城市蓝绿基础设施与人居福祉

高密度老旧社区表面降温技术的热环境改善潜力评估*

——更新约束下的多情景模拟

左 进[1,2] 王 潇[1,2,3] 王子楠[1,2] 于沐生[1,2]

1 天津大学建筑学院 天津 300072
2 天津市健康人居环境与智慧技术重点实验室 天津 300072
3 中国城市规划设计研究院 北京 100044

摘要：【目的】在高密度老旧社区更新的有限空间和功能约束下，评估绿色基础设施与冷屋顶等表面降温技术与社区内异质性空间载体精准匹配的热环境改善潜力与热岛缓解效果，为高密度城区降温设施规划提供兼具科学性与实操性的决策依据。【方法】以厦门高密度老旧社区深田社区为例，融合实测与模拟，结合空间约束与更新进程，构建冷屋顶、屋顶绿化与地面绿化的多情景方案，系统量化“坡屋顶-冷屋顶”“平屋顶-屋顶绿化”“街道-乔木”等技术载体匹配策略的协同降温效应。【结果】1）在严格约束下，冷屋顶与屋顶绿化适配于坡、平屋顶的组合方案具备最大建设潜力与最显著的多高度降温效益；2）乔木在街道空间形成以树干为中心的“冷岛”核心，而在开阔区域的降温效果不显著；3）社区基准热岛强度为 0.941 ℃，优化情景的热岛强度最大下降 0.175 ℃。【结论】在老旧社区更新的有限空间和功能约束下，通过优化表面降温策略组合协同，可实现局部热岛强度显著降低。为老旧社区及其他高密度城区的热环境改善和可持续发展提供量化依据。未来研究可拓展更具代表性的社区样本，同时将微气候模拟指标与人体活动指标耦合，实现从“物理降温”到“体感降温”的跨越。

关键词：老旧社区更新；表面降温技术；热环境改善；多情景模拟；ENVI-met
DOI：10.12169/zgcsly.2025.09.30.0002

Thermal Environment Improvement Potential Assessmentfor Surface Cooling Technologies in High-density Old Residential Compounds: Multi-scenario Simulation under Renewal Constraints

Zuo Jin[1,2] Wang Xiao[1,2,3] Wang Zinan[1,2] Yu Musheng[1,2]

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Healthy Living Environment and Smart Technology, Tianjin 300072, China; 3. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

Abstract: 【Objective】 Focusing on the spatial and functional constraints against the renewal of high-

收稿日期：2025-09-30
* 基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFF1301300）
第一作者：左进（1977-），男，博士，副教授，博导，研究方向为可持续城市更新、流域人居系统与时空大数据、健康人居环境建设。E-mail：zuojin0117@ tju. edu. cn
通信作者：于沐生（1997-），男，硕士，科研助理，研究方向为城市微气候、城市绿色基础设施。E-mail：deepmet_ a@ tju. edu. cn

density old residential compounds, this study evaluates the thermal environment improvement potential and heat island mitigation effectiveness achieved by precisely matching surface cooling technologies such as green infrastructure and cool roofs with heterogeneously spatial carriers within the compounds. The aim is to provide a scientifically sound and practical decision-making basis for the planning of cooling facilities in high-density urban areas.【Method】 taking Shentian Residential Compound in Xiamen as a case study, this study integrates field measurements and simulations and considers spatial constraints and renewal progress to construct a multi-scenario plan combining cool roofs, roof greening, and ground greening and quantify the synergistic cooling effects of technology matching strategies such as "sloped roof-cool roof," "flat roof-roof greening," and "street-tree planting."【Result】 1) Under strict constraints, the combined scheme that adapts cool roofs to sloped roofs and roof greening to flat roofs demonstrates the greatest potential in implementation and the most pronounced multi-height cooling benefits; 2) Street trees form "cooling island" cores around their trunk, while their cooling effect is not significant in open areas; and 3) The baseline heat island intensity is 0. 941 °C, with a maximum reduction of 0. 175°C under the optimized scenario.【Conclusion】 Optimized combinations of surface cooling strategies under spatial and functional constraints can significantly lower the local heat-island intensity, providing a stronger quantitative basis for improving the thermal environment and promoting sustainable development in old residential compounds and other high-density urban areas. The future research will scale up to more representative samples of residential compounds and couple microclimate simulation index and human body activity indicator so as to achieve the stride from physical cooling to somatosensory cooling.

Keywords: old residential compound renewal; surface cooling technology; thermal environment improvement; multi-scenario simulation; ENVI-met

热岛效应与全球气候变暖加剧了城市热胁迫风险。IPCC 第六次评估报告指出，2011—2020 年全球平均地表气温较工业革命前上升 1.1 ℃。实施城市气候适应性更新、缓解热岛效应已成为多学科学者的共同呼吁[1-2]，屋顶绿化、行道树等绿色基础设施（Green Infrastructure，GI）与冷屋顶等表面降温技术，凭借其遮荫、反射辐射等被动式降温与生态调节机制[3-4]，已然成为缓解城市热岛效应的秘药良方。

现有研究广泛关注 GI 和其他城市建筑表面冷却技术对热岛效应的缓解作用。涉及乔木遮荫对地表温度的调节、立体绿化（如屋顶绿化、墙面绿化）与冷屋顶对建筑热负荷的削减等。例如，Ng 等[5]在香港高密度环境中通过实测与 ENVI-met 模拟评估了多种 GI 的降温效果；张亚芹等[6]实验证实高反射涂料可降低屋顶传热；周荃等[7]实测显示种植屋面隔热优于冷屋顶；He 等[8]发现长三角地区 80%屋面覆盖冷屋顶和绿化时最大降温可达 0.74 ℃ 和 1.19 ℃。此外，董楠楠和吴静[9]、Zhuang 和 Lu[10]、Satio 等[11]也探讨了 GI 在学校、住区等不同区域的降温效应。

总体而言，尽管已有多种技术路线评估 GI 与表面冷却技术的降温效能并取得一定进展，但较少研究在高密度建成环境的实际空间与功能约束下，开展精细化、面向实施的组合分析；也缺乏基于屋顶绿化、冷屋顶等技术的适建性特点，以及与社区内异质性空间载体（如平屋顶、坡屋顶）进行精准匹配的系统模拟。因此，规划决策者在有限空间与复杂产权等约束下，仍缺少关于不同技术“安装在哪里”，以及“如何组合”才能最大化为降温效益的量化数据提供支撑。此外，既有研究多将热岛效应作为宏观背景讨论，缺乏对其直接量化表征。

综上，本研究以厦门市深田社区更新项目为例，聚焦高密度老旧社区的空间局限与功能复杂性，通过现场实测与 ENVI-met 模拟相结合，在更新适建性分析基础上，评估屋顶、地面等载体的实际建设潜力，设计多组可行且高效的 GI 与冷屋顶组合情景，量化其降温效应，最终将模拟结果转化为热岛强度缓解幅度，为高密度城区降温设施规划提供在严格约束条件下兼具科学性与实操性的决策依据。

1　研究区概况

厦门属亚热带海洋性季风气候，2022 年平均气

温 21.6 ℃，夏季热岛效应显著。深田社区位于厦门岛西南部，社区总建筑面积约 62.4 万 m^2，以居住和商业功能为主（图 1），包括图强路小区等大量建于 20 世纪 90 年代的老旧小区。其建筑肌理紧凑，违建加建普遍，基础设施老化，热环境整体较差。

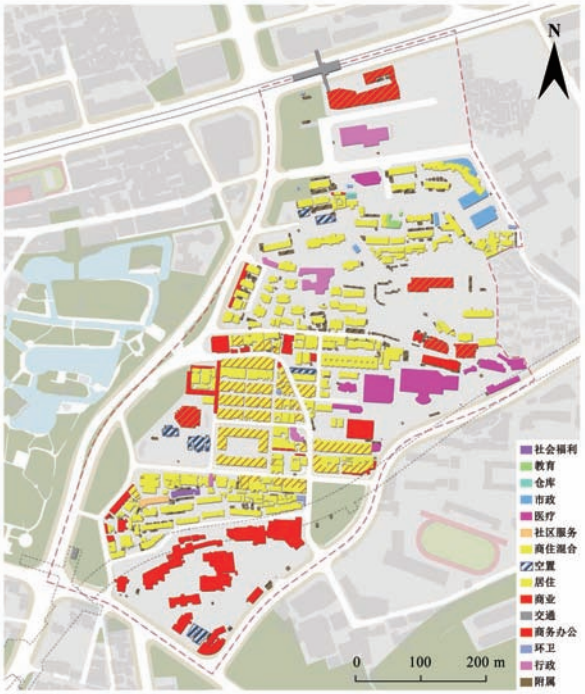


图 1 研究区区位条件

2 研究方法

2.1 数据来源

空间数据源于厦门市城市规划设计研究院的更新改造方案及矢量模型，并经实地验证。植物参数以社区常见的细叶榕（*Ficus microcarpa*）和凤凰木（*Delonix regia*）为乔木样本，屋顶绿化按粗放型设定。其他材质热工参数取自 ENVI-met 内置数据库。气象数据一部分来自厦门气象台站（代号：59134），另一部分来自现场实测，使用黑球温度仪、avm-07 风速仪、TES-1333R 太阳辐射仪等设备于离地 1.5 m 处测定风速、湿度等环境参数。模拟主要输入参数如表 1 所示。

2.2 技术路线

基于空间与矢量数据构建模型，结合深田社区更新进程，采用“约束分析—策略预演—情景模拟”的递进式模拟方法，筛选典型表面降温措施并构建多情景降温方案，进行多情景累计数据的横向对比和分析（图 2）。

表 1 ENVI-met 主要输入参数

参数	取值	参考来源
模拟日期	2023 年 9 月 11 日	/
模拟起止时间	0：00—24：00(UTC+8)	/
研究区经纬度	24.46°N,118.09°E	/
风向	135°	厦门市气象站
10 m 风速	2 $m \cdot s^{-1}$	厦门市气象站
初始环境温度(00：00)	25.54 ℃	实测
初始湿度(00：00)	79.14%	实测
粗糙度	0.01	软件默认
混凝土反照率	0.30	软件默认
水泥瓦反照率	0.30	参考文献[12]

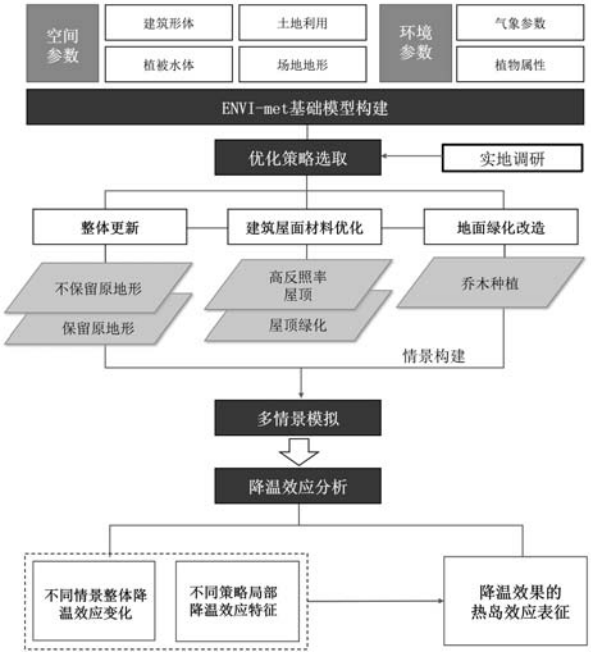


图 2 技术路线

2.3 模型设置

采用 ENVI-met 软件进行三维微气候模拟，其可靠性已获多项研究验证[13]。模拟自 00：00（UTC+8）开始，采用简单强迫，时长 24 h；因前 6 h 结果不稳定，取 6：00—20：00 段进行分析。选用 Bruse/ENVI-met 2017 湍流模式，输出间隔 1 h。

为提升边界条件可靠性，采取双重策略：一是在目标区外围拓展建成环境要素建模；二是设置嵌套网格缓冲带，四向外延 50 m 作为边界。最终模型网格规模为 121(x)×229(y)×13(z)（图 3）。

2.4 空间与功能约束条件

在确定待评估的表面降温技术时，本研究并非理想化地枚举技术，而是紧密结合老旧社区更新的现实条件与可行性，从空间资源约束和社区治理约束两个层面，对技术路径进行审慎筛选与适建性分析。

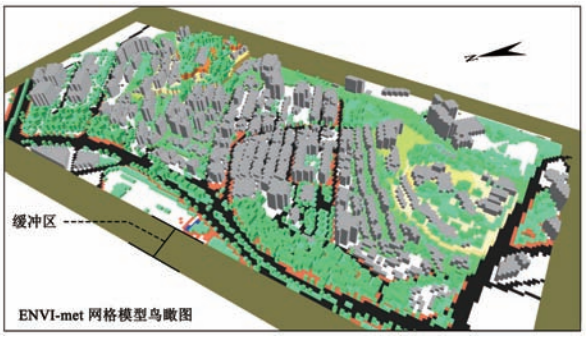


图 3　ENVI-met 网格模型

2.4.1　空间资源的硬性约束

首先需界定整体更新范围。更新不包括深田社区内的 5 处文保建筑、部分无更新权限的医院以及无需热环境优化的宾馆区等（图 4）。

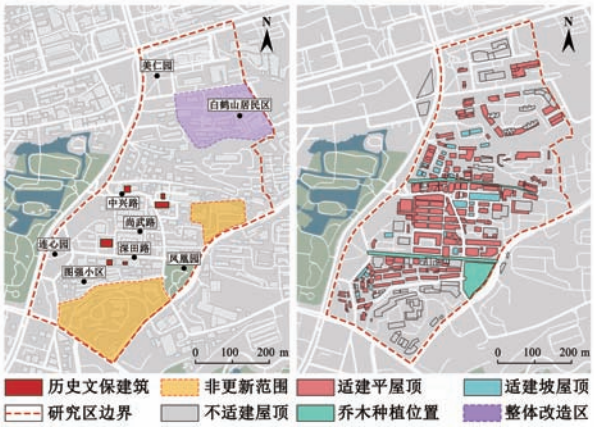


图 4　各降温策略适建性分析

屋顶改造方面，聚焦于屋顶绿化和冷屋顶的降温效能。为贴近实际建设条件，首先依据现场调研与资料建立适建性判别标准，主要考虑屋顶坡度、设备、高度及建筑功能[14-15]。明确了在无设备、低层、公共及商业类屋顶进行屋顶改造的可实施性较高。研究区总屋顶面积 86 296 m^2，其中平、坡屋顶分别为 79 907 m^2、14 674 m^2。改造范围排除屋顶设备占比≥40%的平屋顶及层高≥36 m 的建筑，适建范围见图 4。

地面绿化方面，主要补充行道树。选取绿视率较低的深田路中段、东段及白鹤路段布置乔木（图 4）。同时，为满足游憩需求，计划在凤凰园增加乔木种植，但因该处地下停车场导致树木成活率低，故避开有地下空间的区域进行种植。

蓝色基础设施（如水体、喷泉）虽具蒸发降温潜力，但对空间、地下结构及给排水要求较高。在高密度、建成环境固化的老旧社区中，可用于规模化水体的空间极为有限，因此未将其纳入本次可行技术范围。

局部空间更新层面，北侧白鹤山路小区具备整体改造条件与必要性。该区域道路缺乏遮荫设施，土地已完成整合出让并进行了前期设计，在局部更新方案中，地形高差的处理是需要考虑的因素之一。

2.4.2　居民意见协调和风貌管控的软性约束

与冷屋顶、屋顶绿化相比，墙体/垂直绿化涉及大量私有产权住户（底层与中层住户），改造意愿、成本分摊等问题复杂。加之社区内存有历史建筑与风貌管控要求，立面修改阻力较大。为保障更新项目可实施性与推进效率，暂未将其作为本阶段普适性方案。

综上，本研究遵循技术优势与空间载体精准匹配的原则进行技术选择与配置：冷屋顶（依靠高反照率）优先匹配坡屋顶；屋顶绿化（依靠蒸腾蒸发作用）优先匹配承载力强、易维护的平屋顶；乔木遮荫与蒸腾效应则精准匹配绿视率低、人群活动密集的街道和公园（如深田路、白鹤路、凤凰园）。表 2 汇总了表面降温策略及部分空间基底调整方案。

表 2　降温策略整理

策略	编号	具体措施	建设规模/m^2
局部空间更新	策略 1	北部白鹤山小区进行重新规划，推平原有地形	—
	策略 2	北部白鹤山小区进行重新规划，遵循原有地形	—
冷屋顶	策略 3	适建平屋顶及坡屋顶替换为高反射材料	88 340.69
	策略 4	适建坡屋顶替换为高反射材料	7 237.75
屋顶绿化	策略 5	适建平屋顶进行屋顶绿化建设	81 102.94
地面绿化	策略 6	深田路、白鹤路、凤凰园等增加乔木布置	—

2.5　分析方法

基于 ENVImet 模拟特点与热环境研究需求，设置 3 个监测高度平面：1.5 m（行人活动层）、12.5 m 和 17.5 m（城市冠层），并输出各情景在这 3 个平面上的累计降温值。

选用空气温度与热岛缓解程度作为降温效果

评价指标。空气温度反映区域热环境改善；热岛强度按《绿色建筑评价标准》（GB/T50378—2014）定义，即夏季典型日住区与郊区 8：00—18：00 平均气温差值。本文参照该标准，基于 8：00—18：00 数据计算日间热岛强度。

选取直线距离约 36.1 km 的同安国家基准站（站号 59130）作为郊区气温参考点，观测高度设为 1.5 m。研究以 1.5 m 高度平均气温代表区域气温，据此计算热岛强度，公式如下：

$$UHII_{avg} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} T_{u1.5}dt - \int_{t_0}^{t_1} T_{r1.5}dt}{\int_{t_0}^{t_1} dt} \quad (1)$$

式（1）中：$T_{u1.5}$为城市内部计算区域 1.5 m 处空气温度逐时值；$T_{r1.5}$为对应时期郊区站 1.5 m 处空气温度逐时值；t_0为计算的初始时刻即 8：00；t_1为计算的终止时刻即 18：00。

3 结果与分析

3.1 各情景建立结果

通过空间和约束条件的整合，考虑到揭示不同材料（尤其是冷屋顶和屋顶绿化）在建设经济成本差异下的降温效应[16]，主要构建 4 个主要模拟情景（表 3）。

表 3 情景构建结果

情景分类	具体策略
情景 1	—
情景 2	平屋顶、坡屋顶实施高反射材料(冷屋顶)+推平地形
情景 3	坡屋顶冷屋顶+平屋顶屋顶绿化+保留原地形
情景 4	坡屋顶冷屋顶+平屋顶屋顶绿化+增加乔木覆盖+保留原地形

3.2 各情景整体降温效应变化

3.2.1 基线情景（情景 1）热环境时空分异

由图 5 可知，深田社区 9 月气温呈先升后降的日变化规律。空气温度自 6：00 起逐渐上升，各高度空气温度约在 13：00—14：00 达到峰值，随后回落，至 20：00 左右降至较低水平，这一变化与太阳辐射强度密切相关，符合典型日变化特征。

在 6：00—8：00，17.5 m 与 1.5 m 高度温差较小，均约 27.5 ℃。随太阳辐射增强，8：00 后空气温度逐渐升高，17.5 m 处空气温度略低于 1.5 m 处，1.5 m、12.5 m、17.5 m 峰值分别出现在 13：00、14：00、14：00。

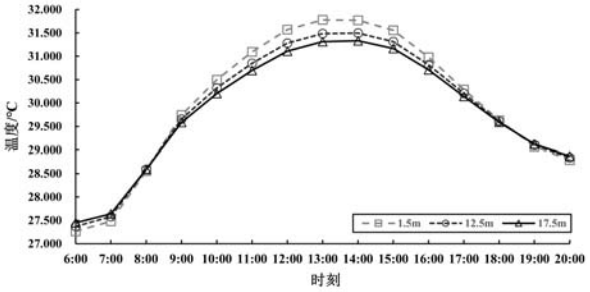


图 5 基线情景（情景 1）6：00—20：00 气温变化规律

如图 6 所示，高温区主要集中于西侧建筑密集的新民菜市场、图强小区及东西向主街道。人行高度 1.5 m 处，7：00 时东部气温略高于西部，温差约 0.5 ℃；至 14：00 则西部显著高于东部，温差约为 1.9 ℃。这是因为 7：00 时，东部区域率先接受太阳辐射，但因植被覆盖较多，有效抑制显热积累；而至下午 14：00，太阳西移，西部建筑密集，阻碍空气流通，形成局地热岛。12.5 m 和 17.5 m 也基本呈现此特点，但由于远离地表而呈现较小温差。

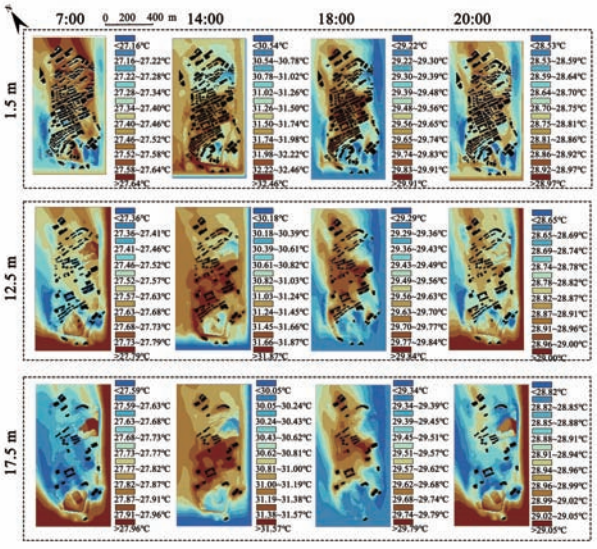


图 6 情景 1 在典型时间点各代表高度上的空气温度空间分布

3.2.2 其他各情景整体降温影响范围和强度

对于情景 2：整体而言，情景 2（图 7）在 1.5 m、12.5 m 和 17.5 m 高度上的网格最大降温强度分别为 0.74 ℃、0.90 ℃和 1.18 ℃。该情景在各高度均产生一定降温，其中冠层高度效果更为明显。14：00 时，1.5 m 和 12.5 m 高度的降温幅度主要集中在 0.09～0.36 ℃和 0.08～0.37 ℃。冷屋顶的降温效应随时间呈先增强后减弱趋势。该情景观测到相比于情景 2、3 较高的最大降温强

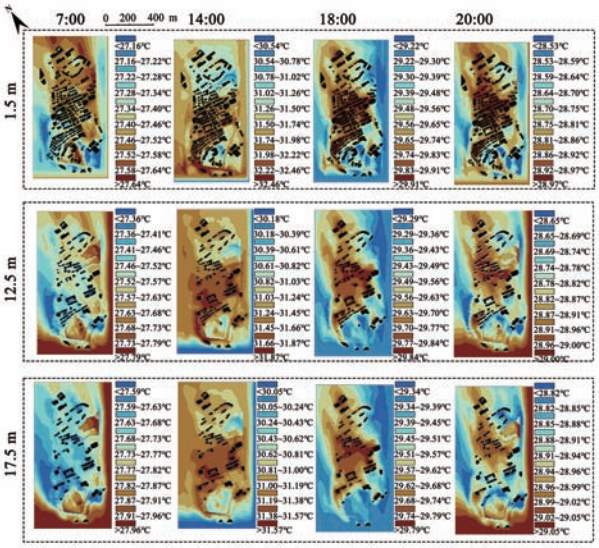


图 7　情景 2 在典型时间点各代表高度上的空气温度空间分布

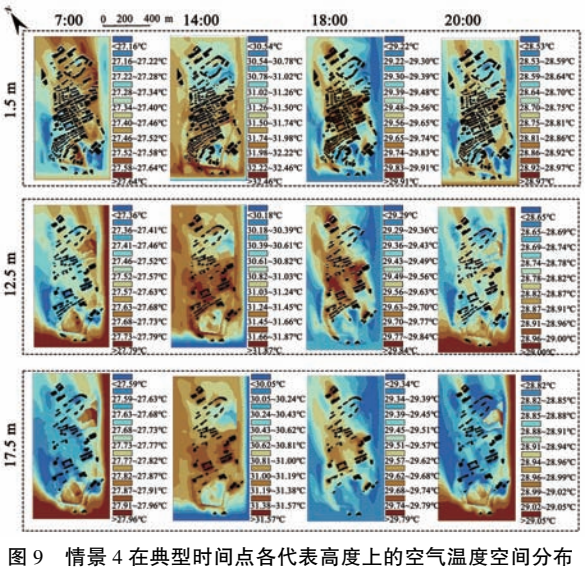


图 9　情景 4 在典型时间点各代表高度上的空气温度空间分布

度，可能部分源于该情景下推平地形、降低建筑密度所带来的附加影响。

对于情景 3：情景 3（图 8）在 3 个高度上的最大降温强度分别为 0.87 ℃、0.71 ℃和 0.61 ℃，整体降温强度与范围均优于情景 2，尤其在 12.5 m高度最为显著。其降温效应同样随时间先增后减。14：00 时，1.5 m 和 12.5 m 高度的降温幅度分别在 0.17~0.49 ℃和 0.15~0.52 ℃。与冷屋顶类似，屋顶绿化在冠层高度的最大降温效果微弱优于人行高度，但降温范围更广，并呈现向下风向扩散的趋势。

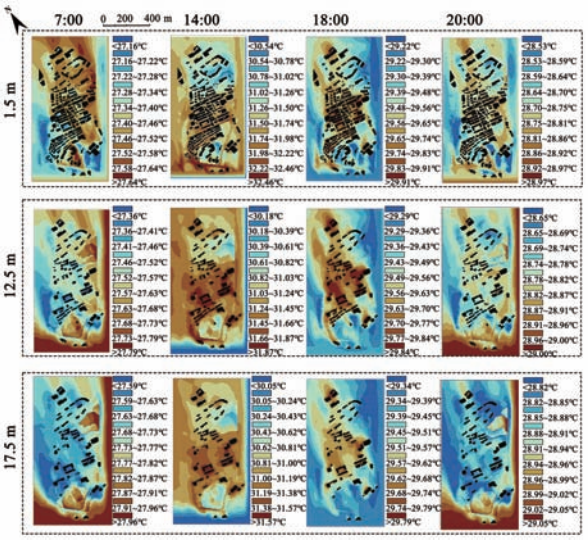


图 8　情景 3 在典型时间点各代表高度上的空气温度空间分布

对于情景 4：情景 4（图 9）在 3 个高度的网格最大降温强度分别为 0.88 ℃、0.70 ℃、0.62 ℃。其中，屋顶改造方案与情景 3 相同，因此重点分析地面绿化的降温效应。在白鹤路、深田路等实施乔木种植的街道，树木在 1.5 m 人行尺度形成以树干为中心的“冷岛”核心，降温效果最大为 0.27 ℃，并向下风向扩散。在 12.5 m 冠层高度，乔木仍表现出较好降温效果。相比之下，凤凰园等公共区域的乔木种植未呈现显著降温。

综合来看，以上 3 个情景的最大降温强度均出现在北部更新区域，而中部屋顶改造集中的老旧小区降温也尤为明显。

以上 3 个情景在 3 个高度上 6：00—20：00 的累计降温强度（图 10）表明，各时刻累计值变化趋势相似，峰值集中在 12：00 左右。以 12：00 为例，情景 2~4 的累计降温强度随优化推进而递增，在 12.5 m 高度分别为 -1 418.48 ℃、-2 189.74 ℃、-2 219.81 ℃，表明不同改造措施均起到降温作用，总体效果排序为：情景 4>情景 3>情景 2>情景 1。整体上，6：00 日出后各情景降温效果逐步显现，8：00 起降温加速，至 12：00左右达到峰值，之后逐渐减弱。

3.3　各情景热岛效应缓解评估

根据模拟结果，提取各情景 8：00—18：00 在 1.5 m 高度上的空气温度数据并进行后处理。计算研究区域内该高度所有网格的平均温度，并与同安气象站数据进行对比（图 11）发现，以情景 1 作为现状基准，其日平均气温为 30.741 ℃，对应的热岛强度为 0.941 ℃（郊区日均温

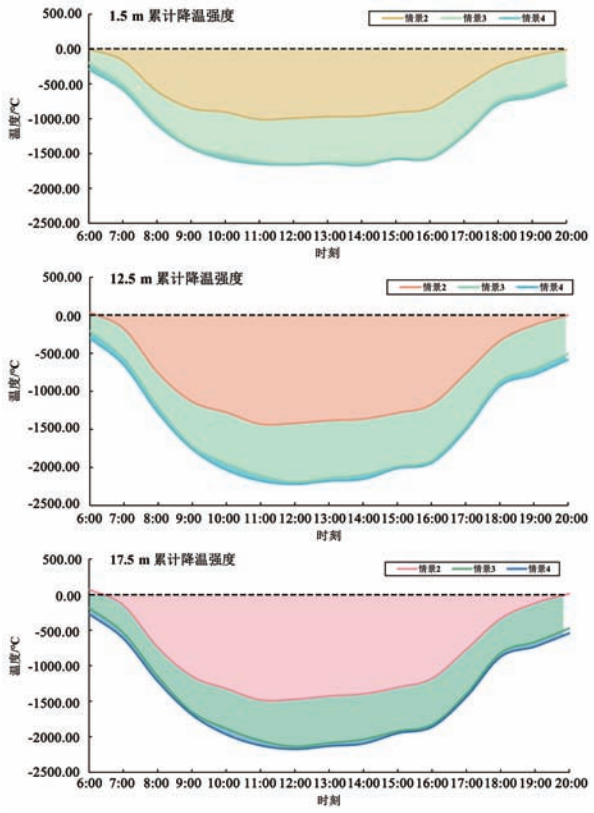


图 10 情景 2、3、4 累计降温强度逐时值

29.8 ℃）。情景 2、3、4 的日平均气温分别为 30.631 ℃、30.572 ℃、30.566 ℃。由表 4 可知，情景 4 的降幅最大，约 0.175 ℃，在社区微气候尺度上已属显著降温效果。

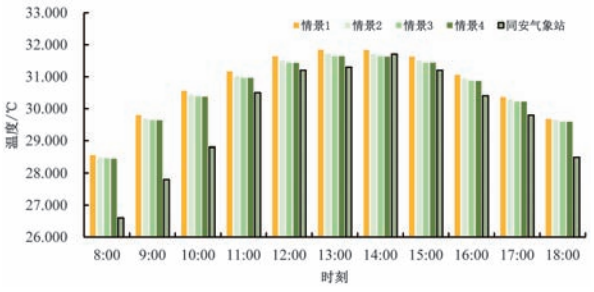


图 11 各情景与气象站温度逐时值比较

表 4 4 种模拟情景热岛强度

情景分类	热岛强度/℃
情景 1（对照组）	0.941
情景 2	0.831
情景 3	0.772
情景 4（规模 3+时序 1+类型 1）	0.766

4 讨论

本研究以亚热带湿润气候区的高密度老旧社区为对象，通过实地调研与多情景模拟，重点评估在现实更新约束下表面降温技术的组合改善潜力。与探讨单项技术极限效能不同，本研究创新性地将“空间与功能约束”作为情景基础，实现技术优势与空间载体的精准匹配。

在技术适建性上，情景 4 将屋顶绿化用于平屋顶、冷屋顶用于坡屋顶，是基于技术特性与社区现实约束的匹配。该配置规避了高密度老旧社区的常见限制，符合张宇轩和翟晓强[17]提出的二者互补观点。但与在理想条件下评估单项技术极限效能的研究相比[8,18]，本研究的平均降温潜力虽有所降低，但最大降温效果相当。这表明在实际更新中，技术组合的效益不仅取决于物理性能，更受在地约束与实施阶段的影响。

在具体量化结果上，本研究中，屋顶绿化在冠层高度（12.5 m）的降温幅度（0.15~0.52 ℃）与 Abuseif 等[19]的研究结果处于同一数量级。情景 3 和 4 显示，屋顶绿化的最大降温潜力与持续性均优于冷屋顶，与周荃等[7]实测结果一致。这源于两者机理差异：冷屋顶主要依靠高反射率减少辐射吸收，夜间效果减弱甚至可能反超常规表面；屋顶绿化则通过蒸腾与土壤湿度调节温度。

关于异常值与降温特征，部分植物生理与局地气候现象可解释模拟中的特殊表现。例如，情景 3 中屋顶绿化最大降温与日最高温出现时间错位，可能因 12∶00 前后植物蒸腾最活跃，从而降温达到峰值[20]；随后气温继续升高，部分植物气孔关闭以减少水分散失，蒸腾减弱；午后气温下降，气孔重新开放，蒸腾恢复[21-22]。此外，处于上风向的凤凰园，其乔木蒸腾释放的冷湿空气被主导风（东南风 135°）向下风向输送，形成冷空气廊道。研究表明，风速>3 $m \cdot s^{-1}$时，植被冷却效应可扩散至下风向 50~100 m[23]。

整体来看，热岛强度降低 0.175 ℃在社区尺度已属显著。谭啸等[24]实测指出，热浪期间广州各局地气候区热岛强度平均会放大 0.38 ℃，本研究通过表面降温策略组合可使该值降低近 45%。

综上，模拟结果肯定了在空间约束下，绿色基础设施与冷屋顶等表面降温技术对改善热环境的积极效果。但受数据可得性与模型精度所限，结果更适用于多方案相对效果的比较，而非绝对精准的陈述。

5　结论与展望

本研究将现实约束作为情景构建的前提，提出了“约束分析—策略预演—情景模拟”的决策和模拟框架，弥补了现有研究在实施导向方面的不足。研究成果可为规划管理者在有限空间与复杂产权条件下，选择与布局降温设施提供直接的量化参考。主要结论如下：1）技术-载体精准匹配是提升降温效益的关键思路。将冷屋顶、屋顶绿化分别适配于坡屋顶、平屋顶等异质性载体，可最大化利用有限空间资源，实现多高度协同降温。2）通过多技术组合优化，可在社区尺度实现显著的热岛缓解。在严格约束下，优化情景仍能使社区热岛强度降低约 0.175 ℃，这为在类似高密度老旧社区中实施可操作的热环境改善计划提供了量化依据。3）乔木的降温效应具有显著的空间形态依赖性。其在街道等狭窄空间能形成有效的“冷岛”核心，但在开阔区域效应不明显，需对种植位置进行针对性筛选。

未来研究可拓展更具代表性的社区样本，在条件成熟时将水体、墙面绿化等技术纳入模拟，并细化植物配置、材料反射率等参数的影响。同时，微气候模拟指标可与人体活动指标耦合，直接评估对居民热舒适度的提升效果，实现从“物理降温”到“体感降温”的跨越。

参考文献

[1]徐晨曦,张曦文,吴玲玲.缓解城市热岛效应的通风廊道构建研究进展[J].中国城市林业,2024,22(2):42-48.

[2]袁宇锋,翟盘茂.全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知[J].大气科学学报,2022,45(2):161-166.

[3]孔繁花,尹海伟,刘金勇,等.城市绿地降温效应研究进展与展望[J].自然资源学报,2013,28(1):171-181.

[4]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(3):166-181.

[5]NG E,CHEN L,WANG Y N,et al.A study on the cooling effects of greening in a high-density city:an experience from Hong Kong[J].Building and Environment,2012,47:256-271.

[6]张亚芹,楚势权,叶恺,等.自然通风、冷屋顶与外遮阳对室内热环境改善效果实验研究[J].暖通空调,2024,54(7):106-111.

[7]周荃,吴培浩,苏斌.广州地区冷屋面和种植屋面隔热节能效果的对比测试研究[J].建筑科学,2016,32(6):50-54.

[8]HE C,ZHAO J R,ZHANG Y,et al.Cool roof and green roof adoption in a metropolitan area:climate impacts during summer and winter[J].Environmental Science & Technology,2020,54(17):10831-10839.

[9]董楠楠,吴静.基于 ENVI-met 模拟的屋顶绿化热环境影响[J].中国城市林业,2020,18(4):61-66.

[10]ZHUANG Q R,LU Z M.Optimization of roof greening spatial planning to cool down the summer of the city[J].Sustainable Cities and Society,2021,74:103221.

[11]SAITO I,ISHIHARA O,KATAYAMA T.Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area[J].Energy and Buildings,1990,15(3/4):493-498.

[12]许杨.广州市住宅高反射屋顶房间被动式节能调控策略及优化设计研究[D]重庆:重庆大学,2021.

[13]TSOKA S,TSIKALOUDAKI A,THEODOSIOU T.Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications-a review[J].Sustainable Cities and Society,2018,43:55-76.

[14]WILKINSON S J,REED R.Green roof retrofit potential in the central business district[J].Property Management,2009,27(5):284-301.

[15]SHAO T R,LI C S,ZENG H.Resource potential assessment of urban roof greening and development strategies:a case study in Futian central district,Shenzhen,China[J].Acta Ecologica Sinica,2012,32(15):4852-4860.

[16]SPROUL J,WAN M P,MANDEL B H,et al.Economic comparison of white,green,and black flat roofs in the United States[J].Energy and Buildings,2014,71:20-27.

[17]张宇轩,翟晓强.缓解城市热岛效应的策略及其研究进展[J].建筑科学,2017,33(12):142-151.

[18]SMITH K R,ROEBBER P J.Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago,Illinois[J].Journal of Applied Meteorology and Climatology,2011,50(3):507-522.

[19]ABUSEIF M,DUPRE K,MICHAEL R N.The effect of green roof configurations including trees in a subtropical climate:a co-simulation parametric study[J].Journal of Cleaner Production,2021,317:128458.

[20]周可欣,李丽,曹锦波,等.自然生长式绿化屋顶的热工特性实验研究[J].城市建筑,2023,20(5):6-10.

[21]彭跃暖,秦华鹏,王传胜,等.蓄水层设置与植物选择对绿色屋顶蒸散发的影响[J].北京大学学报(自然科学版),2017,53(4):758-764.

[22]陈佳宇,尹海伟,孔繁花.绿色屋顶降温效应的多维时空变化特征[J].生态学报,2020,40(4):1445-1454.

[23]解卫东,顾康康,常鑫悦,等.基于 ENVI-met 的高层住区乔木种植对人体热舒适度的影响研究[J].城市建筑空间,2022,29(3):78-81.

[24]谭啸,陈光,张琪,等.湿热地区高温热浪扰动下局地热岛强度特征研究[J].建筑科学,2025,41(6):145-154,167.