城市森林与城市热缓解

西安市遮荫树对建筑东西墙外表面温度的影响*

菅文娜 夏林洪 邱丽媛 任万钰

西安建筑科技大学 西安 710055

摘要:【目的】量化西安市不同遮荫树种对建筑墙面降温的影响,分析树木数量与布局对降温效应的作用。【方法】采用现场测量法获取不同树种遮荫下的墙面温度数据,结合 Envi-met 数值模拟对比分析其降温效应,并通过统计分析评估树种类型与树木数量的影响。【结果】在相同布局下,较大树种和高叶面积指数树种的降温效果较好,臭椿降温效果优于国槐。树木对 1~6 m 高度区域降温最佳,且树木数量增多降温效果显著提高。树木的降温效果随树木与建筑间距增大而减弱,当树木与建筑距离达到冠幅的 2.5 倍时,降温作用趋于最弱。夜间,长波辐射和风对墙壁热释放影响较小,温差仅为 0.1~0.8 ℃。【结论】不同树种的降温效果存在显著差异,较高叶面积指数的树种能显著降低建筑表面的温度;合理选择和配置遮荫树种可提升城市建筑的热环境调控能力。

关键词:遮荫树;叶面积指数;树木布局;降温效应

DOI:10.12169/zgcsly.2025.01.13.0002

Influence of Shade Trees on Outer Surface Temperature of East and West Walls of Buildings in Xi'an

Jian Wenna Xia Linhong Qiu Liyuan Ren Wanyu

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract:【Objective】To quantify the cooling effects of different shade tree species on building walls in Xi'an and analyze the influence of tree quantity and tree layout on the cooling performance. 【Method】Field measurements are conducted to obtain wall temperature data under the shade trees of various species. Envi-met numerical simulations are used to compare their cooling effects, and statistical analyses are made to evaluate the impact of tree species and tree quantity. 【Result】Under the same layout, the species featured with larger tree or with higher leaf area index exhibit a better cooling performance, and *Ailanthus altissima* outperformes *Sophora japonica*. Trees offer the most significant cooling effect at the heights between 1 and 6 meters, and the higher the tree quantity is, and the better the cooling effect is. Additionally, the cooling effect of the trees weakens as the distance between trees and buildings increases, which reaches its lowest when the distance exceeds 2.5 times the crown width. At night, the impact of longwave radiation and wind on wall heat release is minimal, with temperature differences ranging only from 0.1 to 0.8 ℃. 【Conclusion】The cooling effects of different tree species vary significantly, and the tree species with higher leaf area index could substantially decrease the surface temperature of buildings.

收稿日期:2025-01-13

* 基金项目:陕西省重点产业创新链项目"碳达峰、碳中和"目标下低碳建筑关键技术研究与示范(Z20230178);陕西省教育厅重点实验室科学研究计划(21JS028)

第一作者:菅文娜(1979-),女,博士,副教授,研究方向为植物景观设计与研究、西北城乡室外微气候研究。E-mail:jwn029@163.com

通信作者:夏林洪(1997-),男,硕士生,研究方向为风景园林规划与设计。E-mail:1312003237@qq.com

Optimizing the selection and configuration of shade trees can enhance the thermal regulation of urban buildings.

Keywords: shade tree; leaf area index; tree layout; cooling effect

伴随城市的高速发展和全球气候变化，城市热岛效应已逐渐成为严重影响城市人居环境和居民健康的重要因素。同时，城市变暖引发空调使用激增，导致用电量显著增加[1]。城市树木能够改善城市微气候，对我们生存环境有着巨大贡献。树木可通过遮荫、蒸散和风障效应有效改善城市热环境[2-3]。城市树木对建筑能源消耗有直接和间接的影响。首先，树冠拦截热流是改善建筑能耗最直接和最有效的方法之一[4]，树冠可以拦截70%~90%的太阳辐射[5]；树木简单的遮阳机制可以大大降低建筑太阳能负荷、表面温度增加和内部传热[6]，提供显著的冷却效果[7]。其次，树木的蒸腾作用有助于产生冷却效果[8-9]，降低建筑立面周围的空气温度，从而降低建筑表面温度；树木蒸腾效应具有显著的节能潜力和减轻城市热岛效应的能力[10-12]；树木的蒸腾效应与遮荫作用对降温的贡献几乎相等[13]。此外，树木的存在也会降低环境中的风速[3]，影响建筑微环境。

树木降低建筑表面温度的效果受太阳辐射强度、气候、建筑围护结构、地表反射率、树木冠层特性和种植位置等因素的影响，其中，太阳辐射是建筑热负荷的主要来源，其削弱程度直接影响建筑表面温度。影响树木降温的冠层特性包括冠层高度、冠层形态、冠幅、冠层密度以及叶面积指数等，这些参数在减弱太阳辐射、提供遮荫和阻挡风速方面有显著影响[14-15]，较高的叶面积指数（LAI）及冠层密度在决定树木的冷却能力方面起着更重要的作用[16-17]。冠层结构参数取决于树木的物种、年龄和健康状况[18-19]，因此，不同树种对建筑壁面温度的降温潜力不同。在以往的研究中，不同气候区植被冷却潜力存在差异[20]，这也强调了在特定气候带的背景下了解当地树种的降温效应的重要性[21-23]。此外，树木的数量、位置和间距也会影响树木对建筑物的树荫覆盖范围，从而影响建筑表面温度[24]。

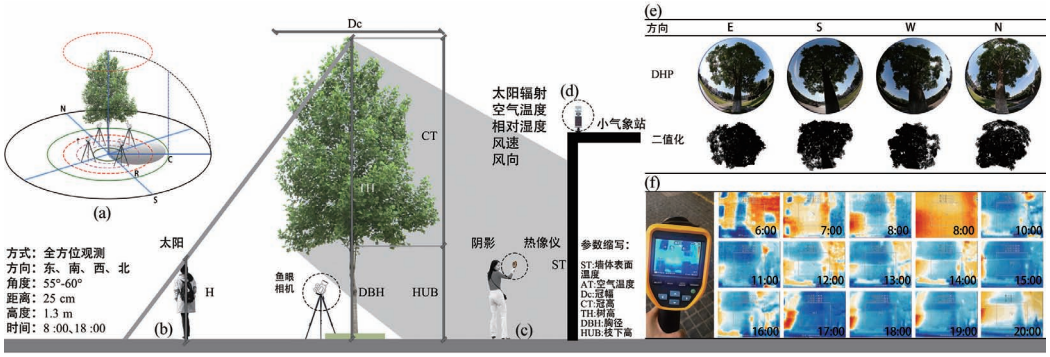
从以往的研究来看，树木对建筑能耗的影响可分为两类：冷却效应和遮荫效应，但近年来大多数研究都集中在通过遮荫和蒸腾相结合对建筑能源使用的冷却效果，对树木个体结构特征的变化而引起的个体效应对建筑外表面温度的影响机制研究相对有限。通过全面了解当地树种的降温性能，对于减少建筑能源消耗是有益的。因此，本文将在特定的气候背景下，通过现场测试与软件模拟相结合的方法，深入研究树木与建筑物外墙表面温度之间的关系，主要目标是：1）简单、可靠和可重复地测试遮荫树对建筑壁面温度的影响；2）揭示冠层结构参数的变化对建筑墙体表面温度影响的规律；3）评估西安地区建筑环境中常见树种的降温潜力。研究结果将有助于当地设计者对树木的选择、种植和管理，优化有限种植空间中城市树木的降温潜力，减少能源消耗，助力城市可持续发展。

1　研究区概况

本研究于 2023 年 7 月在西安建筑科技大学雁塔校区（108° 96′ E，34° 23′ N）进行。根据 Köppen-Geiger 气候分类，西安属于温带大陆性季风气候（Dfa），属于中国建筑气候分区的寒冷地区，建筑需兼顾保温、遮阳和通风[25]。夏季（6—8 月）的日平均气温为 19~32 ℃，季节平均相对湿度为 63%，最低气温为 14 ℃，最高气温为 39 ℃，总降水量为 124.3 mm。

2　研究方法

Envi-met 已被证明在模拟树木对环境及建筑墙体温度影响方面准确可靠[26-29]。本研究使用该软件的 5.6.1 版本分析树木对建筑表面的降温效应。操作步骤如下：1）数据收集（图 1）：选择符合研究目标的测试对象，使用仪器（表 1）测量树木参数和典型日气象数据，并记录墙体表面温度变化；2）软件模拟：在 Envi-met 中建立与试验条件一致的模型，根据树木形态特征建模，并利用试验数据进行模拟，探讨不同树种和布局对东西墙面温度的降温效果。



注：（a）叶面积指数获取；（b）基础数据测量；（c）墙体温度获取；（d）局地气象数据采集；（e）半球照片；（f）热像图。

图 1 实际操作步骤

表 1 测量仪器及参数

测量内容	测试仪器	范围	精度
空气温度（Ta）	HoBo 气象站	−29～70 ℃	±0.5 ℃
空气相对湿度（RH）	—	10%～90%	±2%
风速（WS）	—	0～60 m·s^{-1}	±3%
墙体表面温度（Tw）	Fluke 红外热成像仪	−20～1 000 ℃	±2℃或 2%（取大值）
叶面积指数（LAI）	带鱼眼镜头的佳能相机	180°～230°	—
树木基础信息	手持激光测距仪	0～40 m	±3.5 mm

2.1 现场测量与测试

2.1.1 墙面温度测量

选取校园内 3 座典型多层以下砖混结构建筑作为研究对象，分别在 1、2、3、4 点进行测试。测试点 1 位于东墙，遮荫树为单棵国槐；测试点 2 为西墙，遮荫树为单列多棵悬铃木；测试点 3 为东墙，遮荫树为单棵国槐；测试点 4 为西墙，遮荫树为两棵国槐。

在 2023 年 7 月 9 日的清晰无云高温日，进行 15 轮现场测量，测量时间为 6：00—20：00。当天无风（平均风速<2 m·s^{-1}），云量 0%～10%。每轮测量由 1 人于 0.5 h 内完成，拍摄热图像并使用 SmartView Classic 4.4 软件分析墙面温度差，通过手动提取温度数值，排除非墙体部分影响，数据用于验证西安地区建筑对遮荫树的需求及树种、种植位置对墙面温度的影响。

2.1.2 微气候数据测量

通过 Hobo 气象站收集环境数据，包括温度、相对湿度、风速和方向。温度测量分辨率为 0.1 ℃，精度为±0.5 ℃；相对湿度测量分辨率为 0.1%，精度为±2%；风速测量分辨率为 0.1 m·s^{-1}，精度为±3%。气象站安装在无树荫的建筑屋顶，测量距离测试对象最远约 100 m，确保局地数据的可靠性。

2.2 主要树木冠层参数量化

2.2.1 树木整体形态参数

结合直接测量与视觉测量方法，测量常见树种的胸径（DBH）、树高（TH）、枝下高（HUB）、冠高（CT）和冠幅（D_C）。根据西安气候，常见遮荫树种包括银杏、国槐、七叶树、臭椿、鹅掌楸、栾树、苦楝等，每个样本在多个位置重复测量，以收集不同角度数据。部分树木因周围复杂环境仅进行少量测量。树木基础信息测量数据见表 2，用于计算叶面积密度（LAD）及三维树木模型创建。

表 2 树木基础信息测量数据

序号	物种	拉丁名	属性	TH/m	HUB/m	CT/m	DBH/cm	Dc/m
1	苦楝	*Melia azedarach*	落叶	7.62	2.96	4.56	30	10
2	七叶树	*Aesculus chinensis*	落叶	9.34	3.92	5.42	30	8.9
3	银杏	*Ginkgo biloba*	落叶	9.19	1.96	7.23	30	9
4	栾树	*Koelreuteria paniculata*	落叶	9.09	2.31	6.78	45	9.7
5	鹅掌楸	*Liriodendron chinense*	落叶	10.4	3.04	7.36	25	8
6	国槐	*Sophora japonica*	落叶	12.32	3.23	9.09	60	12.6
7	臭椿	*Ailanthus altissima*	落叶	15.8	4.08	11.72	60	12.5

2.2.2　叶面积指数与叶面积密度

叶面积指数采用半球摄影法（DHP）[30]，为避免因太阳光线过强而形成曝光点，选择清晨或者傍晚进行拍摄，高度设置为 1.3 m，拍摄东南西北 4 个方向的冠层半球照片，将拍摄照片导入 Adobe Photoshop 2023 中进行处理，采用调整阈值的方式对图像进行二值化处理后（表 3），计算树木的孔隙率，利用 BeerLam bert 模型计算 LAI 值[31]。

表 3　树木孔隙率及叶面积指数

	苦楝	七叶树	银杏	栾树	鹅掌楸	国槐	臭椿
实景图							
孔隙率/%	30.18	13.70	6.55	13.30	8.17	14.40	15.12
LAI 值	2.91	4.2	1.84	2.98	3.85	3.06	3.11

叶面积密度是 Envi-met 中“Albero”版块树木精确建模的重要变量，本文通过半球摄影法获取叶面积指数 LAI 对树冠各层的叶面积密度 LAD 进行经验计算[32]，结果如图 2 所示。

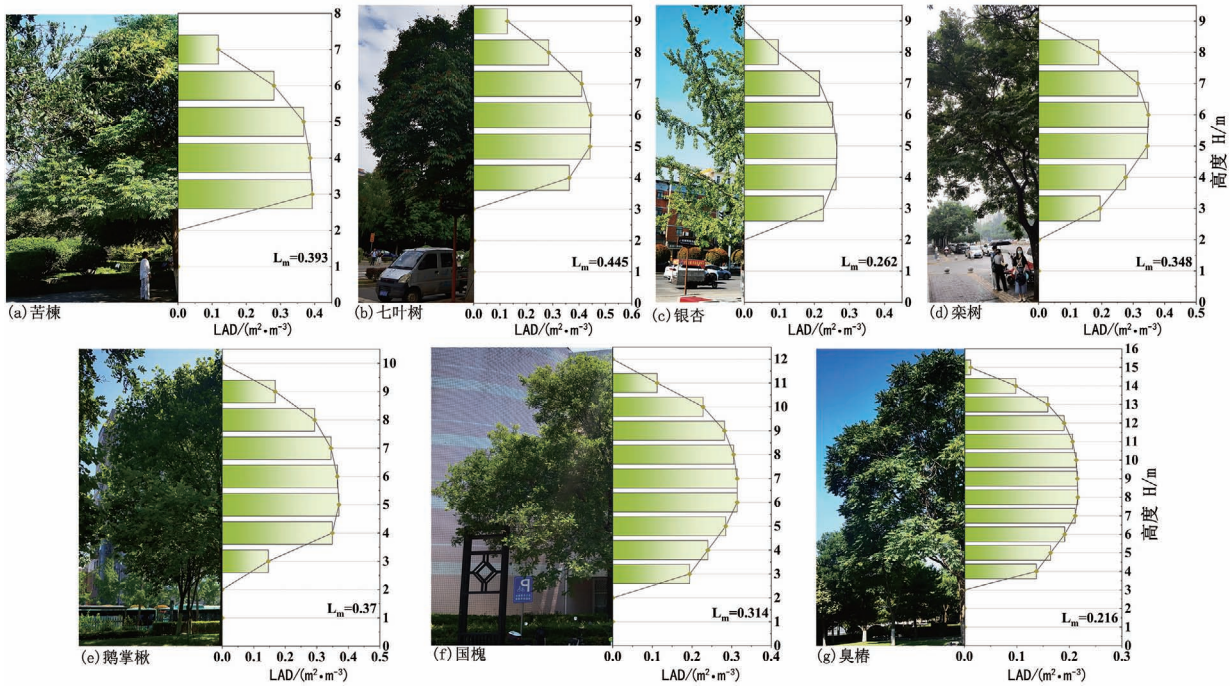


图 2　树木冠层各层叶面积密度

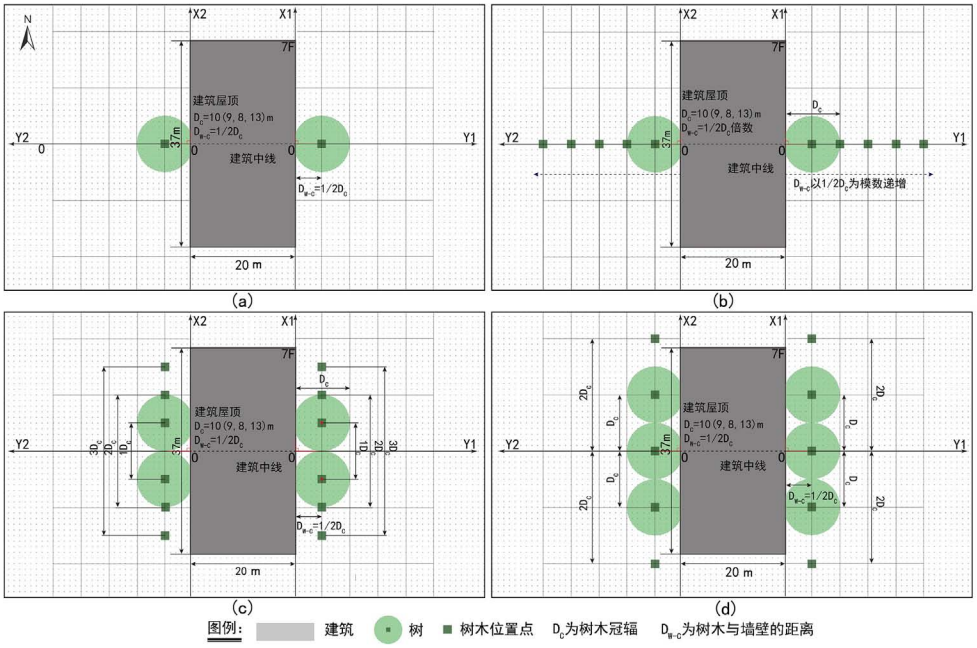
2.3　案例模拟

2.3.1　数据输入及模型建立

由于现场试验中无法改变参数，为分析冠层高度、形态、冠幅、冠层密度和叶面积等因素对壁面温度的影响，采用 ENVI-met 模型进行模拟。模型输入包括建筑、土壤和气象数据（表 4），建筑模型为高 21 m、长 36 m、宽 20 m 的空心建筑，基于实测与计算数据建立树木模型，共模拟 42 个场景（图 3）。

表 4　ENVI-met 其他模拟参数

输入参数	模拟日期 2024 年 7 月 9 日
地面以上 10 m 处的平均风速	0.214 375
盛行风向 V	253.537 5
表面粗糙度	0.1*
气温强迫	气象站的小时数据
相对湿度强迫 RH	气象站的小时数据
云覆盖率	无云
土壤温度	默认



注：（a）树种变化模拟布局；（b）树与墙体距离变化模拟布局；（c）树木间距变化模拟布局；（d）树木数量与间距联合变化模拟布局。

图 3 ENVI-met 植物模拟平面布局

2.3.2 模拟结果的统计方法

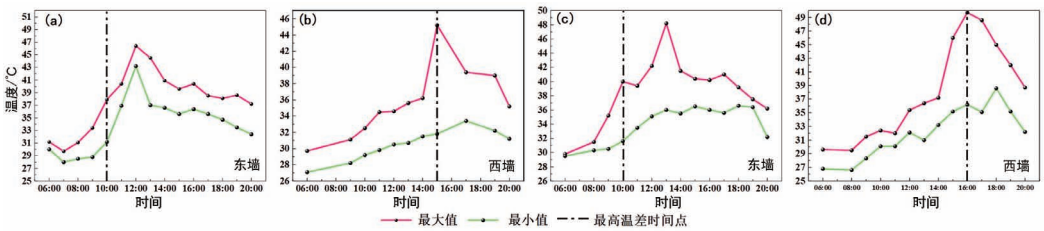
为了分析植树前后建筑表面温度的变化，本研究引入壁温差（ΔWT）的概念，定义为无树木条件下建筑表面温度与植树条件下温度之间的差值。考虑到数据以小时为单位采集，温度数据为离散值，因此分别计算了不同朝向（j 方向）上的平均壁温差（ΔWT_j），以评估不同朝向（E：东；W：西；）墙面在整体时段内的降温效应。此外，为分析不同时间点上树木对墙面温度的影响，进一步计算了某一时间 t 时各朝向的 ΔWT_j（t）；为探讨不同垂直高度上树木的降温效果，又引入了高度维度 k，计算 ΔWT_j（k，t），即在某一高度和时间点上的平均壁温差。这些方法均参考已有研究中用于 Envi-met 模拟结果对比分析的统计处理方式[33]。

3 结果与分析

3.1 树木对建筑表面温度的影响

3.1.1 监测结果分析

通过分析实测数据（图 4），建筑东墙外表面温度最高值出现在 11：00—13：00，西墙则在 15：00—17：00。树荫覆盖下，东、西墙面遮挡与未遮挡区域温差明显，东墙最大温差为 12.2 ℃，西墙为 22.1 ℃，结果显示西安夏季下午西晒更为严重。



注：（a）测试点 1；（b）测试点 2；（c）测试点 3；（d）测试点 4。

图 4 墙体表面温差变化

3.1.2 日间模式特征

图 5 展示了 7 种遮荫树在东、西墙面上每小时的温度差值（Ta）和在 5 种情景 D_{W-C}（墙壁到树冠的距离）= 0.5Dc/1Dc/1.5Dc/2Dc/2.5Dc 下的日间降温特征。树木对东、西墙面具有显著降温作用，且降温效果呈现非线性变化，ΔWT_E（t）和 ΔWT_W（t）先增后减。然而，最佳降温时机在东、西墙面有所不同。以 D_{W-C} = 0.5Dc 情景为例，

东墙在 19：00—5：00 时降温效果较小，因树木导致净长波辐射增加；6：00 起，ΔWT_E（t）随着太阳的升高而逐渐增大，在 9：00 达到最大。西墙则在 12：00 后降温效果显著，17：00 时达到最大值，此后减弱，最终恢复到初始状态。21：00—5：00 时，东西墙面 Ta 趋近于 0。随着 D_{W-C}增大至 1～2.5Dc，Ta>0 ℃的时间提前，全天降温效果明显减弱。

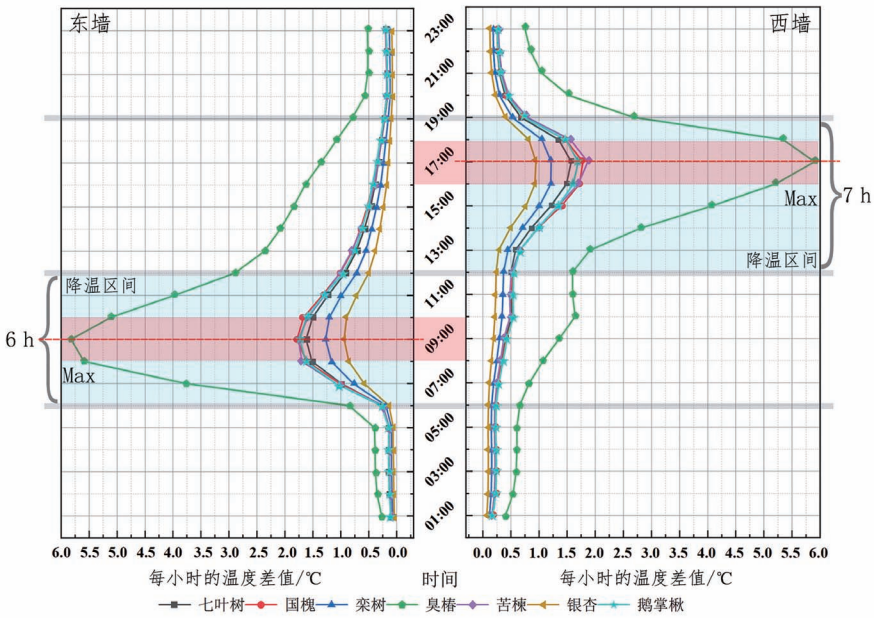


图 5　树木降温效果的日间模式

3.1.3　空间差异

东、西墙在 1～9 m 高度范围内冷却效果较好，且 1～6 m 区域为最佳冷却高度（图 6）。树木结构通过改变风环境，降低树冠下方区域的风速，从而减少墙体感热释放。

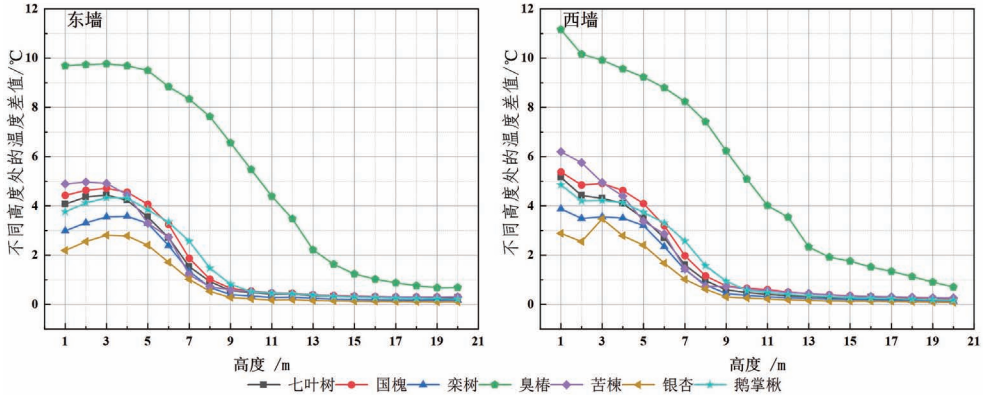


图 6　七种树种在东西墙不同高度处的降温效果（最热时段）

3.1.4　树种差异

不同树种降温效果差异显著（图 7）。ΔWT_E 和 ΔWT_W 求和结果由高到低排序为：臭椿（11.01 ℃）>苦楝（3.45 ℃）、国槐（3.44 ℃）>鹅掌楸（3.3 ℃）>七叶树（3.07 ℃）>栾树（2.41 ℃）>银杏（1.83 ℃）。模拟结果显示臭椿在遮荫下温度最低，银杏最高。东墙的降温差异上午最为明显，银杏最差，栾树稍优于银杏，可能与树冠形状及辐射吸收有关。需要特别指出的是，臭椿的树冠体积最大（表 2），这一特点可能增强了其降温效果。然而，这一树冠体积差异并非该树种的固有特征。因此，本文并未将树木的降温效果直接归因于树冠体积这一单一因素，而是综合考虑了 LAI、LAD 以及树冠形态等对降温效果的多重影响。

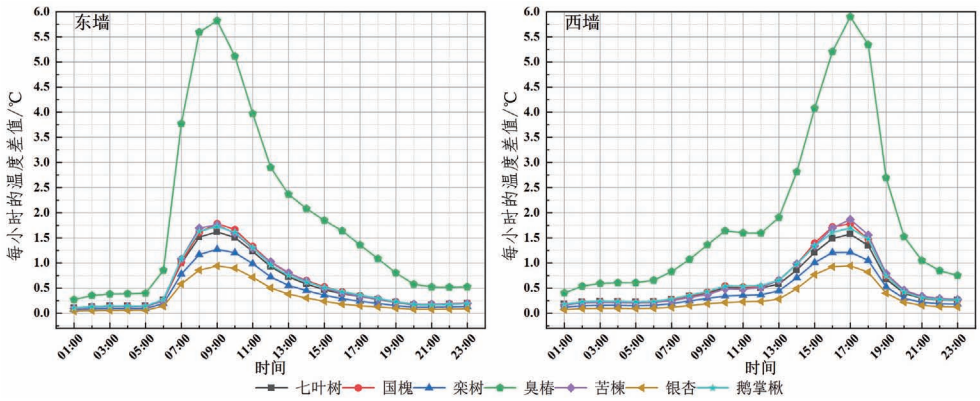


图 7 不同树种的降温效果

3.2 树木的布局对建筑表面温度的影响

3.2.1 树木与墙体之间的距离

七叶树的树高适中、降温效果稳定，适合作为代表性树种进行分析。从图 8 可以看出，随着树木与建筑距离的增加，建筑墙面的降温效果逐渐减弱。白天时，0.5Dc 和 1Dc 距离下的温差明显高于其他布置，说明较近距离的树木遮荫效果更好。夜间，不同距离下的墙面温差差异缩小，说明夜间长波辐射阻挡作用有限，近距离树木对降温仍有一定贡献，但幅度小于白天。

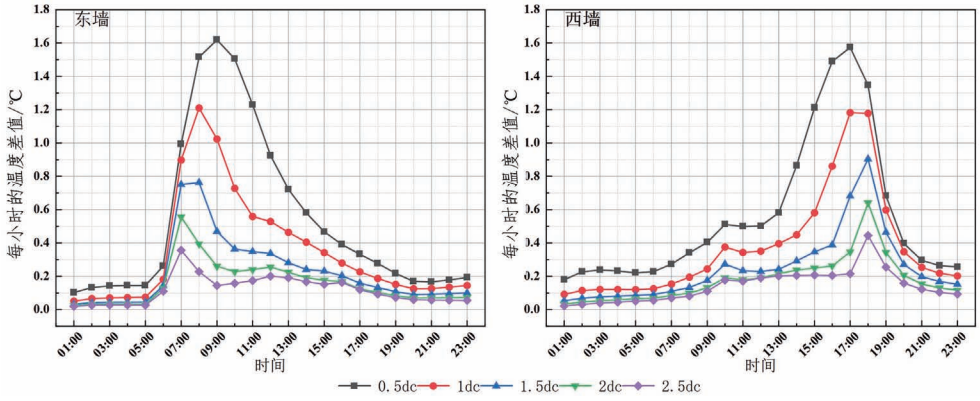


图 8 树木与墙体距离对建筑温度的影响

3.2.2 树木间距

苦楝树冠形态和 LAI 适中，且能清晰展示树木间距对降温效果的影响。通过对苦楝树种植间距模拟分析（图 9）发现，两棵树时，间距对降温效果影响较小，1Dc（6.85 ℃）略优于 2Dc（6.43 ℃）和 3Dc（6.29 ℃）；三棵树时，树木间距对墙面温度影响减小，整体温度较低，1Dc（10.4 ℃）降温效果最佳。总体来看，树木间距对降温效果影响不显著，尤其在三棵树布局下效果趋于一致。

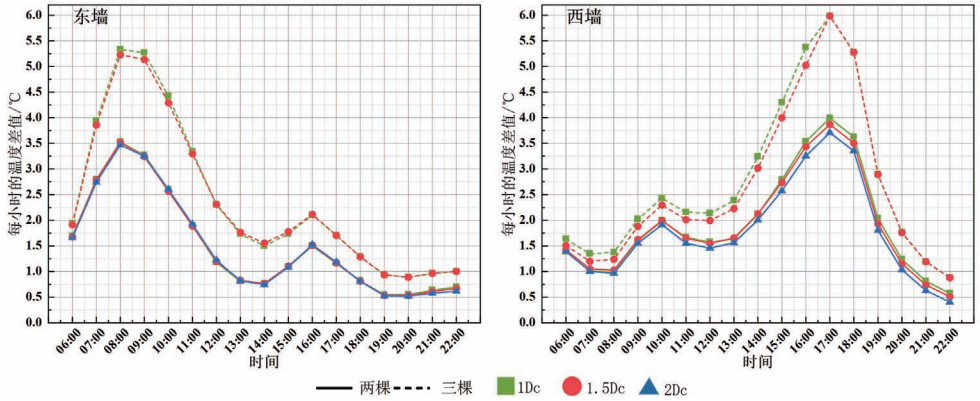


图 9 树与树之间距离对建筑温度的影响

3.3　LAI 值对建筑墙体温度的影响

对比高度相近、叶面积指数不同的七叶树、栾树、银杏（图 10）发现，降温效果依次为七叶树>栾树>银杏，且与其 LAI 大小的排序一致。这三种树木在上午和下午的降温表现均较为稳定。进一步对比七叶树与鹅掌楸的降温效果，结果显示鹅掌楸的降温效果更优：上午的最大温差为 2.47 ℃，下午为 1.67 ℃。尽管七叶树在树高和冠高上不及鹅掌楸，但其较高的 LAI 仍带来了良好的降温效果。由此可见，遮荫树种的降温效应与其叶面积指数呈正相关，LAI 越大，降温效果越明显。

树种叶面积相近、高度不同对降温效果也有影响（图 11），臭椿（较高）降温效果最好，栾树虽高于苦楝，但降温效果不如后者。

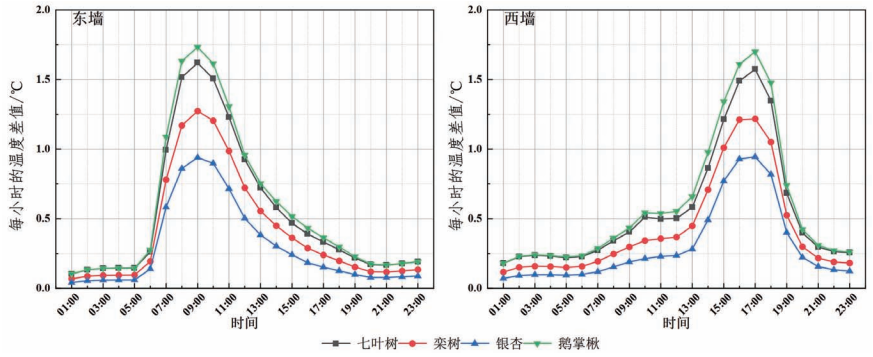


图 10　高度相近叶面积指数不同的树种降温效应对比

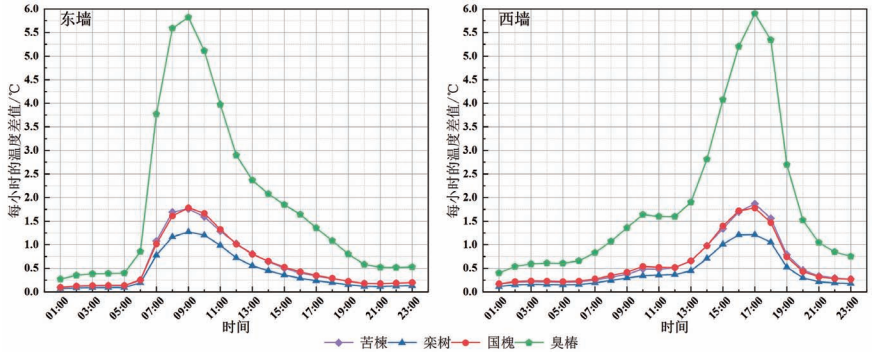


图 11　叶面积指数相近高度不同的树种降温效应对比

3.4　树木数量对建筑墙体温度的影响

以鹅掌楸和苦楝这两棵 LAI 不同的树种为例，鹅掌楸种植三棵时，ΔWT_E 和 ΔWT_W 求和为 9.62 ℃，显著高于一棵（2.85 ℃）和两棵（6.04 ℃）。苦楝三棵时为 10.4 ℃，高于两棵（6.58 ℃）和一棵（3.45 ℃）。图 12 显示，增加树木数量可提前墙体温差最大值出现时间，且东、西墙表面温度逐渐降低，表明更多树木有助于提升遮荫和蒸腾效果，从而显著增强降温。尽管鹅掌楸的 LAI 大于苦楝，但苦楝降温效果更佳，可能与其更大的树冠体积和树高、更强的遮荫和蒸腾作用相关。

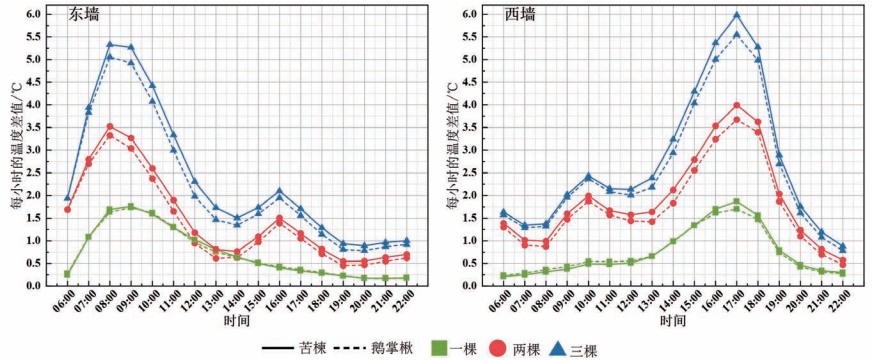


图 12　树木数量变化对墙体的降温效果

4 讨论

4.1 树种选择与建筑热环境调节效果的关系

树种的叶面积指数、冠层密度及其生理特性是影响建筑表面温度的重要因素[34]。在本研究中，不同树种对建筑热环境的调节效果差异显著，具有较高叶面积指数和密集冠层的树种能够提供更有效的阴凉，从而显著降低建筑物周围的温度；这与 Fahmy 等[35]及 Morakinyo 等[36]研究相符。然而，与 David 等[37]关于绿化树种选择的结论不同，部分低叶面积指数的树种在一定条件下，仍能通过其较高的蒸腾作用和风速调节功能，达到与高叶面积指数树种相近的降温效果。这一差异可能与不同地域的气候特征、树种的生长状态以及绿化配置的空间布局密切相关。此外，树种的叶片对于太阳辐射中的红外线的遮挡和吸收效果存在差异。不同树种的叶片对红外线的反射、吸收和透过能力不同，从而影响遮荫效果和降温效果。因此，除了 LAI 和冠层形态外，树叶的材质和对红外线的处理也应作为选择树种时的考虑因素。

4.2 树木布局对建筑节能效果的影响

本研究发现，合理的树木配置能够有效降低建筑周围的气温，减少空调负荷，从而提升建筑的节能效果；树木集中布局在建筑东西面相比于南北面能够更好地遮荫，减少辐射热量的直接输入，进而提高室内舒适度和空调效率。这一结论与 Zhang 等[38]、Li 等[39]的研究相符，但与 Jiao 等[40]的研究不同，研究中某些情况下，过于密集的树木布局会因树木本身的蒸腾作用增加空气湿度，可能导致建筑周围环境热感增加，影响节能效果，此类现象主要出现在气候湿润或树木种类较为单一的情况下。因此，树木布局的优化需要结合当地气候特点，综合考虑不同树种的生理特性、布局密度以及建筑的热负荷需求，避免极端配置带来的负面效果。

5 结论

本研究探讨了不同树种及其布局对建筑热环境的影响，揭示了树种特性、绿化覆盖率及其配置对降温效果的显著作用。通过分析树木的遮荫、蒸腾作用与风速调节等降温机制，研究发现具有较高叶面积指数的树种能显著降低建筑表面的温度；合理的树木布局可以优化建筑外部热环境，减少空调负荷，提升建筑节能效果。

参考文献

[1] LI B Z, YAO R M. Urbanisation and its impact on building energy consumption and efficiency in China [J]. Renewable Energy, 2009, 34(9): 1994-1998.

[2] KONG L, LAU K K, YUAN C, et al. Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong [J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 31: 12-25.

[3] WONG N H, TAN C L, KOLOKOTSA D D, et al. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2: 166-181.

[4] PAPADAKIS G, TSAMIS P, KYRITSIS S. An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings [J]. Energy and Buildings, 2001, 33(8): 831-836.

[5] CALCERANO F, MARTINELLI L. Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption [J]. Energy and Buildings, 2016, 112: 234-243.

[6] LIU Y, HARRIS D J. Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland [J]. Applied Energy, 2008, 85(2/3): 115-127.

[7] YANG X S, ZHAO L H, BRUSE M, et al. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments [J]. Energy and Buildings, 2012, 54: 243-251.

[8] GILBERT H, MANDEL B H, LEVINSON R. Keeping California cool: recent cool community developments [J]. Energy and Buildings, 2016, 114: 20-26.

[9] WANG Y P, BERARDI U, AKBARI H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada [J]. Energy and Buildings, 2016, 114: 2-19.

[10] ROSENFELD A H, AKBARI H, ROMM J J, et al. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction [J]. Energy and Buildings, 1998, 28(1): 51-62.

[11] KO Y. Urban form and residential energy use [J]. Journal of Planning Literature, 2013, 28(4): 327-351.

[12] BERARDI U, GHAFFARIANHOSEINI A, GHAFFARIANHOSEINI A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs [J]. Applied Energy, 2014, 115: 411-428.

[13] HOELSCHER M T, NEHLS T, JÄNICKE B, et al. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation [J]. Energy and Buildings, 2016, 114: 283-290.

[14] SHAHIDAN M F, SHARIFF M K M, JONES P, et al. A comparison of Mesua ferrea L. and Hura crepitans L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort [J].

Landscape and Urban Planning,2010,97(3):168-181.

[15] 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.

[16] HARDIN P J, JENSEN R R. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: a Terre Haute case study[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2007, 6(2): 63-72.

[17] RAHMAN M A, STRATOPOULOS L M F, MOSER-REISCHL A, et al. Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis[J]. Building and Environment, 2020, 170: 106606.

[18] OKE T R, MILLS G, CHRISTEN A, et al. Urban Climates[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017.

[19] HAMI A, ABDI B, ZAREHAGHI D, et al. Assessing the thermal comfort effects of green spaces: a systematic review of methods, parameters, and plants' attributes[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 49: 101634.

[20] SABRIN S, KARIMI M, NAZARI R, et al. Effects of different urban-vegetation morphology on the canopy-level thermal comfort and the cooling benefits of shade trees: case-study in Philadelphia[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 66: 102684.

[21] ZHENG S L, GULDMANN J M, LIU Z X, et al. Influence of trees on the outdoor thermal environment in subtropical areas: an experimental study in Guangzhou, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 42: 482-497.

[22] LIU H Z, LIM J Y, WINT HNIN THET B, et al. Evaluating the impact of tree morphologies and planting densities on outdoor thermal comfort in tropical residential precincts in Singapore[J]. Building and Environment, 2022, 221: 109268.

[23] SHASHUA-BAR L, POTCHTER O, BITAN A, et al. Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel[J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(1): 44-57.

[24] LIU Z X, CHENG W W, JIM C Y, et al. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: a systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4[J]. Building and Environment, 2021, 200: 107939.

[25] 杨柳.建筑气候学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[26] LIU Z X, ZHENG S L, ZHAO L H. Evaluation of the ENVI-met vegetation model of four common tree species in a subtropical hot-humid area[J]. Atmosphere, 2018, 9(5): 198.

[27] SRIVANIT M, HOKAO K. Evaluating the cooling effects of greening for improving the outdoor thermal environment at an institutional campus in the summer[J]. Building and Environment, 2013, 66: 158-172.

[28] 劳钊明,李颖敏,邓雪娇,等.基于 ENVI-met 的中山市街区室外热环境数值模拟[J].中国环境科学,2017,37(9):3523-3531.

[29] 杨小山,赵立华.城市微气候对建筑能耗影响的研究方法综述[J].建筑科学,2015,31(12):1-7.

[30] 吴伟斌,张震邦,刘佛良,等.基于半球图像法的叶面积指数反演研究进展[J].科学技术与工程,2018,18(23):156-162.

[31] 吴彤,倪绍祥,李云梅,等.由冠层孔隙度反演植被叶面积指数的算法比较[J].南京师大学报(自然科学版),2006(1):111-115.

[32] LALIC B, MIHAILOVIC D T. An empirical relation describing leaf-area density inside the forest for environmental modeling[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(4): 641-645.

[33] FENG L, YANG S, ZHOU Y, et al. Exploring the effects of the spatial arrangement and leaf area density of trees on building wall temperature[J]. Building and environment, 2021, 205: 108295.

[34] BERRY R, LIVESLEY S J, LU A Y. Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature[J]. Building and Environment, 2013, 69: 91-100.

[35] FAHMY M, SHARPLES S, YAHIYA M. LAI based trees selection for mid latitude urban developments: a microclimatic study in Cairo, Egypt[J]. Building and Environment, 2010, 45(2): 345-357.

[36] MORAKINYO T E, LAU K K, REN C, et al. Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving[J]. Building and Environment, 2018, 137: 157-170.

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

[38] 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.

[39] LI Z T, ZHANG H, JUAN Y H, et al. Effects of urban tree planting on thermal comfort and air quality in the street canyon in a subtropical climate[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 91: 104334.

[40] JIAO M, ZHOU W Q, ZHENG Z, et al. Optimizing the shade potential of trees by accounting for landscape context[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 70: 102905.