# 城市树木影响太阳辐射的研究进展*

许诗雨 尹 豪

北京林业大学园林学院 北京 100083

**摘要**：太阳辐射是城市热环境演变的主导能量来源，城市树木通过遮蔽、反射、吸收、透射与散射作用，影响太阳辐射传输，并显著改善微气候与热舒适。文章基于 PSALSAR 综述框架，纳入 206 篇高相关文献作为研究数据库，系统梳理城市树木影响太阳辐射的多尺度效应、关键影响因素、研究方法三方面内容。结果表明，区域、街道、建筑尺度的植物均能显著削弱太阳辐射并降低环境温度。叶密度是影响太阳辐射的首要因素，树高、冠幅及街道形态、建筑朝向等也对太阳辐射具有一定调节作用。ENVI-met、Ecotect Analysis 等环境模拟软件与遥感反演是主流技术路径，为量化太阳辐射削减及其空间分布提供支撑。未来研究应加强季节动态、树种差异及多尺度耦合模型探索，构建基于智能算法的预测体系，以支撑城市绿化规划与气候适应性设计。

**关键词**：城市树木；太阳辐射；热辐射；建筑日照

DOI：10.12169/zgcsly.2025.06.30.0001

## Research Progress in the Influence of Urban Trees on Solar Radiation

Xu Shiyu Yin Hao

(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract**: Solar radiation is the dominant energy source that drives the evolution of the urban thermal environment. Urban trees influence the transmission of solar radiation through shading, reflection, absorption, transmission, and scattering, thereby significantly improving the microclimate and thermal comfort. Based on the PSALSAR review framework, this paper includes 206 highly relevant literature as the research database to review the multi-scale effects, key influence factors and research methods of urban trees affecting solar radiation. The results show that vegetation at regional, street, and building scales can substantially attenuate solar radiation and reduce ambient temperatures. Leaf density is identified as the primary factor affecting solar radiation, while tree height, crown width, street geometry, and building orientation also exert regulatory effects. Environmental simulation tools such as ENVI-met and Ecotect Analysis, together with remote sensing inversion, represent the mainstream methodological approaches, providing strong support for quantifying solar radiation reduction and its spatial distribution. Future research should focus on seasonal dynamics, species-specific differences, and multi-scale coupled modeling, as well as the development of predictive frameworks based on intelligent algorithms, to better support urban green space planning and climate adaptive design.

**Keywords**: urban tree; solar radiation; thermal radiation; architectural sunshine

收稿日期：2025-06-30

* 基金项目：北京市共建项目（2019GJ-03）；北京林业大学热点追踪项目（2022BLRD05、2024-HXFW-556）

第一作者：许诗雨，女，硕士生，研究方向为风景园林规划设计。E-mail：1192207872@qq.com

通信作者：尹豪，男，博士，教授，研究方向为风景园林规划设计。E-mail：yinhao@bjfu.edu.cn

城市化进程使硬质铺装与建筑面积比例不断提高，导致太阳辐射在复杂空间中多次反射，产生长短波耦合热效应。太阳辐射是城市热环境演变的主导能量源，建筑物和树木冠层通过遮挡短波辐射可显著减少人体热负荷[1]，降低平均辐射温度（$T_{mrt}$）与生理等效温度（PET）。

本文中“城市树木”指道路、广场、公园等地面上的乔木和灌木，不含立体绿化及屋面绿化，这类树木通过遮荫、蒸腾增湿与调节潜热通量为近地层降温。

当前研究涵盖城市、街道、建筑等多个尺度。研究表明，树冠拦截短波辐射是降低 $T_{mrt}$ 的主导机制，贡献超过 70%[2]；叶片反射亦可削减建筑表面及地表吸热[3]，在缓解城市热岛效应、改善室外热舒适度、降低建筑能耗和热灾害风险等方面发挥关键作用[4]。

既往研究聚焦城市树木影响太阳辐射的机制、因子和效益，对已有成果缺乏综述。因此，本文系统梳理并总结城市树木调控太阳辐射的研究进展，重点关注其影响因子及作用机制、研究方法与现有问题，旨在深化对城市树木调节太阳辐射机制的认识，展望未来研究方向，为构建可持续与宜居城市环境提供科学支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 文献筛选

本文采用 PSALSAR 框架[5]（图 1），以“城市树木影响太阳辐射”为核心问题，在 Web of Science 与 CNKI 以“太阳辐射（solar radiation）”“树木（tree）”“影响（influence）”等关键词（表 1）建立检索式，获得 1 134 篇文献（中文 138 篇，英文 996 篇）。Appraisal 环节经过筛选，最终纳入 206 篇相关性较高的文献。




图 1 PSALSAR 框架

表 1 检索关键词及检索式

| 中文关键词 | 英文关键词 | 中文检索式 | 英文检索式 |
|---|---|---|---|
| 城市树木、行道树、绿化、乔木、城市森林 | tree, forest, green space *, green infrastructure, canopy, vegetation, street tree *, park, woodland | (SU='城市树木' OR SU='行道树' OR SU='绿化' OR SU='乔木' OR SU='城市森林') AND (SU='太阳辐射' OR SU='太阳辐射热' OR SU='短波辐射' OR SU='日照' OR SU='采光') AND (SU='影响' OR SU='效应' OR SU='作用' OR SU='削减' OR SU='遮荫' OR SU='调节' OR SU='降温') | (TS=((tree * OR forest * OR "green space *" OR "green infrastructure" OR canopy OR vegetation OR "street tree *" OR park * OR "woodland *"))) AND (TI=("solar radiation" OR "shortwave radiation" OR "solar irradiance" OR insolation OR "solar exposure" OR "solar flux" OR "solar energy" OR sunshine)) AND (TS=(effect * OR impact * OR influenc * OR reduc * OR mitigat * OR attenuat * OR intercept * OR shield * OR shade * OR shading OR modulat * OR regulat * OR cool * OR "thermal comfort" OR "heat island" OR "microclimate")) |
| 太阳辐射、短波辐射、日照、采光 | solar radiation, shortwave radiation, solar irradiance, insolation, solar exposure, solar flux, solar energy, sunshine | | |
| 影响、效应、作用、削减、遮荫、调节、降温 | effect, impact, influence, reduce, mitigate, attenuate, intercept, shield, shade, modulate, emulate, cool, thermal comfort, heat island, microclimate | | |

### 1.2 文献分布与研究热点演变

文献统计（图 2）表明，中文研究在 2000 年后开始增长，并于 2016 年达到首个峰值，此后稳定在约每年 10 篇。英文研究起步较早，在 2005 年后显著攀升。随着全球变暖及城市热岛加剧，相关研究持续增多，以英文论文为主。

本文使用 VOSviewer 进行文献共词分析与可视化统计。以关键词出现频次不少于 10 次为筛选条件，最终获得 91 个核心关键词。早期高频词“气候、温度、日照、冠层”等表明研究主要聚焦太阳辐射对温度和光照的影响；近期新增“预测、机器学习、深度学习”等词表明技术进步正推动太阳辐射预测与大尺度、高精度模拟的兴起（图 3）。

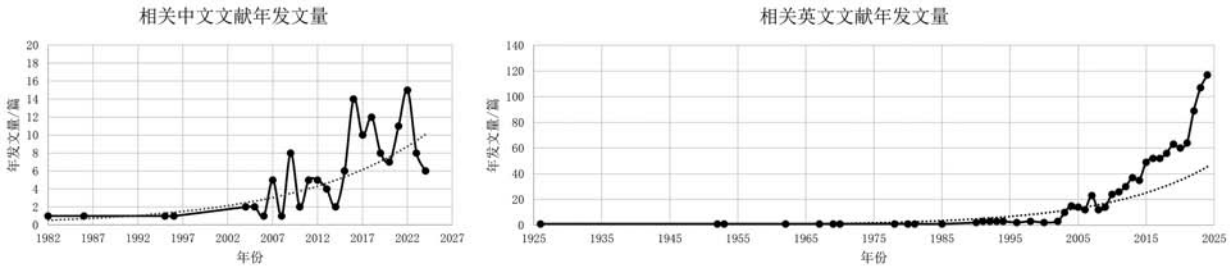



图 2　城市树木对太阳辐射影响相关论文发文量

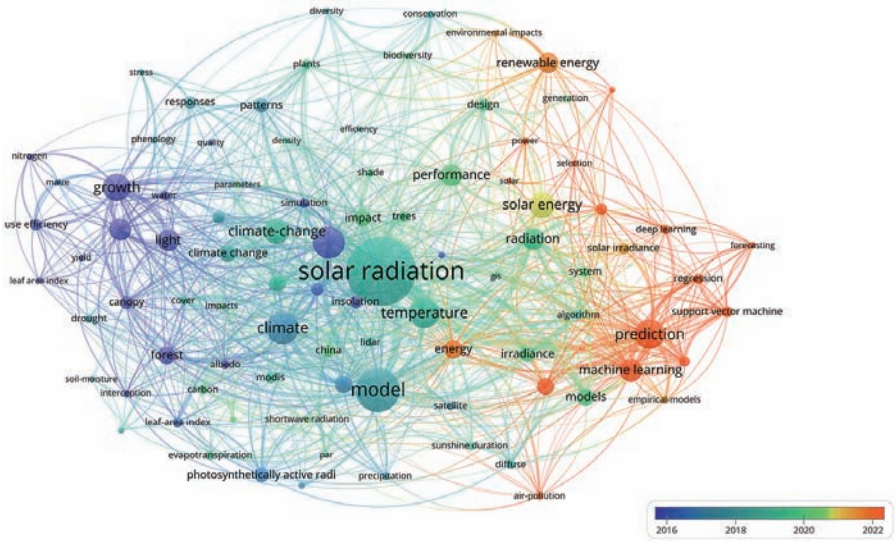



图 3　利用 VOSviewer 关键词（2015—2025 年）进行可视化的网络分析

## 2　城市树木对太阳辐射的影响

Oke[1]将科学研究分为 4 个阶段：现象识别与描述、现象与其他因素的联系、现象形成机制、过程-响应模型的建立与预测。目前 88.4%的研究处于现象与其他因素的联系、现象形成机制阶段，探讨植物因子与太阳辐射绩效指标的统计学关系。从研究时间来看，61.7%的文献覆盖全年或夏冬两季，20.6%仅关注夏季太阳辐射变化，15.3%聚焦冬季植物影响，2.4%研究冬至日或夏至日等特定观测日的太阳辐射情况。当前研究以定量为主，城市和区域尺度研究占 67.2%，单体建筑尺度占 24.8%，街道尺度占 8%，反映出学界目前更关注大尺度城市形态与下垫面对太阳辐射的影响（图 4）。

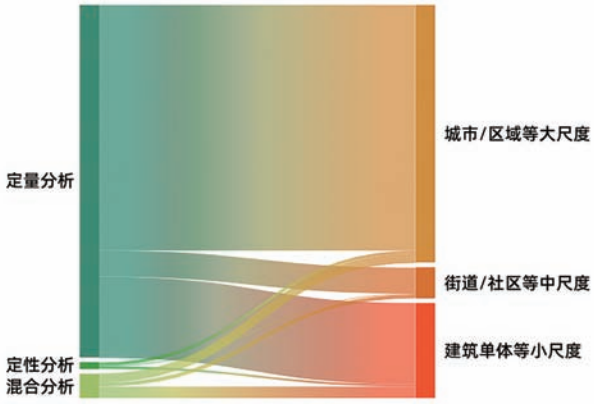



图 4　城市树木影响太阳辐射研究中的研究类型与研究尺度

### 2.1　城市和区域尺度

在城市和区域尺度，植被通过影响地表辐射收支过程，在调节太阳辐射和城市热环境中发挥关键作用。研究多聚焦城市森林或大型公园，“公园冷岛”效应可使内部及下风向气温下降 0.5~2.2 ℃[6-7]。零散分布的小型绿地因空间不连续、规模小，难以显著影响城市整体热环境。绿地的空间连通性比单点规模更能决定其降温能力。因此，城市绿地网络化规划成为缓解热环境的重要路径，通过道路林荫带与公园绿地的串联布局，可扩大植被遮荫范围并提升对城市太阳辐射与热环境的综合调控能力[8-9]。

### 2.2 街道和社区尺度

在街区层面，研究多关注树木对局部辐射环境和行人热舒适的调节作用。树木能有效降低居住社区的空气温度和辐射通量，显著降低辐射热负荷与生理等效温度[10]。

街道峡谷是室外热环境的重要研究对象，该尺度的研究多采用软件模拟结合实地测量的方法。行道树通过遮挡直射光和减少路面、建筑立面的辐射，明显降低户外环境的温度[11]。树冠覆盖率较高时，街道平均辐射温度比无树街道降低 26.2~42.1 ℃，且极端高温时段缩短[2]。不同树种与叶面积指数（LAI）虽存在差异，但只要树冠形成有效阴影，其降温与防晒效益均较显著[12]。

街道尺度和形态也对树木遮阳效果具有调节作用。Yan 等[13]发现，夏季树荫在东西向街道的降温幅度是相同条件下临街南侧人行道的 2~4 倍。开阔街道树木对短波辐射的削弱更明显；在高楼密集的街道峡谷中，建筑本身对阳光的遮挡更强，植物附加贡献相对有限，但合理的建筑挑檐与植物种植仍可额外降低周围温度，提升热舒适度和步行体验[14-15]。

### 2.3 单体建筑尺度

单体建筑尺度的研究关注遮荫对建筑能耗与光环境的作用。该尺度的研究多采用精细化模拟与实测结合方法，计算精度较高，能够揭示植被与建筑表面热辐射之间的能量交换过程。办公楼和校园建筑研究较多，居住建筑研究相对不足。夏季有树遮挡时，建筑西墙接收的总热辐射显著降低，其中短波直射辐射的削减量约为长波的 2~3 倍[16]。

过度遮荫也会导致室内自然光不足，反而增加对人工照明的依赖，尤其是楼间大面积绿地、乔木密植的情景下，建筑 1~4 层日照时数显著减少[17-18]。因此，在规划设计中需权衡遮阳和采光。

## 3 城市树木调节太阳辐射的影响因素

树冠通过拦截与散射直射辐射形成阴影，减少到达地面、立面及室内的光量，其调节效应受植物冠层的几何特征、冠层密度、绿地设计因素、植物群落结构、植物种类及光学特性、环境因素多因子耦合影响（图 5）。冠层密度是目前研究普遍认为最关键的影响因子（图 6）。

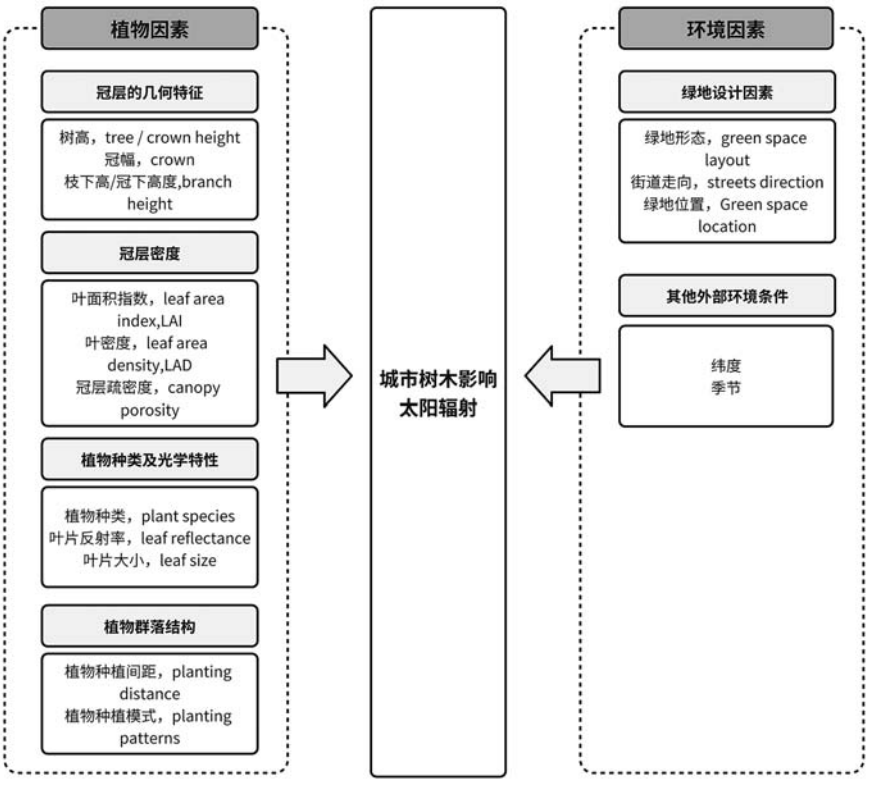



图 5 城市树木调节太阳辐射的影响因素

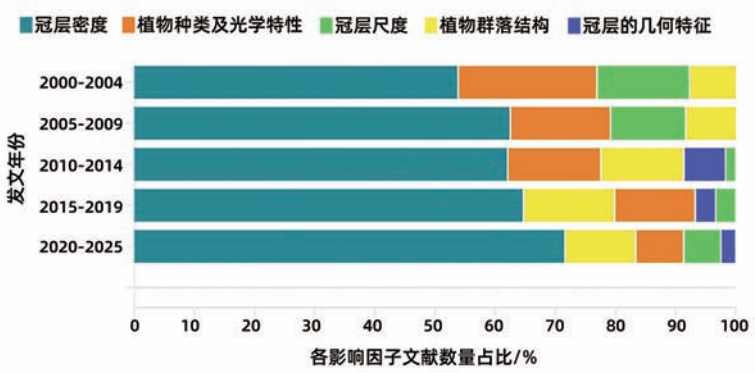



图 6　城市树木调节太阳辐射的影响因素研究趋势

### 3.1　植物因素对太阳辐射的影响

树木单体的形态特征直接影响太阳辐射的拦截能力。首先，树冠的几何形态对太阳辐射削减作用明显，冠幅较大、树高适中的树木降温效应更加显著[19]。在街道峡谷中，冠幅 11 m 的树木遮荫优于小冠幅树种[13]。Guerri 等[20]发现 10 m 高的树木降温效果最佳，其树冠覆盖率最高，地表温度和天空可视因子（SVF）显著下降，阴影持续时间延长。但在高密度街区，将树木种植在主街道或主、次街道太阳辐射高的区域降温效果更好[21]。

多数研究显示，叶面积指数（LAI）起到决定性的作用，LAI 直接影响植物可阻挡的太阳辐射量[22]。夏季叶盛期树冠对直接短波辐射透射率仅为 1~5%，总辐射透射率为 8~15%；冬季无叶期，落叶树仍可阻挡 48~60%的直接辐射分量[23]。

除了叶密度，叶片材质、大小等特征也会影响其辐射调节性能。Deng 等[24]进一步探索了影响城市树木红外辐射传播特性的具体因子。通过光谱仪对城市常见树种进行树冠透射反射比（τR）的实测发现，不同树种叶片反射率的差异较小，而冠层饱满程度与叶片空间连续性比树种差异更能决定其遮阳效果。

植物的种植模式和群落结构决定了多株植物共同作用的整体遮荫格局和辐射调控效果。沿街连续植树形成的林荫走廊明显降低街道辐射负荷，效果远优于零星或单侧植树[25]。但随着树冠覆盖增加，温度呈非线性下降：覆盖率从 0 到 40%时，地表温度下降显著；继续增加至 60%以上时，降温幅度趋于稳定[26]。垂直结构上，多层次植被能在不同高度截获太阳辐射：高大乔木遮挡上层直射光，低矮灌木和地被拦截穿透树冠的剩余辐射和来自天空的散射辐射[27]，但需兼顾下层植物耐阴性与上层植物修剪维护，最大限度地截获各角度入射的太阳辐射，在有限的绿地范围内发挥更好的降温效益。

### 3.2　环境因素对太阳辐射的影响

绿地与建筑的位置关系对建筑日照时长及采光产生直接影响。北京居住区楼间及楼旁约 40°夹角范围内的植物冠层均会对建筑日照产生影响，楼间绿地植物对建筑日照的影响显著高于楼旁绿地[18]。不同树型的最佳遮荫距离已有分级建议：高大乔木在建筑西侧 5 m 节能效益最佳，5~10 m 均提供有效遮荫；中型乔木建议种植在建筑西侧 6 m 内，小型乔木应种植在 3 m 内[28]。设计中应充分考虑建筑朝向与太阳入射角，以实现遮阳与采光的动态平衡。

城市树木调节太阳辐射的效果还受气候条件与季节变化影响，同一树种在不同气候区的遮荫效果也存在一定差异[29]。气候温和的城市，树木夏季使白天近地层空气降温更显著；冬季太阳辐射输入不足，致密树冠可能抑制长波辐射散逸，带来局部微增温现象。全年气候炎热的地区，虽然树木整体具有降温作用，但在中午时段，当树冠覆盖率过高时也可能出现轻微的增温效应[30]。

纬度差异进一步强化了上述效应。在高纬寒冷地区，冬季常绿树木遮蔽会削减采光与取暖[31]。低纬地区全年日照强烈、昼夜变化小，树木遮荫作用更稳定。

城市树木调节太阳辐射的效应并非静态特征，而是受空间结构、气候类型与纬度条件共同调控的动态过程。

## 4 城市树木对太阳辐射影响的研究方法

现有研究方法（图 7）主要为：建筑日照的数学计算与实测、软件模拟、模型验证、遥感技术等。各类方法优势互补，适配不同尺度与精度需求。

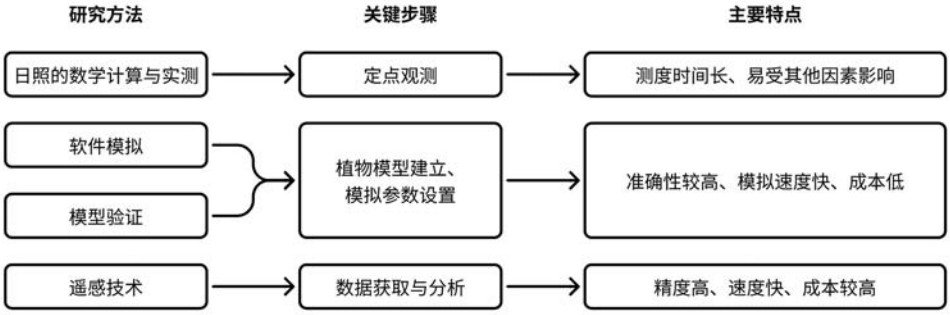



图 7 城市树木对太阳辐射影响相关研究中的研究方法

### 4.1 建筑日照的数学计算与实测

国内早期研究常用传统的日照计算方法，如日照棒影图法、数学模型法、图表法等，均基于太阳位置计算日照时数和遮挡角[17,32]，忽略了建筑布局、树冠形态、树种等其他因素对建筑日照的影响，精度较低。

实测可以直接量化植物辐射削减，为模型模拟提供依据。Campo-Hitschfeld[33] 采用光谱仪测得，五种落叶乔木平均可削弱 82% 的太阳辐射，其中复叶槭（*Acer negundo*）遮阳效果最强，削减率达 95.5%。这类实测研究数据获取较为准确，但无法在指定观测时间内获得较大范围的建筑日照数据，存在一定的时空局限性。

### 4.2 软件模拟

随着计算机技术的发展，三维建模结合日照分析成为主流研究方法。Ecotect Analysis、ENVI-met 与 SOLWEIG 等微气候模型利用光线追踪和视因子算法模拟光照分布及热环境变化。EnergyPlus 与 Radiance 等建筑能耗模型聚焦建筑表面得热与可见光通量，常结合冠层孔隙率模型或点云叶面积密度，求取短波透射率并量化采光与冷负荷差异（表 2）。

表 2 不同研究中采用的模拟软件

| 模拟软件 | 软件简介 | 绩效指标 | 适用场景 |
|---|---|---|---|
| AutoCAD/SketchUp 建模[34] | 利用 SketchUp 建立研究区域模型，通过自带太阳投影模块进行日照几何分析 | 冬至日日照时长 | 多用于早期建筑日照研究，研究模型高度抽象，适合快速初步分析与研究 |
| Ecotect Analysis[18,35] | 设置研究区域气象参数，导入模型进行光环境分析 | 日照时长、长波辐射、冠下平均辐射温度 | 进行基础日照、阴影、热环境分析，精度适中，操作简单，适合进行快速模拟和验证 |
| Ladybug，Honeybee 插件（基于 Grasshopper）[36-37] | 输入研究区域气象数据（EPW 文件），调用 Radiance，EnergyPlus 等引擎进行高精度模拟，计算建筑表面的光照强度和阴影分布 | 通用热气候指数、日光自主率、年日照量、日照时长、平均照度 | 可进行辐射分析，Honeybee 支持高精度采光、能耗、阴影模拟分析，适合全流程日照分析，耗时较长 |
| SOLWEIG 等基于 GIS 开发的软件[38] | SOLWEIG（Solar Outdoor Light Weight Index GIS）是一款基于 GIS 平台的开源工具，用于模拟城市环境中太阳辐射分布及热舒适度 | 三维辐射通量和平均辐射温度、每平方米建筑屋顶接受的太阳辐射量 | 多用于整个城市或街区等较大研究尺度的微气候研究 |
| ENVI-met[16] | 用于模拟城市中建筑、植被、地表和大气的相互作用；可计算短波和长波辐射通量，并考虑遮蔽、反射过程 | 生理等效温度、平均辐射温度、表面温度、通用热气候指数 | 可用于从单体建筑到街区或城市尺度的模拟，水平分辨率通常为 1～10 m |
| EnergyPlus 等建筑能耗模拟软件[39] | 在模型中定义树木几何参数，调用遮阳模块与气象数据，逐时计算植物对太阳辐射的遮挡，输出建筑表面得热、日照时长等数据 | 总水平辐射、窗户得热、采光系数、阴影遮挡率 | 多用于研究建筑能耗，分析垂直绿化及屋顶绿化对建筑负荷的影响 |

树冠形态与叶片密度决定了植物遮荫面积和强度，因此植物模型精度是模拟结果可靠性的关键。当前主要有两类建模思路：一是抽象化建模，即将树木简化为椭圆体、圆锥体、球体等体块，利用几何块体之间的遮挡关系评估建筑日照影响[18,28]；二是精细化结构建模，即基于实测叶面

积指数、叶片分布及季节变化等参数构建真实树冠结构，可较准确地反映辐射穿透与季节性遮阳特征。但精细化建模会增加软件模拟时的计算量，应结合具体研究精度需求选择合适的树木模型建模方法。

### 4.3　模型验证

由于植物建模的复杂性，越来越多的研究采用实测-模拟耦合方法来提升模型的可信度。Yarmoradi 等[37]实地测量的照度与 Honeybee 模拟结果的皮尔逊相关系数（$R^2$）达到 0.70～0.94，表明模型能准确地反映真实光照情况。

### 4.4　遥感技术应用

遥感技术为城市尺度太阳辐射研究提供了更先进的研究工具。遥感反演与多源数据使分析尺度从单城扩展至多城[14]。与此同时，Lu 等[40]将机器学习方法引入高分辨率辐射场的预测与模拟，显示出在城市能量与热环境协同评估中的潜力。

多光谱遥感可进一步获取反映植被生理状态的关键参数（如归一化植被指数（NDVI）与叶面积指数（LAI））用于量化植物对太阳辐射的截获能力[41]。NDVI 高的区域地表温度较低，表明植物的生物量与辐射削减效应呈正相关[42]。

机载激光雷达（LiDAR）技术的引入支持树冠三维结构的高精度重建。Lu 等[43]利用点云数据建立了树冠的 3D 模型，对不同高度的辐射传输过程进行模拟。

航空摄影测量和街景影像等新型遥感技术也逐渐用于估算阴影覆盖面积与“绿色视域（GVI）”指标。结论表明，GVI 越高表示树冠体量越大，其对太阳辐射的降低也越显著[36]。

综上，城市树木影响太阳辐射的研究方法目前已覆盖建筑单体-街道-城市多尺度，从即时检测到长期数据分析的广泛应用场景。实测方法是早期研究的基础，现多用于模型校准与精度验证。软件模拟适合中小尺度、低成本条件下快速估算，其结果高度依赖模型参数化与算法质量。目前提高模拟结果可靠性的路径主要有两类：一是采用实测数据与模拟数据对比校正减少误差；二是提升模型精度，将树木形态、材料特性及季节变化纳入动态建模过程。但目前对模拟算法自身精度的研究相对不足。遥感反演则凭借广覆盖与多时相特征，成为城市-区域尺度评估太阳辐射空间异质性的重要手段（表 3）。

因此，在实际研究中应根据研究尺度、数据获取便捷性及精度需求选择合适的研究方法，或组合使用多种方法以获得可靠的结论。

**表 3　不同研究研究方法对比**

| 方法类别 | 典型应用尺度 | 常见输出指标 | 优势 | 局限 |
|---|---|---|---|---|
| 现场实测 | 建筑单体、街道节点 | 短/长波辐射强度 | 数据真实，可用于模型校准 | 时空覆盖范围有限，试验受天气、人力约束 |
| 日照/几何计算 | 街道、建筑立面 | 建筑日照时长、阴影分布、直射辐射 | 算法透明、计算量小，适合快速方案比选 | 仅考虑几何遮挡；忽略散射、植物特征等影响因素 |
| 软件模拟 | 建筑单体、街道 | 日照时长、空间自主采光性 | 实验成本相对较低，可以对不同参数作出快速响应 | 对树冠建模参数敏感，大尺度范围研究建模和计算成本高 |
| 遥感技术 | 城市-区域 | 地表温度、反照率、叶面积指数 | 覆盖面广，可反映城市热岛与凉岛区域 | 空间分辨率限制；难分析树种/结构差异 |

## 5　展望

目前关于城市树木对太阳辐射影响的研究较为丰富，研究方法趋于成熟。近年来，研究转向定量描述与预测分析阶段，通过仪器实测、软件模拟和遥感评估等手段，量化不同情境下植被遮阳的辐射削减率、温度降低和能耗影响等效益。在区域、街道、建筑尺度城市树木都能显著削弱太阳辐射，改善户外热舒适度，并具有潜在的节能与健康效益。

树木的形态特征、空间布局以及外部环境条件共同影响着其调节太阳辐射的效果。叶密度为主要影响因素，合理控制种植间距，种植冠大荫浓的乔木可以有效减少太阳辐射，降低周围环境温度，同时应兼顾建筑冬季的采光需求。尽管已有大量成果，但仍有一些不足值得关注。

1）季节动态特征研究不足。现有研究多聚焦于夏季防热，对冬季遮阳可能导致的光照不足关

注有限，亟需全年动态模拟与观测。

2）树种差异研究不足。不同树种的树冠形态和叶片光学性质各异，遮阳和降温效果也不同。目前虽有一些比较研究，但总体样本有限。未来可结合植物生理学，从光谱反射率、蒸腾速率等角度深入比较常用绿化树种的辐射调控性能，提出既具观赏性又具备高遮阳效益的优选树种清单。此外，当前研究大多假设树冠为对称且健康的形态，忽略了部分因风或病虫害导致的不对称树冠的影响，可能导致模型在实际应用中的误差。

3）不同尺度研究有待融合。目前建筑、街道、城市尺度研究相互割裂，缺乏多尺度综合模型。未来研究应加强多尺度联动，例如将街道微气候模型嵌入城市气候模拟，以评估局地措施对城市总体的影响，实现“由点及面”的统筹。

4）预测模型研究仍处于初级阶段。现阶段研究仍停留在阐述城市树木对太阳辐射的影响机制，以及揭示植物的各类因素与太阳辐射之间的统计学关系。构建过程-响应模型用于预测的相关研究还处于起步阶段，未来可以借助深度学习等计算机技术，构建高精度的过程-预测模型，为城市气候适应性设计提供更具前瞻性的科学支撑。

**参考文献**


[1] OKE T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24.

[2] LI Q, LI Q, LU X H, et al. Numerical simulation of the effect of street trees on outdoor mean radiant temperature through decomposing pedestrian experienced thermal radiation: a case study in Guangzhou, China [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 91: 128189.

[3] 胡继超, 申双和, 孙卫国, 等. 微气象学基础[M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2022.

[4] ETTINGER A K, BRATMAN G N, CAREY M, et al. Street trees provide an opportunity to mitigate urban heat and reduce risk of high heat exposure[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 3266.

[5] CASTREJON-ESPARZA N M, GONZÁLEZ-TREVIZO M E, MARTÍNEZ-TORRES K E, et al. Optimizing urban morphology: Evolutionary design and multi-objective optimization of thermal comfort and energy performance-based city forms for microclimate adaptation[J]. Energy and Buildings, 2025, 342: 115750.

[6] SPRONKEN-SMITH R A, OKE T R. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(11): 2085-2104.

[7] LICÓN-PORTILLO J A, MARTÍNEZ-TORRES K E, CHUNG-ALONSO P, et al. From block to city scale: greenery's contribution to cooling the urban environment [J]. Urban Science, 2024, 8(2): 41.

[8] JIANG Y F, HUANG J, SHI T M, et al. Cooling island effect of blue-green corridors: quantitative comparison of morphological impacts[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(22): 11917.

[9] LI H W, ZHAO Y L, WANG C H, et al. Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait [J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5: 754.

[10] LEE H, MAYER H, CHEN L. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany [J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 148: 37-50.

[11] ZHANG T L, FU X T, QI F, et al. Optimizing pedestrian thermal comfort in urban street canyons for summer and winter: tree planting or low-albedo pavements? [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 120: 106143.

[12] ARMSON D, RAHMAN M A, ENNOS A R. A comparison of the shading effectiveness of five different street tree species in Manchester, UK[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2013, 39(4): 157-164.

[13] YAN S J, ZHANG T L, WU Y, et al. Cooling effect of trees with different attributes and layouts on the surface heat island of urban street canyons in summer[J]. Atmosphere, 2023, 14(5): 857.

[14] SCHWAAB J, MEIER R, MUSSETTI G, et al. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities[J]. Nature Communications, 2021, 12: 6763.

[15] WU Y C, LU C L, LIN T P. Evaluating the effectiveness of tree canopy and building shade in urban heat mitigation using solar radiation transmittance[J]. Urban Climate, 2025, 62: 102522.

[16] ZHANG T L, SPENCE C, QI F, et al. Influence of tree location on thermal radiation disturbance of the west wall of summer buildings[J]. Energy and Buildings, 2022, 273: 112359.

[17] 张淑琴. 川东连排式楼房不同楼间距光照情况及绿化对策: 以广安市连排式居住小区为例[J]. 时代农机, 2016, 43(2): 131-132, 138.

[18] 刘芳妮, 尹豪, 周旭. 居住区楼间绿化对建筑采光条件影响的数字模拟研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(12): 101-114.

[19] 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(2): 114-122.

[20] GUERRI G, CRISCI A, MORABITO M. Urban microclimate simulations based on GIS data to mitigate thermal hot-spots: tree

design scenarios in an industrial area of Florence[J]. Building and Environment,2023,245:110854.

[21]WU Y H, MASHHOODI B, PATUANO A. Effective street tree and grass designs to cool European neighbourhoods[J]. Urban Climate,2025,61:102376.

[22]李峥嵘,罗明刚,艾正涛,等.植被对建筑遮阳降温效果综述[J].建筑节能,2011,39(11):47-50.

[23]KONARSKA J, LINDBERG F, LARSSON A, et al. Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees: application for outdoor thermal comfort modelling[J]. Theoretical and Applied Climatology,2014,117(3):363-376.

[24]DENG J, PICKLES B J, SMITH S T, et al. Infrared radiative performance of urban trees: spatial distribution and interspecific comparison among ten species in the UK by in situ spectroscopy[J]. Building and Environment,2020,172:106682.

[25]吴昌广,樊萱,肖乾坤,等.街谷行道树种植对环境热舒适度的影响及适应性设计研究进展[J].西部人居环境学刊,2023,38(6):60-66.

[26]ZITER C D, PEDERSEN E J, KUCHARIK C J, et al. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2019,116(15):7575-7580.

[27]YUN S H, PARK C Y, KIM E S, et al. A multi-layer model for transpiration of urban trees considering vertical structure[J]. Forests,2020,11(11):1164.

[28]菅文娜,雷振东.黄土高原民居遮阴树种植形式和位置的模拟分析[J].中国园林,2018,34(4):83-88.

[29]MCPHERSON E G, XIAO Q F, VAN DOORN N S, et al. Shade factors for 149 taxa of in-leaf urban trees in the USA[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2018,31:204-211.

[30]MEILI N, MANOLI G, BURLANDO P, et al. Tree effects on urban microclimate: diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and roughness effects[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021,58:126970.

[31]张燕,李肇旗,嵇栋岚,等.吐鲁番亚尔村传统聚落气候适应性分析[J].中外建筑,2023(9):84-89.

[32]毕家顺.昆明地区的日照与建筑物关系的分析[J].成都信息工程学院学报,2004,19(2):252-257.

[33]DEL CAMPO-HITSCHFELD M L, ARENAS N, RIVERA M, et al. Application of spectrometry for determining the solar radiation of deciduous trees' shade: a passive energy conservation approach for mediterranean climates[J/OL]. Buildings, 2023, 13:1130.

[34]HONGBING W, JUN Q, YONGHONG H, et al. Optimal tree design for daylighting in residential buildings[J]. Building and Environment,2010,45(12):2594-2606.

[35]ZHENG S L, GULDMANN J M, LIU Z X, et al. Modeling of shade creation and radiation modification by four tree species in hot and humid areas: case study of Guangzhou, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2020,47:126545.

[36]WANG Y X, YAN X Y, ZHANG X, et al. A multi-objective optimization framework for designing residential green space between buildings considering outdoor thermal comfort, indoor daylight and Green View Index[J]. Sustainable Cities and Society,2025,119:106045.

[37]YARMORADI M, NASROLLAHI N. The impact of urban canyon illumination levels on visual comfort and energy consumption in buildings: a case study of Kermanshah[J]. Energy and Buildings,2025,334:115510.

[38]REITBERGER R, KOONIYARA V P, PARHIZGAR L, et al. Tree growth simulation in Geographic Information Systems: Coupling CityTree and ArcGIS for solar radiation analysis[J]. Sustainable Cities and Society,2025,120:106128.

[39]MORAKINYO T E, DAHANAYAKE K W D K C, ADEGUN O B, et al. Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university[J]. Energy and Buildings, 2016, 130: 721-732.

[40]LU Y J, LI X R, WU S Y, et al. SolarGAN for meso-level solar radiation prediction at the urban scale: a case study in Boston[J]. Remote Sensing,2024,16(23):4524.

[41]WENG Q H, LU D S, SCHUBRING J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4):467-483.

[42]刘焱序,彭建,王仰麟.城市热岛效应与景观格局的关联:从城市规模、景观组分到空间构型[J].生态学报,2017,37(23):7769-7780.

[43]LU Y H, MCCARTY J, SEZTO J, et al. Modeling the shading effect of Vancouver's urban tree canopy in relation to neighborhood variations[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2022,48(2):95-112.