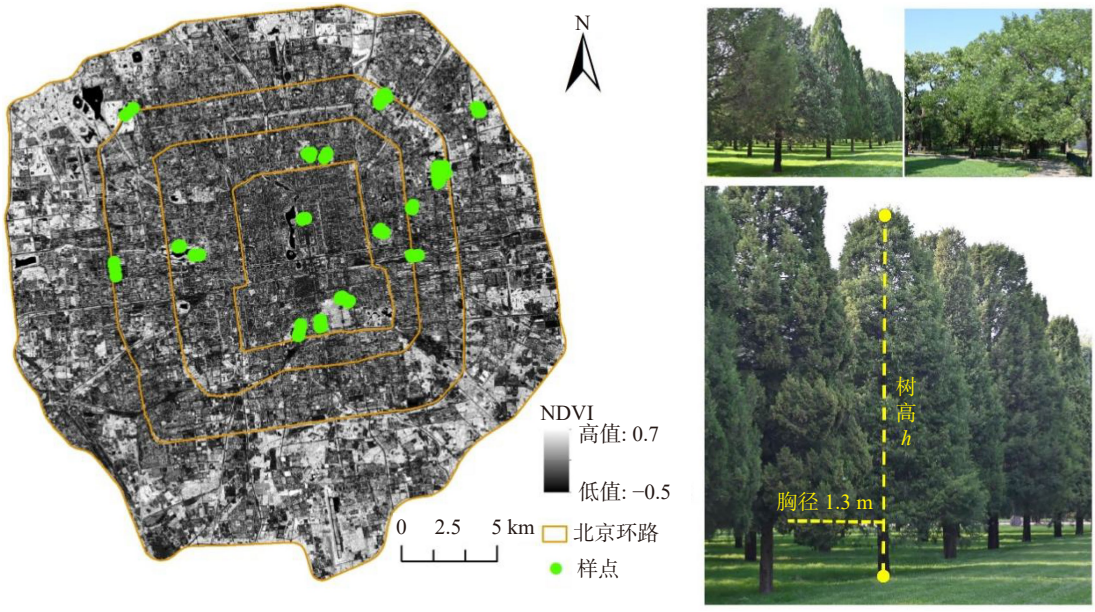


图 1 样地分布图和实拍图

Fig. 1 Distribution and actual photographs of sample plots

多光谱反射率的数学转换，包含了植被 90% 的信息，对于森林碳储量有较高的敏感性。归一化差值植被指数（NDVI）可以用来估算植被碳储量，将处理后的影像导入 ENVI5.6 中，用 Band math 工具计算 NDVI，公式为

$$\mathrm{NDVI}=\frac{R_{\mathrm{NI}}-R}{R_{\mathrm{NI}}+R} \tag{2}$$

式中：R_{NI} 是近红外波段，R 是红光波段。

1.2.2.2　基于遥感影像的碳储量估算

利用已发表文献[10]中建立的 NDVI–碳密度模型对北京市 3 个年份的不同空间尺度城市森林碳储量进行估算。不同空间尺度由大到小分别为五环内中心城区、二环内老城区及老城区典型城市公园（天坛公园、景山公园、永定门公园和陶然亭公园）。该模型融合了 2014 年北京市 6 个中心城区实地调查的 326 个样地数据和遥感数据，将样地的 NDVI 数据与地上碳储量测量值进行配对，建立像元碳密度与 NDVI 之间的关系，且已验证碳密度与 NDVI 之间存在显著的指数关系（$p<0.001$）。像元碳密度（D_{r}）与像元面积的乘积即为像元碳储量，区域内的所有像元碳储量相加得到该区域的森林碳储量。

$$D_{\mathrm{r}}=1.328\,7\times \mathrm{e}^{6.562\,1\mathrm{NDVI}} \tag{3}$$

为探究不同遥感影像估算结果的差异，本研究根据 2024 年实地调查中 118 个样地的矢量边界，在同年 Sentine-2A 和 Landsat-8 所得的碳密度栅格数据中进行裁剪，得出每个样地的遥感估算碳密度，将通过生物量异速生长方程计算的实测碳密度与估算碳密度进行对比验证，并进行分析。

1.2.3　*碳密度与景观结构的关系*

1.2.3.1　面向对象分类提取城市公园景观结构

为探究城市公园景观结构对城市森林碳密度的影响，采用面向对象分类法获取不同影像的土地利用分类图。首先，在 eCognition 中进行多尺度图像分割[25]，在 ENVI5.6 中选择森林、草地、水体、裸地、建设用地及阴影各类型样本 50 个。将分类样本导入 eCognition 中，根据样本点分类分割结果，在定义分类器中选择分类特征（波段平均值、各波段光谱均值的算术平均值、NDVI、密度、面积特征、紧实度指标、长宽比、矩形匹配度、形状指数等），执行定义分类器后，使用最近邻分类方法对图像进行分类。用哨兵 2 号数据原图在 ArcGIS10.8 中生成 350 个随机点，对照影像编辑属性表赋予每个随机点类别并导出，作为精度验证的验证点。基于精度验证样本在 eCognition 中创建 TTA mask，保存文件后在分类结果中打开 TTA mask 主文件及 csv 文件，匹配地类相互关系后完成精度验证，验证结果 kappa 系数为 0.81。

为对比分析不同尺度下的城市公园土地利用类型，将同期 Landsat-8 数据在 eCognition 中进行多尺度分割。在 ENVI5.6 中选择森林、草地、水体、裸地及建设用地各类型样本 50 个，将分类样本导入 eCognition 中进行面向对象分类，具体步骤同上。后用 Landsat-8 数据原图在 ArcGIS10.8 中生成 350 个随机点，对照影像编辑属性表赋予每个随机点类别并导出，作为精度验证的验证点。基于精度验证样本在 eCognition 中完成精度验证，验证结果 kappa 系数为 0.83。

1.2.3.2　碳密度与景观结构的相关性分析

在碳密度与景观结构关系的研究中，无需考虑公园的面积大小，因而可以增加样本量，除实地调查的面积较大的 15 个公园外，另补充北京市四环内 16 个公园（奥林匹克社区公园、北海公园、翠芳园、丰台花园、丰益公园、官园公园、玲珑公园、龙潭湖公园、龙潭西湖公园、马甸公园、南礼士路公园、万芳亭公园、宣武艺园、月坛公园、长春健身园和中山公园），31 个公园为北京市四环内全部主要公园。裁取 Sentinel-2A 和 Landsat-8 影像的公园土地利用分类图，使用 FRAGSTATS 4.2 软件计算其景观格局指数。在景观水平上选择了 11 个常用指标包括最大斑块占景观面积指数（LPI）、平均斑块面积（AREA_MN）、面积加权平均形状指数（SHAPE_AM）、面积权重平均连续性指数（CONTIG_AM），蔓延度指数（CONTAG）、散布与并列指数（IJI）、斑块内聚力指数（COHESION）、斑块密度（PD）、景观分离度（DIVISION）、平均欧式最近邻域距离（ENN_MN）和香农多样性指数（SHDI）。将不同影像估算的城市公园平均碳密度与景观格局指数进行相关性分析，若 Pearson 相关系数 $p<0.05$，说明景观结构与碳密度之间显著相关。

2　结果与分析

2.1　实地调查样地碳储量估算

对样地群落中的植物科属进行统计分析，涉及 24 科、37 属、57 种，典型公园绿地中蔷薇科（Rosaceae）植物种类最多，其次是杨柳科（Salicaceae）、柏科（Cupressaceae）、豆科（Fabaceae）和松科（Pinaceae）等。样地调查中乔木胸径分布结果（图 2a）显示：胸径在 15 ~ 20 cm 范围内树种占比最多，其次为 20 ~ 25 cm 和 10 ~ 15 cm，胸径≥60 cm 树种占比最少。

实地调查数据通过异速生长方程计算样地树种碳储量及碳密度，不同树种胸径对应的碳储量结果（图 2b）显示：胸径 40 ~ 60 cm 树种的碳储量占比最大，其次是≥ 60 cm，胸径 5 ~ 10 cm 树种碳储量占

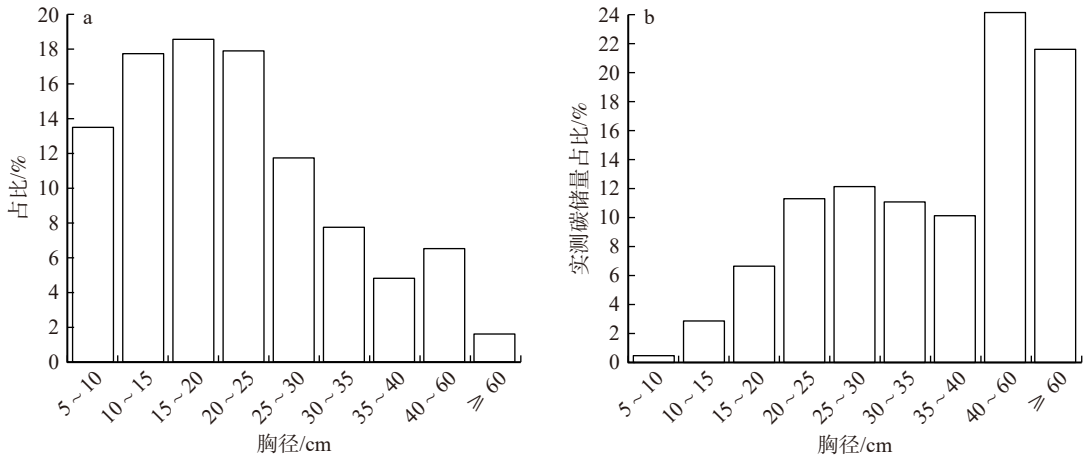


图 2 样地调查乔木胸径分布(a)和不同胸径对应的碳储量(b)

Fig. 2 DBH distribution of trees from sample plot surveys (a) and carbon storage corresponding to different DBH (b)

比最小，表明大树是城市绿地和碳储量的主要载体。综合各公园的碳密度数据，发现碳密度最高的是地坛公园(106.4 Mg/hm^2)，这可能是因为地坛公园建成时期早，植物群落已得到充分发育，结构较饱满，郁闭度较高，且公园内乔木较多，有大量古树。碳密度最低的是景山公园(22.4 Mg/hm^2)，可能是因为其特殊的地理位置以及参观游客较多，人为干扰较大，植被的覆盖度较低，且大部分区域以灌木和花卉为主。

2.2 不同尺度城市森林碳密度

综合 3 个时期 3 种不同分辨率(Spot-6，Sentinel-2A 和 Landsat-8)的数据估算北京市老城区和老城区 4 个公园(天坛公园、景山公园、永定门公园和陶然亭公园)平均碳密度，发现中高分辨率(Sentinel-2A 和 Spot-6)的影像所得的平均碳密度明显高于分辨率低(Landsat-8)的影像(图 3)。

在二环以内老城区(图 3a)中，2015 年 Spot-6 数据估算的平均碳密度为 4.94 Mg/hm^2，Landsat-8 数据估算的平均碳密度为 3.51 Mg/hm^2，相较于 Spot-6 低估了 28.9%；2019 年 Sentinel-2A 数据估算的平均碳密度为 5.34 Mg/hm^2，Landsat-8 数据估算的平均碳密度为 4.32 Mg/ hm^2，相较于 Sentinel-2A 低估了 19.2%；2024 年 Sentinel-2A 数据估算的平均碳密度为 6.46 Mg/hm^2，Landsat-8 数据估算的平均碳密度为 3.64 Mg/hm^2，相比于 Sentinel-2A 低估了 43.6%。

在老城区 4 个公园(图 3b)中，2015 年 Spot-6 数据估算的平均碳密度为 15.87 Mg/hm^2，Landsat-8 数据估算的平均碳密度为 7.15 Mg/hm^2，相较于 Spot-6 低估了 55.0%；2019 年 Sentinel-2A 数据估算的平均碳密度为 13.15 Mg/hm^2，Landsat-8 数据估算的平均碳密度为 7.15 Mg/hm^2，相较于 Sentinel-2A 低估了 30.5%；2024 年 Sentinel-2A 数据估算的平均碳密度为 16.94 Mg/hm^2，Landsat-8 数据估算的平均碳密度为 7.04 Mg/hm^2，相较于 Sentinel-2A 低估了 58.4%。

随着影像分辨率的降低，城市森林碳密度被低估的程度越显著。为了进一步验证此结果，将 2024 年实地调查碳密度数据与 Sentinel-2A 和 Landsat-8 影像估算数据进行对比，发现高分辨率的 Sentinel-2A 估算数据点距离 1∶1 参考线较近，说明其估算的碳密度与实际测量的碳密度之间存在较高的一致性。相比之下，低分辨率的 Landsat-8 估算数据点更集中

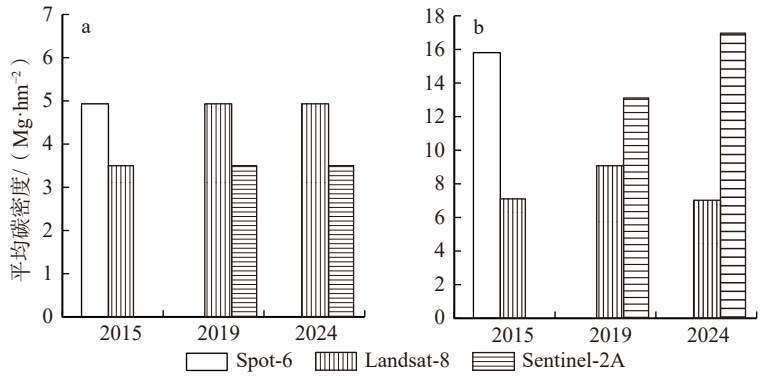


图 3 不同影像估算 3 年北京市老城区(a)和老城区公园(b)的平均碳密度

Fig. 3 Mean carbon density of three years in Beijing's old urban area (a) and old urban parks (b) by different imagery estimation

地分布在远离 1∶1 参考线的左侧上方区域，说明其估算结果普遍低于实测数据(图 4a)。而针对高碳储区域即实测碳密度高于 70 Mg/hm^2 的样地，无论是 Sentinel-2A 数据还是 Landsat-8 数据，估算值均显著低于实测数据，两种数据都难以有效捕捉到高碳储样地的实际碳密度水平(图 4b)。多种遥感影像的对比分析进一步说明基于遥感影像的城市森林碳密度估算法对高碳密度区域的低估问题与遥感影像的空间分辨率密切相关，在高度城市化区域使用高分辨率遥感影像才能更真实地评估森林固碳功能。

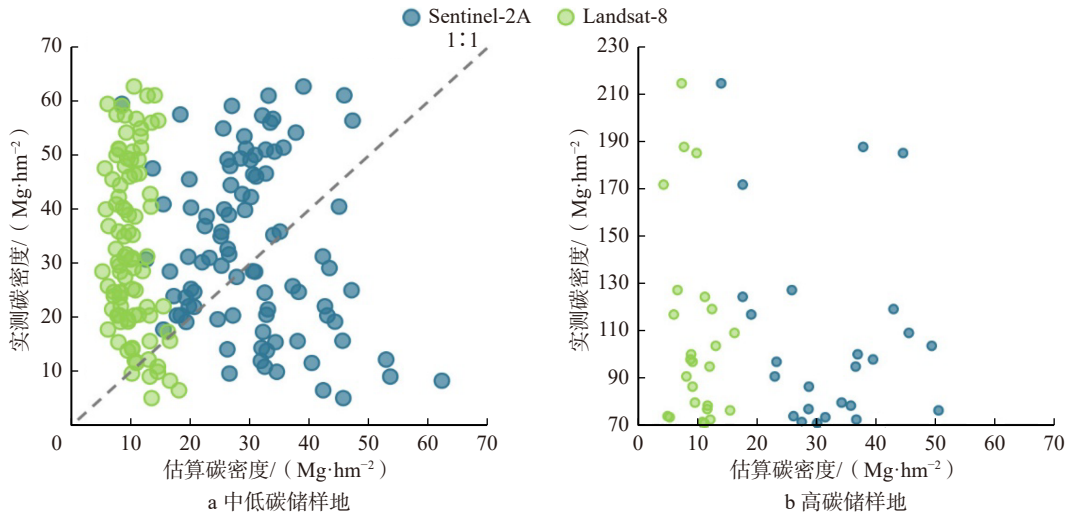


图 4　不同空间分辨率遥感影像估算碳密度与实测碳密度对比图

Fig. 4　Comparison of carbon density estimated from remote sensing images with different spatial resolutions and measured carbon density

2.3　北京城市森林碳汇功能评估

为明确在不同空间尺度下，遥感分辨率对碳密度估算的影响是否存在差异，本研究基于 NDVI–碳密度模型和多源遥感影像(Sentinel-2A 和 Landsat-8)对 2024 年北京市五环区域、老城区和老城区典型城市公园(天坛公园、景山公园、永定门公园、陶然亭公园)碳密度进行定量分析。结果(图 5)发现：两种影像的估算结果具有一致性，均表现出老城区公园碳密度最高，其次是五环区域，老城区尺度碳密度最低的尺度差异，但高分辨率的 Sentinel-2A 影像能更准确地揭示城市森林地上碳密度的尺度效应。将 30 m 分辨率的 Landsat-8 影像应用于高度城市化区域的地上碳密度分析时，会造成不同程度上的低估，在局地尺度即本研究中的老城区城市公园，低估现象最为明显。

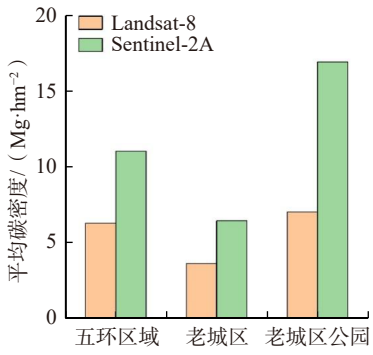


图 5　基于多源遥感数据的五环区域、老城区和老城区公园平均碳密度估算

Fig. 5　Carbon density estimation in the Fifth Ring Road area, old urban area and old urban parks based on multi-source remote sensing data

鉴于 Sentinel-2A 影像在城市森林碳密度估算中具有更高的准确性和适用性，且能更准确地揭示不同空间尺度的碳密度差异。因此，本研究利用 2024 年的 Sentinel-2A 影像和 NDVI–碳密度模型，绘制了当前北京市不同空间尺度的城市森林碳密度分布图(图 6)。结果显示了北京五环区域、四环区域、老城区、老城区 4 个主要城市公园的多个空间尺度的城市森林地上碳密度空间分布特征。通过不同空间尺度的对比分析发现，北京中心城区的城市森林地上碳密度空间异质性极高：五环内高碳区域主要分布在四环–五环；四环内地上碳密度明显减少，且碳密度高值点主要分布在多个城市公园中；而城市化强度最高的老城区则呈现出相对较低的碳密度，局地尺度上的天坛公园、陶然亭公园、景山公园和永定门公园的碳密度也呈现了明显的空间异质性，城市森林碳密度的空间分布差异与城市景观结构密切相关。

综合 3 个年份的 Sentinel-2A 影像估算数据，得出 3 个不同空间尺度城市森林的近 10 年的碳储量动态变化(图 7a)。不同空间尺度城市森林碳储量均明显提升，从公园尺度上看，2015—2019 年老城区 4 个公园碳储量增加 829.8 Mg，2019—2024 年碳储量增加 1 097.7 Mg，10 年内提升 64.7%，碳汇 214.2

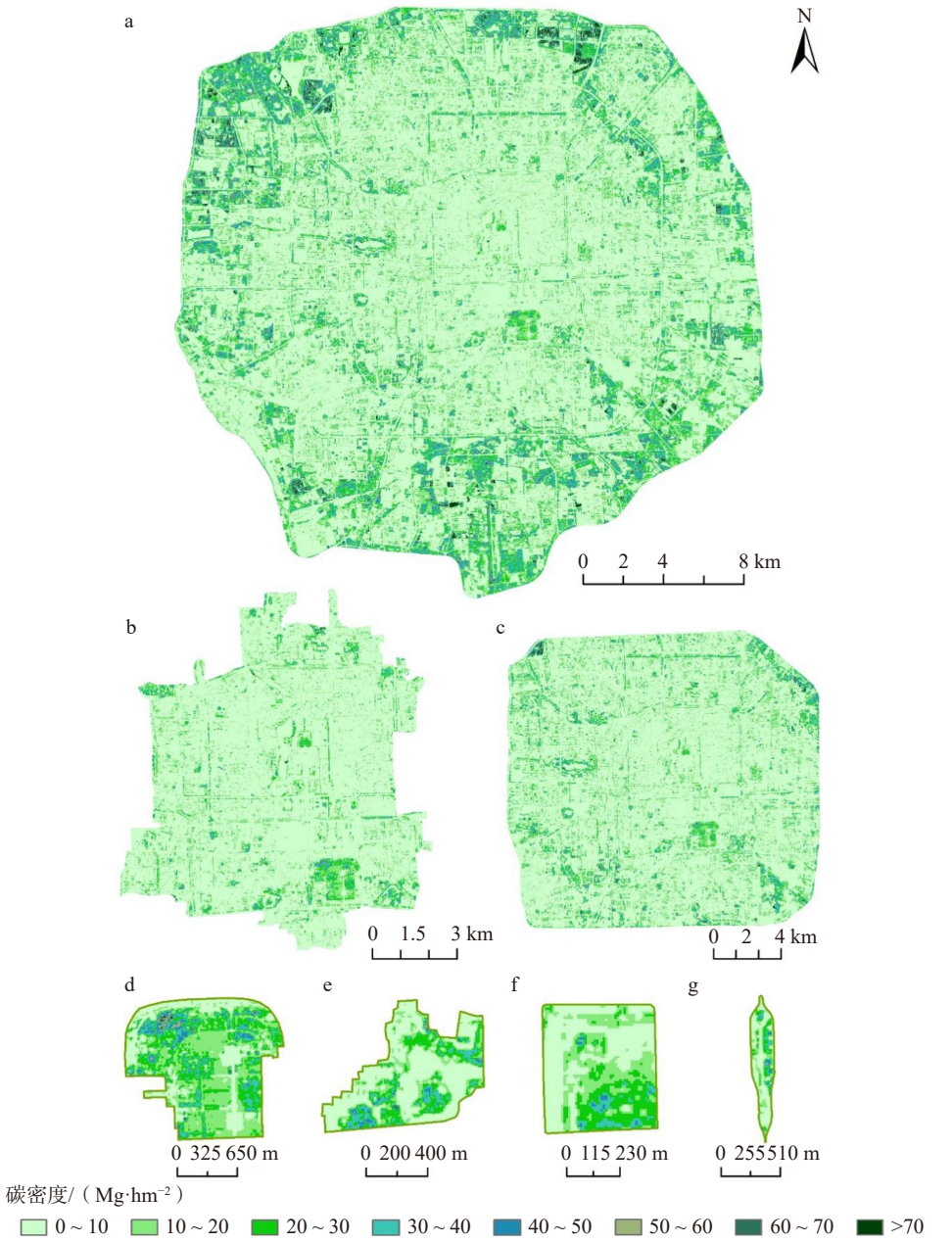


图 6 基于 Sentinel-2A 卫星影像估算的北京市五环内区域(a)、老城区(b)、四环内区域(c)、天坛公园(d)、陶然亭公园(e)、景山公园(f)和永定门公园(g)地上碳密度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of aboveground carbon density in the area within the Fifth Ring Road (a), old urban area (b), area within the Fourth Ring Road (c), Temple of Heaven Park (d), Taoranting Park (e), Jingshan Park (f), and Yongdingmen Park (g) in Beijing, estimated from Sentinel-2A satellite images

Mg/a；从老城区尺度看，2015—2019 年老城区碳储量增加 9 202.7 Mg，2019—2024 年碳储量增加 10 305.0 Mg，10 年内提升 48.5%，碳汇 2 167.5 Mg/a；从城市尺度看，城市核心区五环内 2015—2019 年碳储量增加 137 322.7 Mg，2019—2024 年碳储量增加 217 545.1 Mg，10 年内提升 92.9%，碳汇 39 429.8 Mg/a，年增速明显，年均增加 18.58%。

对比 2015—2019 年与 2019—2024 年的碳汇占比，发现不同空间尺度均表现出近 5 年碳汇占比显著高于前 5 年的特点(图 7b)。在五环内空间尺度的北京城市森林碳汇潜力最大，近 5 年碳汇增长速度显著增加，近 10 年五环内城市森林碳储量增加近 1 倍，表明北京市森林碳储量稳步增长，碳汇潜力巨大。

2.4 城市森林碳密度与景观格局指数分析

为探究不同分辨率影像对城市公园碳密度与景观格局指数分析的差异，本研究分别基于 Sentinel-2A 和 Landsat-8 影像，将估算的 31 个城市公园平均碳密度数据与对应的景观格局指数进行相关性分析。结果发现，Sentinel-2A 影像估算的城市公园碳密度与斑块密度、平均欧式最近邻域距离、景观分离度、

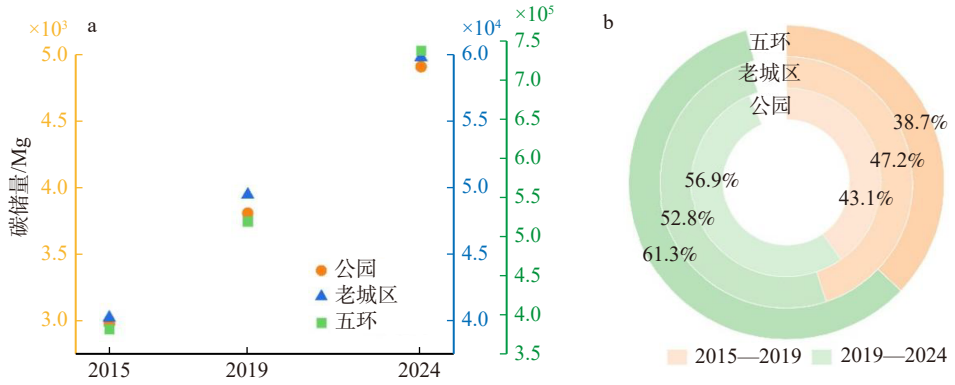


图 7　北京市 10 年内不同区域碳储量变化(a)和 5 年碳汇占比(b)

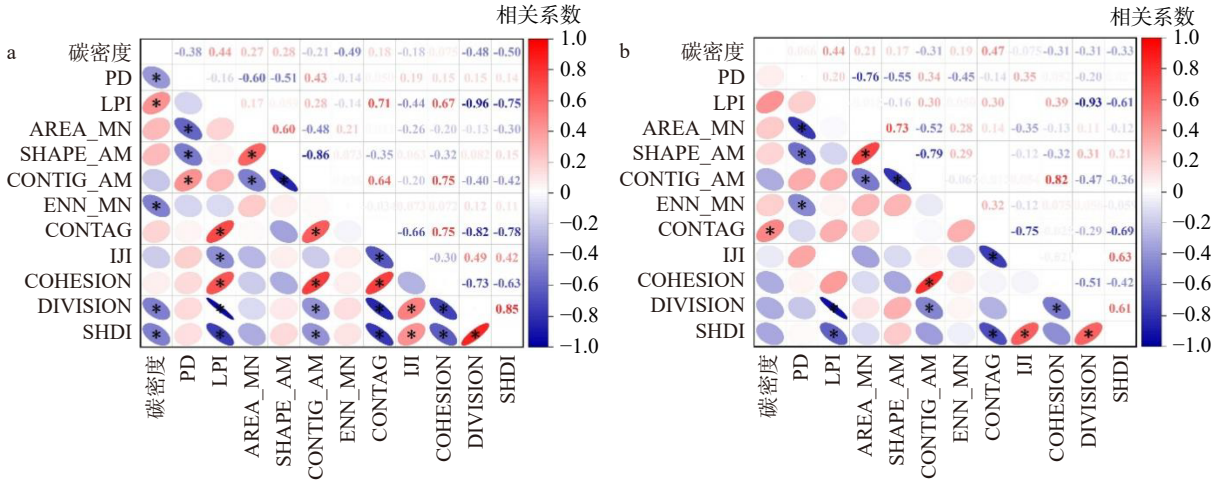
Fig. 7　Changes in carbon stocks in different regions of Beijing over a 10-year period (a) and the proportion of carbon sinks over a 5-year period (b)

香农多样性指数显著负相关($p < 0.05$)，碳密度与最大斑块占景观面积比例显著正相关(图 8a)。这意味着城市公园中斑块数量越多，斑块之间的平均距离越远，景观破碎化程度越高，边缘效应和物种扩散阻碍增强，单位面积内生态敏感比例上升，影响光热条件变化的同时，种群更新能力下降，老龄树木占比增加，抑制碳储存，碳密度越低。而城市公园的景观多样性提升，通常依赖着人工斑块的嵌入，例如不透水表面的广场、步道等，因此在城市公园中，香农多样性指数越高，人工景观占比越大，碳密度越低。在城市公园中最大斑块通常为林地，最大斑块占景观面积比例越大，冠层连续性越高，叶面积指数在一定范围内增加时，可以有效增加树木的光合效率，促进碳储存，进而增加单位面积碳密度。Landsat-8 影像估算的城市公园碳密度与蔓延度指数显著正相关(图 8b)。蔓延度反映了不同斑块类型在景观中的聚集程度，城市公园中优势斑块类型(通常为林地)连接紧密，促进生态过程协同，碳密度更高。

Sentinel-2A 影像在分析景观结构对城市森林碳储量的影响时，比 Landsat-8 影像更具优势，有更多景观指数显示相关性，而 Landsat-8 估算产品分析结果无法从景观破碎化程度、斑块分布特征等方面呈现景观结构的影响。

3　讨　　论

基于长时间序列、大样本量超大城市核心区的样地调查数据的定量分析对理解大都市区城市森林碳汇时空特征及其影响机制的认识十分重要，本研究弥补了现有研究多集中于特定时间点和城市远郊山地，缺乏大样本量城市森林样地调查的不足，以北京市高度城市化区域为研究对象，通过实地调查和多源遥感数据融合分析，实现了对城市森林碳汇功能的长时序多尺度动态评估。这为高度城市化区域的城市森林碳汇功能评估提供了方法支撑，对于我



PD 为斑块密度；LPI 为最大斑块占景观面积指数；AREA_MN 为平均斑块面积；SHAPE_AM 为面积加权平均形状指数；CONTIG_AM 为面积权重平均连续性指数；ENN_MN 为平均欧式最近邻域距离；CONTAG 为蔓延度指数；IJI 为散布与并列指数；COHESION 为斑块内聚力指数；DIVISION 为景观分离度；SHDI 为香农多样性指数。*表示显著相关($p < 0.05$)。

图 8　Sentine-2A(a)和 Landsat-8(b)影像估算样地碳密度与景观格局指数相关性分析

Fig. 8　Correlation analysis between carbon density and landscape pattern index of sample plots estimated from Sentine-2A (a) and Landsat-8 (b) images

国其他快速城市化区域的城市林业管理具有重要的借鉴意义。本研究中，北京市 2024 年五环内城市森林平均碳密度为 11.05 t/hm^2，四环内平均碳密度为 7.87 t/hm^2，老城区平均碳密度为 6.46 t/hm^2，低于自然状态下全国平均碳密度（37.28 t/hm^2）[26]，与 Sun 等[10] 2014 年对北京 6 个中心城区的碳密度估算结果（7.8 t/hm^2）接近。仅关注城市森林，而不是城市绿地景观而言，118 个调查样方实地调查碳密度结果为 55.6 t/hm^2，与 Qin 等[14]2020 年利用 ICESat-2 激光雷达数据与 GF-2 高分二号影像相结合调查五环内城市森林平均碳密度（35.2 t/hm^2）相比有明显提升，可能是因为多源遥感影像相较于实地测量估算的碳储量偏低，也可能是因为近年内，城市树木的生长和城市维护人员对树木的精心管理明显增加了城市绿地的碳密度。在城市尺度方面，越靠近城市核心区域，平均碳密度越小，这一现象与高度城市化区域的生态约束密切相关。高强度城市开发导致城市森林被严重挤压或碎片化，城市化程度越高，连续植被斑块越小，难以形成稳定的冠层结构。其次，高密度城市化区域伴随着热岛效应加剧，在一定程度上影响植被的分布状况和生长情况，从而影响碳储存。此外，频繁的人为干扰（如游客踩踏、景观改造）迫使植被群落向低生物量的灌木、草本演替。

对比分析国内其他城市：北京市平均碳密度低于上海外环林带环绕的市中心区域平均碳密度（47.8 t/hm^2）[27]，杭州都市区与周边县市平均碳密度（30.25 t/hm^2）[28]，广州 8 个行政区平均碳密度（28.8 t/hm^2）[29]，沈阳三环以内地区平均碳密度（33.20 t/hm^2）[30]；高于西安环城公路内的城市区域平均碳密度（2.77 t/hm^2）[31]。这可能是因为上海、杭州位于亚热带气候区，水热条件优越，植被生长周期长，再加上精细化的绿地规划，形成高碳密度的稳定生态系统。而沈阳作为东北重工业城市，虽然天气寒冷，但以速生树种为主，通过大规模高密度人工林建设（如油松、云杉混交林）弥补自然条件劣势，具有相对较高的固碳率。相比之下，北京与西安城市森林碳密度接近，且处于较低水平，可能是因为受暖温带大陆性季风气候影响，乡土树种生长速率较慢，同时高强度城市化导致绿地空间高度碎片化，再叠加古城保护与旅游开发的影响，人为干扰强度进一步抑制了碳汇功能。另外，北京与美国纽约（25.10 t/hm^2）[24]、奥克兰（11.00 t/hm^2）[32]、芝加哥（14.10 t/hm^2）[33]、西班牙巴塞罗那（11.20 t/hm^2）[29]、韩国中部城市（4.70 ~ 7.20 t/hm^2）[34]等城市的碳储量均不高，同样体现了高密度城市发展的共性，快速城市化进程带来的大量城市建筑和不透水表面，以及人类干扰等因素导致树木质量下降，密度、覆盖度减少，从而影响了城市森林碳储量。

北京作为我国的首都和国际大都市，其城市森林建设已进入从规模扩张向质量提升转型的新阶段，为提升高密度城市化区域的碳汇能力，管理上应优化景观配置，包括优选速生乡土树种，增强植被连续性，优化林龄结构并加强管护。有研究[35]表明，不同龄级碳储量以成熟林和过熟林为主，分别占 35.7% 和 30.2%，总比重高达 65.7%。因此适当控制林龄，在过熟林中补植新树，是维持并提升生态系统固碳能力的关键[36]。另外，为最大化城市森林的碳抵消效益，管理上应“开源节流”：一方面，选择长寿命、低养护的树种以减少管理过程中的碳排放；另一方面，加强凋落物管理，将其归还土壤以增加土壤碳库[37]。

本研究发现遥感影像分辨率对城市森林碳密度估算及景观结构分析的影响尤为显著，是影响高度城市化区域碳汇评估准确性的因素之一。中高分辨率影像能够更好地捕捉城市森林边界与内部结构，有效规避了低分辨率的混合像元效应。在北京中心城区城市森林碳密度估算中，应尽可能地使用更高分辨率的影像以及样地实测数据。然而，本研究尚未考虑灌木层、土壤以及枯枝落叶层碳库，以及城市树木的修剪管理措施等的影响，在实地碳储量调查中可能存在一定的误差。因此，今后的研究中可结合高分辨率激光雷达数据针对行道树和社区附属绿地等多类型城市森林开展更高空间分辨率、更长时序的动态分析，从而实现更精确的碳计量动态研究。

4 结　　论

本研究针对北京市高度城市化区域，实地调查 118 个城市森林样方，利用不同空间分辨率尺度下的 3 种遥感影像，对 3 个不同年份的北京市 3 种不同空间尺度碳储量进行估算，并对近 10 年内不同时空尺度的城市森林碳汇能力进行评估，探究景观组成和构型对城市森林碳储量的影响。研究得到以下结论。

（1）北京城市森林的碳储量主要集中于胸径较大的乔木，且公园碳密度受建成历史、群落结构和人为干扰等因素的显著影响，其中地坛公园因群落发育成熟而碳密度最高。

（2）中高分辨率遥感影像对碳密度评估具有显著优势。低分辨率影像会不同程度地低估城市森林碳密度，且低估程度随着空间尺度的缩小而增加，公园尺度下被低估的尤为明显。

（3）北京市近 10 年（2015—2024）城市森林碳汇能力持续增强，各空间尺度碳储量增幅显著，表明北

京市森林碳储量稳步增长，碳汇潜力较大。其中五环以内区域尺度的城市森林碳汇潜力最大，近 5 年（2019—2024）提升幅度较前 5 年（2015—2019）明显增加。

（4）碳密度与城市森林景观聚集程度显著相关，斑块面积越大，数量越少，斑块之间的平均距离越近，景观多样性越低，碳密度越高。高空间分辨率能够更准确地识别和区分不同类型的斑块，从而更好地反映景观破碎化程度、斑块分布特征与碳储存能力。

研究结果为评估城市森林碳汇潜力提供了理论支撑，也为其他快速城市化区域的城市森林管理规划与建设提供了科学依据。

参 考 文 献

[1] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319: 756−760.

[2] Ma J, Li X T, Jia B Q, et al. Spatial variation analysis of urban forest vegetation carbon storage and sequestration in built-up areas of Beijing based on i-Tree Eco and Kriging[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 66: 127413.

[3] 王迪生. 关于城市园林绿地碳汇问题的初步探讨 [C]//北京园林学会, 北京市园林绿化局, 北京市公园管理中心. 2008 北京奥运园林绿化的理论与实践. 北京: 中国林业出版社, 2009: 4.
Wang D S. Preliminary discussion on carbon sinks in urban gardens and green spaces[C]//Beijing Landscape Architecture Society, Beijing Municipal Bureau of Landscape Architecture and Greening, Beijing Municipal Parks Management Center. Theory and Practice of 2008 Beijing Olympic Landscaping. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009: 4.

[4] Lin J, Ma Q, Ju Y, et al. Relationships between urbanization, tree morphology, and carbon density: an integration of remote sensing, allometric models, and field survey[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 76: 127725.

[5] 毛沂新, 张慧东. 城市森林碳汇研究进展 [J]. 辽宁林业科技, 2023(3): 51−54.
Mao Y X , Zhang H D. Research progress of urban forest carbon sink[J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2023(3): 51−54.

[6] Pregitzer C C, Hanna C, Charlop P S, et al. Estimating carbon storage in urban forests of New York City[J]. Urban Ecosystems, 2022, 25: 617−631.

[7] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 586: 720−723.

[8] 任云卿, 温志勇, 王敏男, 等. 北京市森林碳汇能力评价 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 108−119.
Ren Y M, Wen Z Y, Wang M N, et al. Evaluation of forest carbon sequestration capacity in Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 108−119.

[9] 黄从红, 张志永, 张文娟, 等. 国外森林地上部分碳汇遥感监测方法综述 [J]. 世界林业研究, 2012, 25(6): 20−26.
Huang C H, Zhang Z Y, Zhang W J, et al. A review of overseas remote sensing monitoring methods for aboveground forest carbon sink[J]. World Forestry Research, 2012, 25(6): 20−26.

[10] Sun Y, Xie S, Zhao S Q. Valuing urban green spaces in mitigating climate change: a city-wide estimate of aboveground carbon stored in urban green spaces of China's Capital[J]. Global Change Biology, 2019, 25: 1717−1732.

[11] Zhang C, Song T, Shi R, et al. Estimating the forest carbon storage of chongming Eco-Island, China, using multisource remotely sensed data[J]. Remote Sensing, 2023, 15: 1575.

[12] Rao P, Hutyra L R, Raciti S M, et al. Atmospheric nitrogen inputs and losses along an urbanization gradient from Boston to Harvard Forest, MA[J]. Biogeochemistry, 2014, 121: 229−245.

[13] Tao Y, Li F, Wang R S, et al. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: a study from Changzhou, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 651−657.

[14] Qin H M, Zhou W Q, Qian Y G, et al. Estimating aboveground carbon stocks of urban trees by synergizing ICESat-2 LiDAR with GF-2 data[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 76: 127728.

[15] Li X T, Jia B Q, Li F, et al. Effects of multi-scale structure of blue-green space on urban forest carbon density: Beijing, China case study[J]. Science of the Total Environment, 2023, 883: 163682.

[16] 张桂莲, 邢璐琪, 张浪, 等. 城市绿地碳汇计量监测方法研究进展 [J]. 园林, 2022, 39(1): 4−9, 49.
Zhang G L, Xing L Q, Zhang L, et al. Summary on the monitoring methods of carbon sequestration in urban green space[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2022, 39(1): 4−9, 49.

[17] 李思慧, 朱天姝, 魏朝响, 等. 北京市森林碳储量核算与碳汇潜力预测研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49(1): 22−27.
Li S H, Zhu T S, Wei C X, et al. Forest carbon storage calculation and carbon sink potential prediction in Beijing[J]. Environmental Science and Management, 2024, 49(1): 22−27.

[18] Sun R H, Li F, Chen L D. A demand index for recreational ecosystem services associated with urban parks is Beijing, China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109612.

[19] 田慧霞, 覃阳毅, 李祖政, 等. 北京市生态系统服务演变及其对城市化的多尺度响应 [J]. 生态学报, 2025, 45(5): 1−16.
Tian H X, Qin Y Y, Li Z Z, et al. Changes of ecosystem services in Beijing and its multi-scale response to urbanization[J]. Acta Ecological Sinica, 2025, 45(5): 1−16.

[20] 张双, 瞿艳芝, 俞珊, 等. 北京市减污降碳协同效应和驱动因素分析 [J]. 环境科学与技术, 2024, 47(7): 55−62.
Zhang S, Zhai Y Z, Yu S, et al. Synergy effects and driving factors of pollution and carbon emissions reduction in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(7): 55−62.

[21] 温丁, 徐丽, 王春燕, 等. 京津冀城区森林植被碳汇遥感评估与预测 [J]. 地理科学进展, 2024, 43(12): 2520−2529.
Wen D, Xu L, Wang C Y, et al. Remote sensing assessment and

prediction of forest vegetation carbon sequestration in the Beijing-Tianjin-Hebei urban area[J]. Progress in Geography, 2024, 43(12): 2520−2529.

[22] 郑宇, 尹准生, 周原驰, 等. 北京市林业碳汇工作实践与发展建议 [J]. 中南林业调查规划, 2023, 42(4): 5−9.
Zheng Y, Yin Z S, Zhou Y C, et al. Practice and developing suggestion on forestry carbon sink in Beijing[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2023, 42(4): 5−9.

[23] Davies Z G, Edmondson J L, Heinemeyer A, et al. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48: 1125−1134.

[24] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 381−389.

[25] Xiao J, Chen L Q, Zhang T, et al. Identification of urban green space types and estimation of above-ground biomass using Sentinel-1 and Sentinel-2 data[J]. Forests, 2022, 13: 1077.

[26] 李奇, 朱建华, 冯源, 等. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测 [J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 287−294.
Li Q, Zhu J H, Feng Y, et al. Carbon storage and carbon sequestration potential of the forest in China[J]. Climate Change Research, 2018, 14(3): 287−294.

[27] Wang Z, Cui X, Yin S, et al. Characteristics of carbon storage in Shanghai's urban forest[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 1130−1138.

[28] Zhao M, Kong Z, Escobedo F J, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91: 807−813.

[29] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 等. 城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5865−5873.
Zhou J, Xiao R B, Zhuang C W, et al. The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou[J]. Acta Ecological Sinica, 2013, 33(18): 5865−5873.

[30] Liu C F, Li X M. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(2): 121−128.

[31] Yao Z Y, Liu J J, Zhao X W, et al. Spatial dynamics of aboveground carbon stock in urban green space: a case study of Xi'an, China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 350−360.

[32] Nowak D J. Atmospheric carbon reduction by urban trees[J]. Journal of Environmental Management, 1993, 37: 207−217.

[33] Nowak D J. Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest[C]// McPherson E G, Nowak D J, Rowntree R A. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Philadelphia: US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 1994: 83−94.

[34] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Kore[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 64: 115−126.

[35] 唐霄. 四川森林植被碳储量估算及其空间分布特征 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.
Tang X. Carbon storage of forest vegetation and spatial distribution on Sichuan province[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2007.

[36] Rowntree R A, Nowak D J. Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide[J]. Journal of Arboriculture, 1991, 17(10): 269−275.

[37] 潘勇军, 李智琦, 熊咏梅, 等. 广州城市公园碳存储和碳固定计量的 UTC 转换系数研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(12): 83−93.
Pan Y J, Li Z Q, Xiong Y M, et al. Carbon storage and sequestration based on urban tree canopy by urban park in Guangzhou, China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(12): 83−93.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 张会儒）