城市森林结构与功能研究

基于无人机多源遥感影像的城市森林冠层温度季节变化对地上生物量的影响*

王涵宇[1,2] 李若楠[1,2] 翟雅琳[1,2] 贾 佳[1,2] 王 蕾[1,2]

1 东北林业大学园林学院 哈尔滨 150040

2 黑龙江省寒区园林植物种质资源开发与景观生态修复重点实验室 哈尔滨 150040

摘要:【目的】分析城市森林冠层温度与地上生物量的空间关联特征,揭示冠层温度季节变化对地上生物量的影响,为城市森林碳汇评估与气候适应性规划提供科学依据。【方法】融合无人机机载激光雷达、多光谱与热红外影像,结合野外样地调查、异速生长模型与随机森林模型估算地上生物量,采用随机森林回归与地理加权回归(GWR)模型分析冠层温度变化对地上生物量的影响及其空间异质性。【结果】1)覆盖参数 GFP 是地上生物量估算的主导预测因子,地上生物量估算模型精度为 $R^2=0.89$,RMSE=2.96 kg·m^{-2}。2)冠层平均温度与地上生物量呈负相关($P<0.01$)。当冠层温度最大值大于 30℃ 时,地上生物量下降速率加剧。3)温度影响存在非平稳性,南部呈现正效应,北部则为负效应,且温度影响强度指数(TDEI)高值区随着季节迁移,春季以正向响应为主,夏季则逐渐呈现负向响应特征,这一过程与夏季高温胁迫树木生长密切相关。【结论】年均冠层温度与地上生物量整体呈负相关,且温度敏感性存在明显的空间分异;TDEI 在春夏季呈现时空迁移特征。因此,在冠层温度最大值超过 30 ℃的夏季热极端高发区域,应优先布局郁闭度高、耐热性强的树种,从而缓解高温胁迫对地上生物量的抑制作用。未来研究需进一步拓展样本范围,涵盖不同气候区,并延长观测时间序列,从而更深入地解析“温度胁迫-结构适应-地上生物量积累”之间的动态关系,为城市森林管理提供更具科学性的依据。

关键词:无人机机载激光雷达(UAV-LiDAR);城市森林;冠层温度;地上生物量

DOI:10.12169/zgcsly.2025.12.02.0001

Impact of Seasonal Variation in Canopy Temperature on Above-ground Biomass in Urban Forests Based on UAV Multi-source Remote Sensing Imagery

Wang Hanyu[1,2] Li Ruonan[1,2] Zhai Yalin[1,2] Jia Jia[1,2] Wang Lei[1,2]

(1. College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Heilongjiang Key Laboratory of Germplasm Resources Development and Landscape Ecological Restoration in Cold Region, Harbin 150040, China)

Abstract:【Objective】The study analyzes the characteristics of spatial correlation between canopy temperature and above-ground biomass (AGB) in urban forests and reveals the impact of canopy temperature on AGB, aiming to provide scientific evidence for carbon sink evaluation and climate adaptability planning of urban forests.【Method】LiDAR, multispectral, and thermal infrared images are combined to estimate above-ground biomass along with field plot surveys, allometric growth models and

收稿日期:2025-12-02

*基金项目:国家自然科学基金面上项目(42171246)

第一作者:王涵宇(2000-),男,硕士生,研究方向为城市森林及其生态服务功能。E-mail:why@nefu.edu.cn

通信作者:王蕾(1983-),女,博士,教授,研究方向为城市森林及其生态服务功能。E-mail:wanglei@nefu.edu.cn

random forest models. Ultimately, Random Forest Regression and Geographically Weighted Regression (GWR) models are employed to analyze the impact of canopy temperature variation on AGB and its spatial heterogeneity.【Result】 1) The Gap Fraction Profile (GFP) emerged as the dominant predictor for AGB estimation, yielding a model accuracy of R^2 = 0.89 and RMSE = 2.96 kg · m^{-2}. 2) Canopy mean temperature exhibited a significant negative correlation with AGB (P<0.01). When T_{max} exceeded 30 ℃, the rate of AGB decline accelerated. 3) Temperature impacts demonstrated non-stationarity: positive effects in southern areas contrasted with negative effects in northern regions. The high-value zones of the Temperature-Dependent Ecosystem Intensity Index (TDEI) shifted seasonally. Spring showed predominantly positive responses, while summer transitioned to negative responses, closely linked to high-temperature stress inhibiting tree growth in summer.【Conclusion】 Canopy mean annual temperature generally exhibits a negative correlation with above-ground biomass, while temperature sensitivity presents pronounced spatial heterogeneity. The TDEI demonstrates the characteristics of spatio-temporal migration from spring to summer. Therefore, in the summer hot-spot areas where canopy maximum temperature is higher than 30 ℃, species with high canopy density and heat tolerance should be prioritized, thereby mitigating the suppression of above-ground biomass by high-temperature stress. Future studies should further expand the sample range to cover different climate zones and prolong the observation time series, so as to make a deeper analysis of the dynamic "temperature stress - structure adaptation - above-ground accumulation" relationship and provide more scientific evidence for urban forest management.

Keywords: UAV-LiDAR; urban forest; canopy temperature; above-ground biomass

随着气候变化不断加剧，森林碳循环与气候因子的互馈关系成为学者们关注的热点问题[1]。城市森林作为城市中重要的碳汇空间，在维持城市气候、调节碳平衡及改善人居环境方面具有关键作用。城市森林地上生物量的空间分布与时间动态直接关联碳汇功能强弱，是评估城市生态系统稳定性与气候适应性的核心指标[2-3]。因此，准确量化地上生物量，解析温度对地上生物量的复杂影响，对城市森林生态规划与碳汇潜力提升具有重要意义[4]。

温度是影响城市森林生物量积累的关键气候因子，其通过影响光合作用效率、呼吸消耗速率及养分循环等生理过程，对生物量形成产生非线性影响作用[5-6]。已有研究发现，在不同气候区、不同林型中，温度对地上生物量的影响存在显著差异。Bennett 等[7]在澳大利亚大尺度研究中发现，最干季均温是森林地上生物量的强预测因子；Keith 等[8]分析了年均温对王桉（*Eucalyptus regnans*）林地上生物量的综合影响；Fu 等[9]也指出温度相关气候变量对树木地上生物量具有重要作用。李娜等[10]通过长期高温胁迫实验发现樟子松幼苗生物量积累受温度升高幅度显著影响，温度达到一定阈值会导致种群生物量受严重抑制。因此，温度深刻影响植物生长速率与生态系统碳循环，亟需深入探究冠层温度对城市森林地上生物量的复杂影响机制。

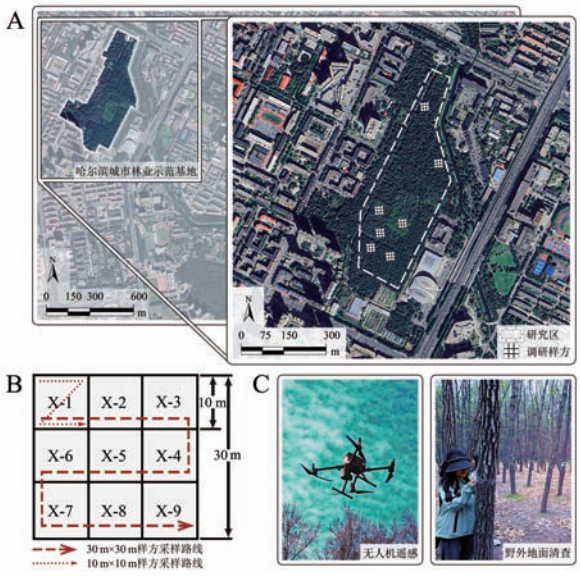
然而，传统城市森林地上生物量研究依赖野外样地实测，样地调查耗时费力，在城市复杂景观中难以大规模开展[11]；同时，冠层温度的传统定点观测存在"点面不匹配"问题，卫星遥感反演虽能覆盖大范围，但分辨率较低，无法捕捉城市森林小尺度的温度异质性，导致地上生物量与冠层温度的精细分析难以实现[12-13]。随着无人机技术的快速发展，多源数据的融合成为解决问题的关键[14-15]。无人机激光雷达（UAV-LiDAR）能够准确量化冠层三维结构，实现地上生物量的精准估算；无人机热红外影像能够反演高分辨率冠层温度，实现温度空间格局的精细刻画[16-17]。二者融合形成了"结构-温度"匹配的双因子数据集，为解析冠层温度对地上生物量的影响提供了数据支持。

本文选择哈尔滨市城市林业示范基地为研究区，进行以下研究：1）融合 UAV-LiDAR 与热红外数据，精准估算地上生物量并反演冠层温度；2）分析冠层温度与地上生物量的空间关联特征；3）揭示冠层温度季节变化对地上生物量的影响，为

城市森林碳汇评估与气候适应性规划提供科学依据。

1　研究区概况

选取哈尔滨市城市林业示范基地作为研究区域（图 1A）。该区域位于黑龙江省哈尔滨市（126°37′E—130°10′E，45°42′N — 45°43′N），属于中温带大陆性季风气候，年平均气温 5.6 ℃，极端气温分别为 38 ℃和－37 ℃，年均降水量 534 mm；夏季均温 23.6 ℃，冬季均温－15.8 ℃，降雪多集中于 11 月至次年 1 月，年温差高达 60 ℃[18-20]。哈尔滨市城市森林常见树木共 66 种，隶属于 34 属 18 科。研究区内地势平坦，生长有黑龙江省主导树种，包括兴安落叶松（*Larix gmelinii*）、黄檗（*Phellodendron amurense*）、樟子松（*Pinus sylvestnis*）、黑皮油松（*Pinus tabuliformis* var. *mukdensis*）、胡桃楸（*Juglans mandshurica*）、蒙古栎（*Quercus mongolica*）、水曲柳（*Fraxinus mandshurica*）、白桦（*Betula platyphylla*）、糖槭（*Acer saccharum*）等主要树种，形成以小面积纯林（约 70 m×70 m）为主的块状混交林[21-23]。该地区四季温差显著，夏季地表热效应突出，冬季寒冷干燥，城市森林的空间格局对局地热环境具有重要调节作用。同时，样地林分结构典型、人为干扰明显，是研究城市森林地上生物量与温度关系的理想区域[24]。



注：A 研究区域及样方位置；B 样方规划与采样路线；C 数据获取方法。

图 1　研究区设置与数据获取

2　研究方法

2.1　数据来源

2.1.1　野外数据收集

2024 年 5—11 月，在哈尔滨市城市林业示范基地选取兴安落叶松林、樟子松林、白桦林、蒙古栎林及兴安落叶松-白桦混交林等具有代表性的林型布设样地。样地布设考虑林型比例、林缘-内部梯度及人为干扰程度差异，以确保样方的空间代表性。在研究区内尽量均匀分布的条件下，采用随机布点法布设 7 个 30 m×30 m 的采样点（图 1A），最大程度覆盖研究区空间。在 7 个 30 m×30 m 样方内使用 Topcon RTK（HiperII G）系统对样方内胸径达到或超过 5 cm 的存活乔木和灌木进行实时定位，记录树种、树高、冠幅、胸径、灌木胸径、地径及叶面积指数（图 1B~C）。

2.1.2　无人机机载激光雷达数据

使用大疆 Matrice 300 RTK 无人机搭载 Zenmuse L1 激光雷达传感器，获取研究区所需数据[18]。数据采集于 2024 年春季（5 月 13 日）、夏季（7 月 16 日）、秋季（9 月 19 日）和冬季（11 月 19 日）的上午 10：00—12：00，相邻季节间隔 63±1 d，以确保季节时序一致性。原始 LAS 格式点云经坐标转换至 CGCS2000 坐标系后，采用布料模拟滤波算法分离地面与非地面点并去噪，进而生成 1 m 分辨率的数字地形模型与冠层高度模型[25]。

2.1.3　无人机机载多光谱数据

多光谱数据采集使用同平台搭载的 YuSense MS600 Pro 多光谱相机，与激光雷达数据同步获取[18]。原始 TIFF 格式影像通过 Pix4Dmapper 进行拼接，并利用 Agisoft Metashape Pro 进行辐射校正。同时，基于 Pix4Dmapper 生成数字表面模型（地面误差<3 cm），并进一步提取数字高程模型与冠层高度模型。

2.1.4　无人机机载热红外数据

热红外数据由大疆 Mavic 3T 无人机配载 H20T 热像仪采集，时间与上述数据同步，采集期间气象稳定、晴朗无风。获取的 JPG 格式双通道热红外影像通过 DJI Thermal SDK 程序和 Python 中的 numpy 模块将 RAW 图像批量转换为 TIFF 格式[25]，再通过 Agisoft Metashape Pro 软件拼接、校

正并生成正射影像，最终得到完整的热红外影像用于冠层温度反演与分析。

2.2 城市森林地上生物量估算

基于预处理后的 LAS 格式激光雷达点云与 TIFF 格式多光谱影像，提取 13 个关键冠层特征指标（表 1），其中，样方最大冠层高度体积（Vol）和样方高度多样性和均匀性归一化指数（VCI）有效表征垂直空间填充与分层复杂性，NDVI 和 cv 则反映植被活力与冠层异质性。样方地上生物量通过异速生长模型估算，方程使用 R 中的 allodb 包，以野外数据收集所确定的所在网格单木 ID（treeID）、胸径（dbh）、树高（H）、属（genus）与树种（species）为依据。以地面实测地上生物量为因变量，上述 13 项指标作为自变量，采用 R 中的 randomForest 包构建随机森林（Random Forest，RF）回归模型。模型采用 500 棵决策树，节点分裂时随机选取 4 个候选变量（mtry = 4），最小叶子节点样本数选择最优解为 6（min_ samples_ leaf = 6），并通过五折交叉验证评估泛化能力。

表 1 冠层三维结构指标定义

类型	结构指标	结构指标名称缩写	结构指标描述
物理排列	高度指标	H_{min}	样方最小树冠高度
		H_{max}	样方最大树冠高度
		H_{mean}	样方平均树冠高度
		H_{std}	样方高度标准差
		TR	样方 1 m^2 空间内树冠高度标准差
		MOCH	样方最大高度的平均值
	覆盖指标	GFP	样方中 3 m 以上的间隙分布
		VAI	样方内从离地面 3 m 开始，每隔 1 m 水平面的叶面积密度之和
		Rumple	冠层表面积相对于样方面积的比值
三维体积	体积指标	Vol	样方最大冠层高度体积
		VCI	样方高度多样性和均匀性归一化指数
	光谱指标	NDVI	样方归一化差异植被指数
		cv	变异系数

2.3 冠层温度反演

基于 Pix4Dmapper 软件对热红外数据集进行几何校正，通过地面控制点（GCP）匹配优化空间基准，使实际误差精度保持在 3 cm 以内，并使用 QGIS 软件对优化后的 RGB 图像进行去噪。热红外数据通过辐射定标，将亮温转换为冠层温度，并考虑植被发射率和航次气象数据进行修正，以减小环境误差对分析结果的影响，最终经去噪得到高质量热红外影像。以该热红外数据集为基图，将该数据与激光雷达预处理中划分的 10 m×10 m 网格进行空间配准，从每个网格提取对应的温度参数与冠层结构数据，并确保其在分辨率上一致。提取的温度特征包括冠层温度平均值（T_{mean}）、冠层温度最大值（T_{max}）、冠层温度最小值（T_{min}）、冠层温度标准差（T_{std}）。

2.4 冠层温度对地上生物量变化的影响

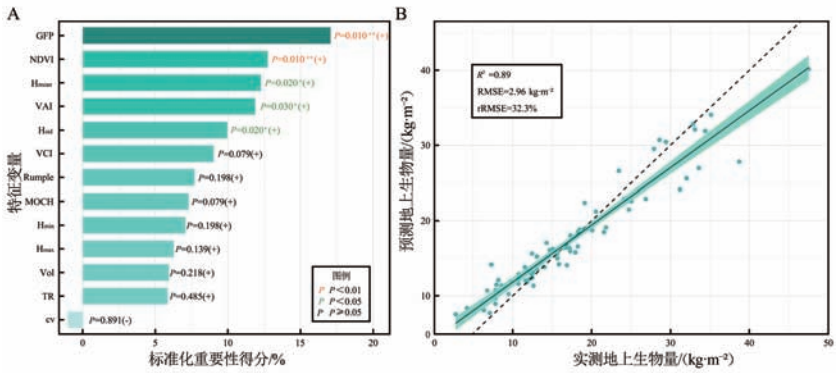
通过地理加权回归（GWR）模型揭示温度影响能力的空间异质性，分析采用 R 中的 spgwr 包实现 GWR 分析，引入空间非平稳性量化局部区域中温度对城市森林地上生物量的差异化影响，探究温度对森林地上生物量的影响能力在空间分布规律上的异质性。基于 10 m×10 m 网格单元，计算温度与森林地上生物量的局部回归系数，并利用自适应带宽核函数优化空间权重矩阵，分析对应区域冠层结构复杂程度与垂直结构复杂程度，判断对应的温度敏感性。模型带宽采用修正的 Akaike 信息准则（AICc）进行优化，通过取 AICc 最小值自动获取用于分析的模型最优带宽，以平衡模型复杂度与拟合精度，最终结合随机森林模型融合多源数据，生成温度影响强度指数（TDEI）空间分布图。TDEI 定义为各网格在特定季节平均温度每升高 1℃ 所引起的地上生物量变化量，量化了温度影响的局部强度与方向，其空间分布通过随机森林模型与多源数据（结构、光谱指标）融合验证，用以表征温度影响的局部强度与空间变异特征。

3 结果与分析

3.1 城市森林地上生物量估算指标优选及精度评估

随机森林特征重要性分析（图 2A）表明，覆

盖参数 GFP 是主导预测因子，其标准化重要性得分高达 17%，远高于其他指标；其次是 NDVI、H_{max}、VAI 与 H_{std}，共同构成对分异规律影响最强的 5 个指标；而部分指标如 cv 则因生态关联较弱被自动剔除。模型精度验证进一步支持上述指标优选的有效性：实测与预测地上生物量回归分析（图 2B）显示，整体 $R^2=0.89$，RMSE = 2.96 kg · m^{-2}，由于地上生物量较高区域所收集的激光雷达数据点云密度足够高，基本可以排除因错误纳入非树木目标产生的激光雷达点云所导致的树高反演误差，使树高反演结果足够稳定，能够支持该回归分析在地上生物量较高区段的可靠性。



注：A 森林结构指标与温度指标在地上生物量对温度变化响应的空间分异规律分析中的重要性对比；B 实测地上生物量−预测地上生物量的回归分析；* 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.01$。

图 2　结构与温度指标重要性对比及预测模型验证

3.2　城市森林地上生物量的空间分布特征

研究区内地上生物量呈现空间差异，且高值区域在不同季节间表现出明显的迁移特征，整体呈现出由西部区域向东南部区域方向的极值轨迹演变（图 3），具体数值体现为春季地上生物量平均值为 15.95 ± 5.23 kg · m^{-2}，生物量范围为 9.47 ~ 36.65 kg · m^{-2}；夏季地上生物量平均值为 17.25 ± 5.51 kg · m^{-2}，生物量范围为 7.76 ~ 37.14 kg · m^{-2}；秋季地上生物量平均值为 17.01 ± 5.26 kg · m^{-2}，生物量范围为 8.05 ~ 35.19 kg · m^{-2}；冬季地上生物量平均值为 14.17 ± 2.39 kg · m^{-2}，生物量范围为 10.09 ~ 28.59 kg · m^{-2}。从季节动态来看，春季采样期地上生物量高值核心区主要集中于西部区域；夏季阔叶林（如蒙古栎）冠层覆盖程度达到最高的过程与其地上生物量快速累积的过程相吻合；秋季采样期，西北部针叶林区仍维持较高地上生物量水平（AGB ≥ 25 kg · m^{-2}），而中部阔叶林区则下降，反映出针叶树种在延长碳固定周期中的关键作用；冬季采样期，样地地上生物量总体呈衰减趋势，但针叶林区域仍保持在 24 ~ 26 kg · m^{-2}。研究区中的生物量低值区（AGB < 10 kg · m^{-2}）在春季主要分布于道路边缘，冬季则向林窗扩展，此类现象可能由人类活动以及冠层覆盖度丧失引发的积雪再分配所导致。

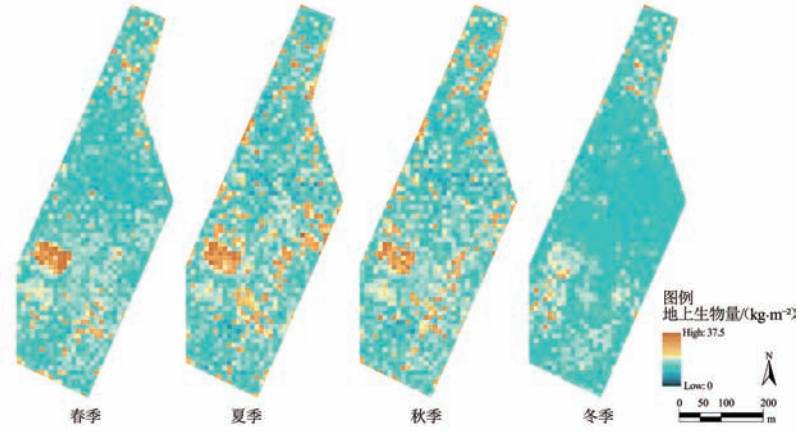


图 3　研究区 2024 年四季地上生物量分布

3.3 城市森林冠层温度的空间分布特征

图 4 表明，春季 T_{max} 开始回升，而整体 T_{std} 较低，表明此时林内微气候相对一致。进入夏季，随着太阳辐射增强，T_{max} 有所升高，尤其在西部核桃楸纯林区域形成了超过 30 ℃ 的高值核心区。同时，林缘、道路周边及破碎化林地区域的 T_{std} 明显增大，说明这些地方的温度波动更为剧烈。秋季，尽管 T_{max} 有所回落，但其空间格局仍保留夏季的部分特征；西北部针叶林区 T_{std} 较低，显示了常绿林冠对微气候的稳定作用。冬季全区域 T_{max} 普遍低于 0 ℃，低温中心多出现在开阔林窗与边缘地带，而高郁闭度林分内部由于密闭冠层的存在，不仅温度相对较高且波动小，T_{std} 低于周边区域。

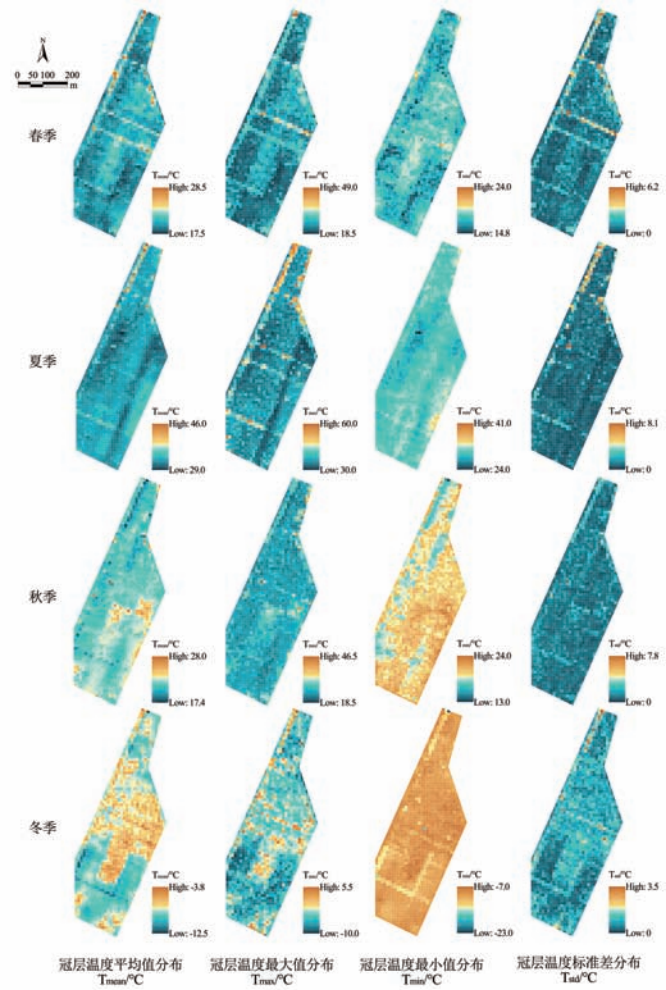


图 4 研究区 2024 年四季冠层温度分布

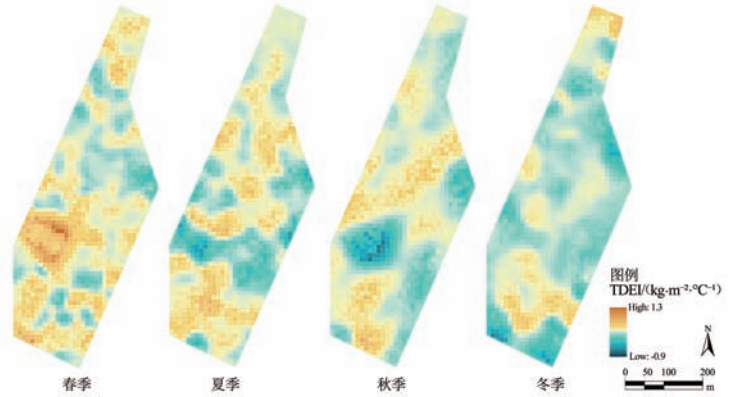


图 5 研究区 2024 年四季温度影响强度指数（TDEI）分布

3.4　冠层温度对地上生物量的影响

TDEI 作为表征局部生态系统对温度变化响应敏感性的指标，其空间格局揭示了冠层温度对地上生物量的影响存在差异（图 5）。春季，TDEI 整体以正向为主，平均值约为 0.15 kg·m^{-2}·℃ $^{-1}$，表明此时温度上升对地上生物量增长有正面促进作用。夏季 TDEI 开始呈现明显的冷峰与热峰双峰结构，该季节 TDEI 最低值点位于蒙古栎林，低至−0.6 kg·m^{-2}·℃ $^{-1}$，说明高温胁迫已开始抑制地上生物量增长；而中部和东部部分郁闭度较高的林分仍维持正向响应，TDEI 值保持在 0.1~0.2 kg·m^{-2}·℃ $^{-1}$。秋季 TDEI 普遍转为负值，且绝对值增大，尤其在西北部针叶林边缘形成强负响应中心，TDEI 值低至−0.8 kg·m^{-2}·$℃^{-1}$，表明随着气温下降和落叶进程启动，温度降低成为限制碳同化的主要因子，但部分密闭林分仍表现出较低的负响应强度，TDEI 约在 −0.1 ~ −0.2 kg·m^{-2}·℃ $^{-1}$。冬季 TDEI 整体趋于稳定，大部分区域接近零或小幅负值，平均 TDEI 值约为−0.05 kg·m^{-2}·℃ $^{-1}$，说明低温条件下地上生物量变化趋缓，生态系统进入休眠状态，冠层温度对地上生物量的直接影响减弱。同时，研究也发现在达到一定温度状态下，温度与地上生物量存在非线性关系，结合图 4~5 可以发现，T_{max}>30 ℃ 的区域呈现 TDEI 降低且绝对值增大的状态，即当 T_{max}>30 ℃ 时，地上生物量下降速率加剧，可以解释为 30 ℃ 作为阈值所开始产生的高温胁迫已开始抑制该区域地上生物量增长。但值得注意的是，阈值效应可能存在较强的树种间差异性。不同树种如针叶林与阔叶林的 TDEI 拐点存在一定差异，这种差异的产生可能与不同树种的蒸腾效率及热耐受性有关，进一步解释了 TDEI 空间格局中冷峰与热峰双峰结构的形成原因。该关键阈值的明确为理解城市森林对气候变暖的响应形式提供了更深入的见解。

4　讨论

4.1　冠层温度对城市森林地上生物量影响的季节差异

本研究通过融合无人机多源遥感数据与地面实测数据，发现冠层温度与城市森林地上生物量总体上呈负相关关系，这与 Larjavaara 等[4]关于气候变暖普遍导致森林生物量下降的结论一致。然而，在部分区域，冠层温度与地上生物量间并非简单的线性负相关，而是呈现出季节与空间上的非线性复杂关系。这种差异可能源于城市森林特有的结构异质性，以及人为干扰导致的冠层结构差异。

与以往研究多采用年平均温度或生长季平均温度作为主导变量的不同，本研究基于冠层温度的季节动态分析，结果表明：春季冠层温度升高与地上生物量的增加呈正相关；而进入夏季高温阶段后，局部区域的地上生物量则随冠层温度升高而下降。这一发现与 Fu 等[9]在区域尺度上提出的“温度持续促进生物量积累”的趋势存在明显差异。两者之间的差异表明，在城市森林中，冠层温度并非持续有利于地上生物量的积累，尤其在夏季高温条件下，冠层温度更可能成为限制生物量积累的关键因子。

4.2　展望

尽管本研究取得了一定成果，但仍存在一些局限性。首先，数据采集局限于哈尔滨市城市林业示范基地一年的数据，可能导致结论的普适性和长期气候适应效应的评估不足。其次，由于研究区位于大学校园内，常驻活动人群的行为模式可能不同于普通城市环境，这对树木生长可能存在特殊影响。此外，还存在两方面的模型误差：一是激光雷达点云密度在空间上存在异质性；二是未考虑冠层水分胁迫等关键生态因子。未来研究需进一步拓展样本范围，涵盖不同气候区，并延长观测时间序列，从而更深入地解析“温度胁迫−结构适应−地上生物量积累”之间的动态关系，为城市森林管理提供更具科学性的依据。

5　结论

本研究揭示了城市森林冠层温度对地上生物量空间分布格局的影响。年均冠层温度与地上生物量整体呈负相关，且温度敏感性存在明显的空间分异；TDEI 在春夏季呈现时空迁移特征，春季以正向响应为主，夏季则逐渐呈现负向响应特征。因此，在冠层温度最大值超过 30 ℃的夏季热极端高发区域，应优先布局郁闭度高、耐热性强的树

种，从而缓解高温胁迫对地上生物量的抑制作用。针对 TDEI 空间异质性特征，可通过合理补种密植增强南部区域冠层密闭性，并通过增绿减硬等管理策略提升区域地上生物量，优化碳汇功能。研究结果为高分辨率城市森林碳汇评估与气候适应性规划提供了可靠的技术支撑。

参考文献

[1] MITCHARD E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change[J]. Nature, 2018, 559(7715): 527-534.

[2] 陈永翀, 史正军, 曾伟, 等. 深圳建成区城市绿地乔木层碳密度估算及分布特征[J]. 中国城市林业, 2024, 22(4): 43-50.

[3] ZHU C M, LI Y P, DING J L, et al. Spatiotemporal analysis of AGB and BGB in China: responses to climate change under SSP scenarios[J]. Geoscience Frontiers, 2025, 16(3): 102038.

[4] LARJAVAARA M, LU X C, CHEN X, et al. Impact of rising temperatures on the biomass of humidold-growth forests of the world[J]. Carbon Balance and Management, 2021, 16(1): 31.

[5] GARCÍA-CARRERAS B, SAL S, PADFIELD D, et al. Role of carbon allocation efficiency in the temperature dependence of autotroph growth rates[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(31): E7361-E7368.

[6] COLLALTI A, IBROM A, STOCKMARR A, et al. Forest production efficiency increases with growth temperature [J]. Nature Communications, 2020, 11: 5322.

[7] BENNETT A C, PENMAN T D, ARNDT S K, et al. Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale[J]. Ecography, 2020, 43(11): 1692-1705.

[8] KEITH H, MACKEY B G, LINDENMAYER D B. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(28): 11635-11640.

[9] FU L Y, LEI X D, HU Z D, et al. Integrating regional climate change into allometric equations forestimating tree aboveground biomass of Masson pine in China[J]. Annals of Forest Science, 2017, 74(2): 42.

[10] 李娜, 孙涛, 毛子军. 长期极端高温胁迫对樟子松幼苗生物量及非结构性碳水化合物的影响[J]. 植物研究, 2014, 34(2): 212-218.

[11] MARVIN D C, ASNER G P, KNAPP D E, et al. Amazonian landscapes and the bias in field studies of forest structure and biomass[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(48): E5224-E5232.

[12] URRACA R, LANCONELLI C, GOBRON N. Impact of the spatio-temporal mismatchbetween satellite and *in situ* measurements on validations of surface solar radiation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2024, 129(10): e2024JD041007.

[13] SMIGAJ M, AGARWAL A, BARTHOLOMEUS H, et al. Thermal infrared remote sensing of stress responses in forest environments: a review of developments, challenges, and opportunities[J]. Current Forestry Reports, 2024, 10(1): 56-76.

[14] 孙中宇, 陈燕乔, 杨龙, 等. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 528-536.

[15] 张志明, 徐倩, 王彬, 等. 无人机遥感技术在景观生态学中的应用[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4029-4036.

[16] JIA J, WANG L, YAO Y L, et al. Nonlinear relationships between canopy structure and cooling effects in urban forests: Insights from 3D structural diversity at the single tree and community scales[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 118: 106012.

[17] AWAIS M, LI W, CHEEMA M J M, et al. UAV-based remote sensing in plant stress imagine using high-resolution thermal sensor for digital agriculture practices: a meta-review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(1): 1135-1152.

[18] ZHAI Y L, WANG L, YAO Y L, et al. Spatially continuous estimation of urban forest aboveground biomass with UAV-LiDAR and multispectral scanning: an allometric model of forest structural diversity [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 360: 110301.

[19] 石磊, 薛婷. 浅析城市森林生态系统内降雨特征: 以东北林业大学城市林业示范研究基地为例[J]. 国土绿化, 2020(8): 57-58.

[20] WANG L, DENG J R, YANG L J, et al. Dynamic analysis of particulate pollution in haze in Harbin city, Northeast China[J]. OpenGeosciences, 2021, 13(1): 1656-1667.

[21] 张晶虹, 刘丙万. 东北林业大学城市林业示范基地蒙古栎种群扩散研究[J]. 现代农业科技, 2013(12): 135-137.

[22] 王蕾, 贾佳, 翟雅琳, 等. 协同空地数据的城市森林冠层结构预测物种多样性潜势研究: 以哈尔滨市为例[J]. 地理科学, 2024, 44(8): 1481-1491.

[23] 汪永英, 孟琳, 韩冬荟, 等. 城市森林物种多样性: 以哈尔滨城市林业示范基地为例[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(3): 34-38.

[24] ZHANG Y, SHAO Z F. Assessing of urban vegetation biomass in combination with LiDAR and high-resolution remote sensing images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42(3): 964-985.

[25] JIA J, WANG L, YAO Y, et al. Canopy niche diversity and complementarity impact the forest vertical thermal environment in an urban area[J]. Forest Ecology and Management, 2024, 563121979.