

DOI: 10.20103/j.stxb.202403310683

于沐生,左进,吝涛,李晨,苏薇,范大林,骆剑承.基于多情景仿真模拟的城市高密度街区屋顶绿化降温效应定量研究.生态学报,2024,44(24): 11146-11162.

Yu M S, Zuo J, Lin T, Li C, Su W, Fan D L, Luo J C. Quantitative study on the cooling effects of green roofs in a high-density urban neighborhood based on multi-scenario simulation. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11146-11162.

基于多情景仿真模拟的城市高密度街区屋顶绿化降温效应定量研究

于沐生^{1,2}, 左进^{1,2,*}, 吝涛^{3,4}, 李晨^{1,2}, 苏薇⁵, 范大林⁶, 骆剑承^{4,7}

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 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

4 中国科学院大学, 北京 100049

5 天津大学建筑设计规划研究总院有限公司, 天津 300072

6 厦门市城市规划设计研究院有限公司, 厦门 361012

7 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要:城市热岛效应与高密度、高强度发展的中心城区建成环境为城市绿色基础设施建设和健康发展带来了新的挑战,提出了新的要求。屋顶绿化不额外占用建设用地,成为改善城市热环境的重要战略措施之一。针对当前屋顶绿化降温模拟与实际规划建设过程关联性较低、街区降温特征分析维度不深入的问题,基于建设规模、建设时序、建设类型三个影响要素,实现了从基于抽象实验思维构建屋顶绿化降温效应理想情景到基于规划建设决策视角构建实际情景的方法转变。并从城市街区的整体到局部,运用 ENVI-met 多视角审视不同情景中屋顶绿化在高密度城市街区的降温效应量化特征。研究表明:(1)屋顶绿化降温强度随建设规模的增加呈分段线性增长,相同规模裙房建设屋顶绿化的降温效应要远高于公共建筑和商业建筑。(2)在热环境改善更急迫的区域建设屋顶绿化可以局部降温,但从整体上看并未获得更高的降温收益;当新建屋顶绿化位置相近时,表现出明显的降温效应增长放缓的现象;(3)同高度下屋顶绿化的降温强度随与屋顶绿化边界距离的增加而总体呈现指数型函数的衰减特征,平行于主导风向的降温强度衰减速率要明显慢于垂直于主导风向;(4)密集型屋顶绿化在研究区网格的平均降温强度为粗放型屋顶绿化的 4.69 倍。基于上述降温模拟结果提出针对性的规划策略,为高密度街区屋顶绿化的建设实践提供科学依据,进而改善高密度街区热环境,促进城市居民之健康福祉,推动高密度城市街区的健康转型。

关键词:人群健康;高密度城市街区;屋顶绿化;降温效应;多情景模拟

Quantitative study on the cooling effects of green roofs in a high-density urban neighborhood based on multi-scenario simulation

YU Musheng^{1,2}, ZUO Jin^{1,2,*}, LIN Tao^{3,4}, LI Chen^{1,2}, SU Wei⁵, FAN Dalin⁶, LUO Jiancheng^{4,7}

1 School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 Tianjin Key Laboratory of Healthy Living Environment and Smart Technology, Tianjin 300072, China

3 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Tianjin University Research Institute of Architectural Design and Urban Planning Co., Ltd, Tianjin 300072, China

6 Xiamen Urban Planning and Design Institute Co., Ltd, Xiamen 361012, China

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFF1301304);国家自然科学基金(42071316);天津大学自主创新基金(2024XSC-0063)

收稿日期:2024-03-31; **采用日期:**2024-08-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zuojin0117@tju.edu.cn

7 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: The urban heat island (UHI) effect poses a significant threat to human health, and together with the continuously developing central urban environment towards high-density and high-intensity, brings new challenges and demands to the construction of green infrastructure and healthy development of cities. Green roofs, which do not take up additional construction land, have become one of the most important strategic measures to improve the urban thermal environment. In response to the low correlation between current roof greening cooling simulation and actual planning and construction processes, as well as the lack of in-depth analysis of cooling characteristics, based on three decisive influencing factors: construction scale, construction sequence, and construction type, a method transformation has been achieved from constructing ideal scenarios for roof greening cooling effects based on abstract experimental thinking to constructing actual scenarios based on planning and construction decision-making perspectives. The quantitative characteristics of the cooling effect of green roofs in high-density urban neighborhoods in different scenarios were examined from the whole to the local using ENVI-met. The results show that: (1) the cooling intensity of green roofs increases linearly with the increase of construction scale, and the cooling effect of green roofs in the same scale of podium construction is much higher than that of public and commercial buildings. (2) Green roofs built in more urgent area of thermal environment improving can be local cooling, but from the overall point did not get a higher cooling benefit; when the new roof greening location is similar, the growth of cooling effect can be slowed (3) At the same height, The cooling intensity of green roofs on localized plots shows an exponential decay as the distance from the green roof boundary increases; with the increase in the cooling intensity of the green roof with the distance from the green roof boundary. The decay rate of cooling intensity parallel to the wind direction is significantly slower than that perpendicular to the wind direction; (4) The average cooling intensity of intensive green roofs in the study area grid is 4.69 times higher than that of rough green roofs, which is more cost-effective in terms of cooling compared to its price. Based on the simulation results above, targeted planning strategies are proposed, providing a scientific basis for the construction practice of green roofs in high-density neighborhoods, in order to improve the thermal environment of high-density neighborhoods, promote the health and well-being of urban residents and the healthy transformation of high-density cities.

Key Words: human health; high-density urban neighborhoods; green roofs; cooling effects; multi-scenarios simulation

全球气候变暖和高度城市化已然是公认的事实^[1]。高密度中心城区日益增加的不透水表面和持续活跃的人类排放活动导致城市的下垫面热量平衡改变,加剧了气候变化^[2],是城市热岛效应形成的主要原因^[3-4]。热岛效应在世界范围内对人类健康已经构成了显著的威胁^[5-6],加剧了热相关疾病导致的死亡风险^[7-8]。而城市绿地等绿色基础设施可以有效缓解城市热岛^[9-10],从而在身体和精神等多个层面提升居民抵抗健康风险的能力,提升城市整体生态环境和健康水平^[11-12]。

我国快速城市化进程的一个显著特点是中心城区建成环境向着高密度、高强度等复杂立体的方向发展^[13-14],传统城市绿地的已有面积和可建设空间被进一步压缩和制约^[15-16],城市居民部分工作空间和生活场所也逐渐迁移到远离地面的高层建筑群中。这些变化无疑对在高密度城市中心区进一步提升绿地质量和暴露水平提出了新的挑战。而屋顶绿化不需要额外占用建设用地,能够较好适应城市高密度发展模式^[17],其对城市冠层降温的贡献也已被广泛观测和证实^[18]。

在对其降温影响机制的探索层面,现有研究从城市^[19-21]、街区^[22-24]、建筑^[25-26]三个尺度开展了侧重点不同的探索。城市等大尺度研究更多采用瞬时覆盖面积广的热红外遥感和天气研究和预报模式探讨屋顶绿化降温强度与面积以及空间布局之间的定量关系;建筑尺度多采用微型气候站对屋顶绿化在多个微观变量影响下的实际降温效果进行观测和对比;街区尺度在城市规划领域被认为是城市结构的基本单元^[27],是城市规划的基本工作尺度。相关研究一方面是基于“局地气候区”的概念^[28],通过类型学的方法对街区进行划分并

量化其空间形态特征,开展屋顶绿化在不同街区空间形态下的降温效应研究;另一方面,利用多种计算流体力学软件开展模拟研究,基于抽象的形体组合变化和屋顶绿化覆盖率^[29-32],评价不同理想化屋顶绿化预案的降温效应。然而屋顶绿化的规划和建设通常在复杂的功能、权属和空间系统下开展^[33],仿真模拟流程不宜与规划建设的实际流程脱节。现有屋顶绿化降温效应研究与实际规划建设关联性较低,情景的构建多服务于理想实验,缺少从宏观规划角度对屋顶绿化适建性、建筑类型以及建设时序等实际建设要素的综合关注;且现有高密度街区屋顶绿化降温研究的分析视角比较受限,多集中于单一地块或单一高度,在一定程度上忽视了实际高密度街区环境中大型建筑集群间的相互影响过程和局部的量化特征,无法全面、深入地评估屋顶绿化在城市街区冠层的降温效果。

针对上述问题,本研究面向街区尺度屋顶绿化建设,以厦门市开元高密度街区规划方案为典型研究区,基于计算流体力学模拟软件 ENVI-met,从规划从业者的角度纳入规划决策过程,以屋顶绿化建设规模、建设时序、建设类型为核心变量构建建设要素考虑更全面、对实际指导作用更强的屋顶绿化降温效应模拟方法,并从整体到局部对屋顶绿化在高密度街区中城市冠层的降温效应开展多视角的量化分析,以期对高密度城市街区屋顶绿化的建设决策提供技术支撑和模拟方案参考,进而达到改善高密度街区热环境,提升城市整体健康水平的远景目标。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于亚热带季风气候典型城市厦门市的开元街区进行,研究区区位和规划方案如图 1 所示。厦门市最热月份为 7 月—9 月,热岛效应凸显^[34]。开元街区位于厦门本岛东部,目前二维详细规划方案和三维城市设计制定工作正在持续开展(图 1)。阶段性规划方案具有高密度城市街区的典型特征。一方面,从人口密度上看,开元街区规划人口密度约为 20000 人/km²,远远超出高密度城市门槛指标 15000 人/km²^[14,35]。另一方

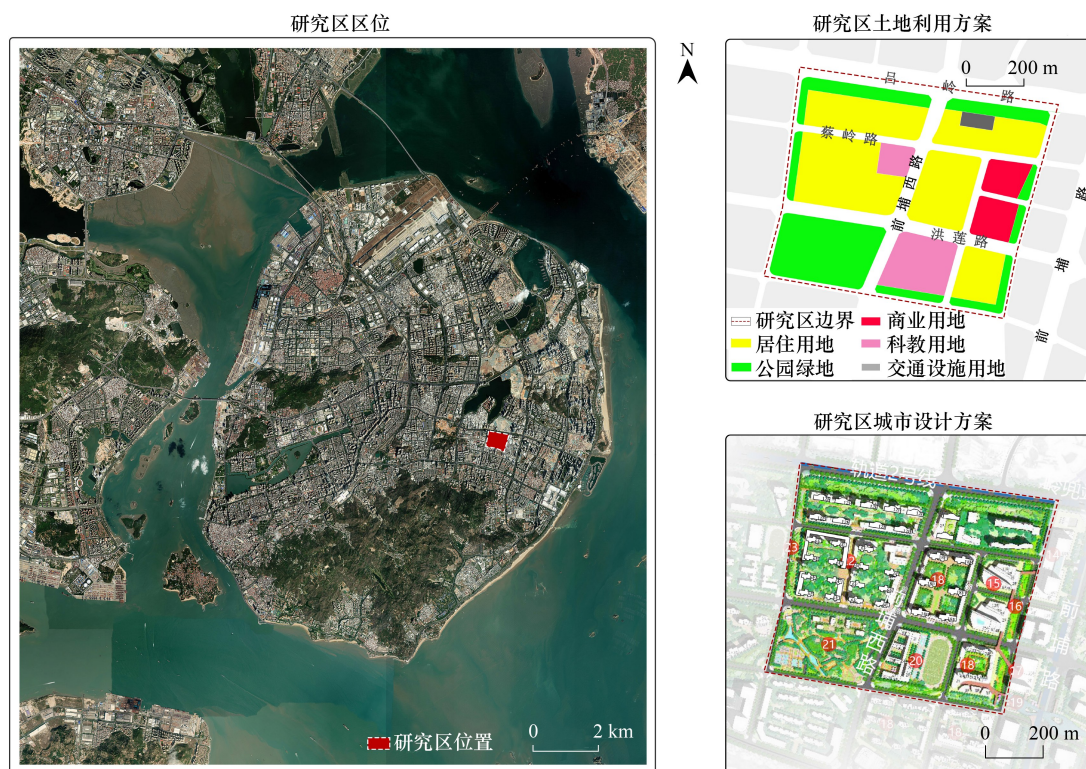


图 1 研究区位置及现阶段设计方案示意图

Fig.1 Location and the planning scheme of the study area

面,开元街区高层建筑密集,且在建筑平均层数、容积率等建设强度指标上^[36]也明显具有高密度城市街区的典型建设特征。

研究区已有初步城市设计方案,土地利用类型丰富,以居住和商务功能为主,辅以文教及行政功能。居住功能用地面积较大,主要建筑功能类型为住宅建筑与环绕四周的裙房(大部分作商业用途)。商业建筑主要集中在研究区东部靠近主干道一侧,呈带状分布;公共建筑层数多为2—4层,呈点状散布于在研究区中;住宅建筑以高层住宅、小高层住宅和多层住宅为主体建筑类型,建筑层数为6—18层。总体来看研究区内建筑类型较为多样,未来的产权构成也将会较为复杂。

1.2 数据来源

进行屋顶绿化降温效应模拟所需的数据主要包含空间数据、属性数据、气象数据三种类型。城市空间矢量文件和规划相关数据均来自厦门市城市规划设计研究院有限公司。植物属性参数参考厦门市常用屋顶绿化植物,选用景天科植物作为本研究屋顶绿化草本植物生理属性的参考样本^[37—38]。乔木和灌木则参考小叶榕、龟甲冬青、三角梅等多种植物确定参数。气象数据均获取于中国科学气象数据中心网站(<http://data.cma.cn/>),数据来源为厦门市气象台站(代号:59134)。因厦门市时有台风过境,考虑到模拟的普适性和可参考性,“风速”参数选取相关研究中人们感到较为舒适的“微风”(light breeze)^[39]平均风速。ENVI-met 主要输入参数见表1。

表 1 ENVI-met 主要输入参数
Table 1 Main input parameters of ENVI-met

参数 Parameters	取值 Values
模拟日期 Simulation date	2022 年 9 月 3 日
研究区经纬度 Latitude and longitude of the study area	24.26°N,118.04°E(厦门)
风向 Wind direction	344°
10m 风速 Wind speed at 10m above the ground	1.80m/s
初始周围环境温度(00:00) Initial ambient temperature	35.30℃
初始湿度(00:00) Initial relative humidity	46%
粗糙度 Roughness	0.01(默认)
太阳辐射调整因子 Solar radiation coefficient	1.00
乔木植物叶面积密度 Leaf area density of tree plants	2.10
灌木植物叶面积密度 Leaf area density of shrub plants	2.50
草本植物叶面积密度 Leaf area density of herbaceous plants	0.25
乔木植物反照率 Albedo of trees	0.31
灌木植物反照率 Albedo of shrubs	0.30
草本植物反照率 Albedo of herbaceous plants	0.15

1.3 研究方法

在模拟情景构建之前收集多种空间和属性要素为情景构建提供决策依据,与此同时纳入屋顶绿化规划建设的决策过程,完成情景的构建模拟和比较分析。具体可分为如图2所示三个步骤。

1.3.1 软件设置

采用三维非流体静力模型 ENVI-met 作为模拟软件^[40],量化屋顶绿化在街区尺度的降温效果及其机制。以往众多学者的相关研究和综述表明^[41—44],ENVI-met 能够在参数较为全面的情况下较好的拟合城市实际热环境情况。例如,Ng 等^[23]在香港对 ENVI-met 在 15:00 时刻的模拟气温值与实测值进行对比,认为两组数据一致性较好(决定系数 $R^2=0.625$),模拟结果较为可靠。同样,陈佳宇等^[45]、Alizadehtazi 等^[46]对 ENVI-met 的验证实验表明其在初始预热阶段和模拟过程中都保持着较高的准确度。一般来说,ENVI-met 可以用来复现

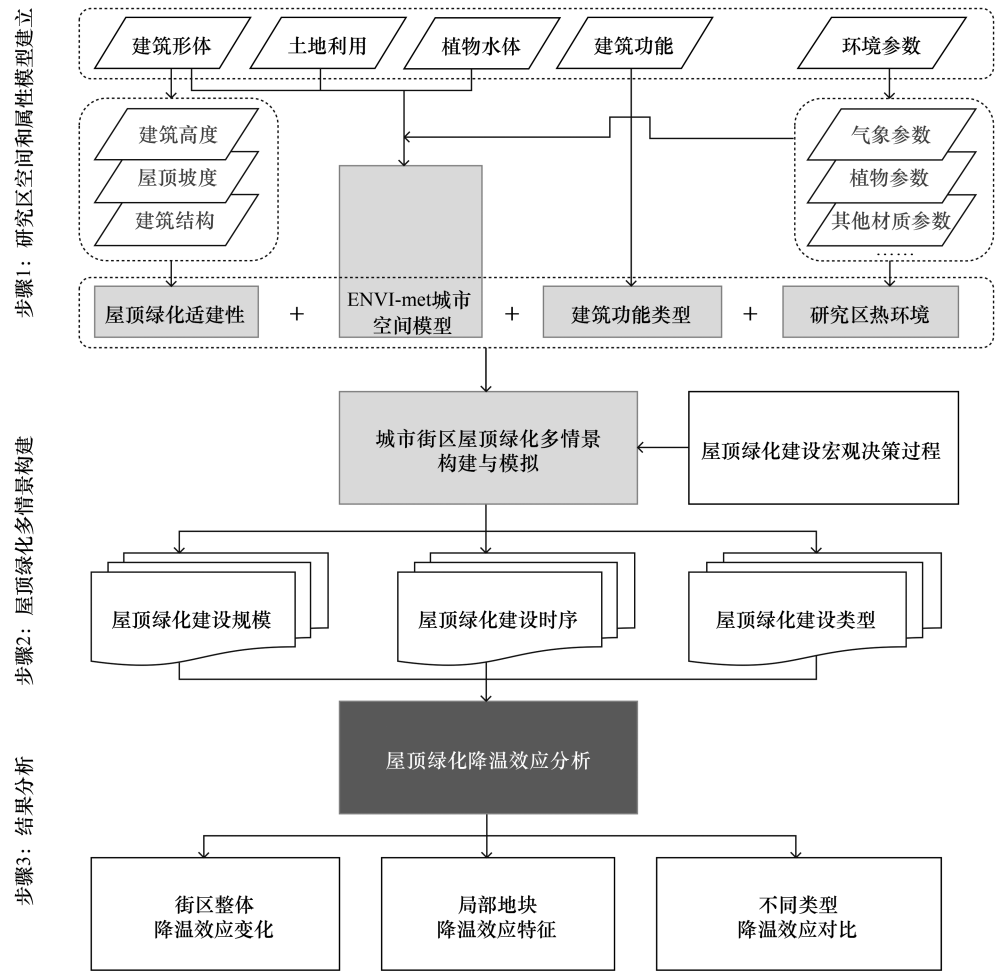


图 2 研究方法框架

Fig.2 The framework of methodology in this study

城市热环境的变化。边界条件选用闭式边界条件中的“Simple forced”模式,以期获得对比较为明显的计算结果;湍流模式选用“Bruse/ENVI-met 2017”模式。

1.3.2 研究区空间模型建立

使用 ENVI-met Inx 插件将研究区城市空间三维模型转化为 ENVI-met 网格模型。为标准化空间模型,避免发生湍流计算错误,将低于 6 层的建筑屋面高度集中于 10.8m 和 21m。以研究区边界为基础拓展实体模型边界,包含此部分区域内的建筑、道路、植物、土壤等模型。再次拓展网格边界(空白网格)作为缓冲区,避免模型边缘出现非正常空间导致模拟温度阶梯变化剧烈的情况。

模型网格数方面,设置为 156(x 轴) $\times$ 139(y 轴) $\times$ 16(z 轴),分辨率为 5m $\times$ 5m $\times$ 5m。ENVI-met 软件建议网格设置的最大高度超过最高建筑高度(50.00m)的两倍以保持模拟的稳定性。因此,为有效节约网格数量并保持模拟质量,建模时采用了“Telescopic”网格建立模式,网格密度相应递减, z 轴高度最终为 101.5m。模型建立结果如图 3 所示。

1.3.3 面向实际建设的屋顶绿化多情景构建方法

(1) 屋顶绿化多情景构建原则

受到经济、社会、政策等多因素限制,城市规划中各类用地的规模通常实行总量控制。因此,充分尊重开元街区已有规划和设计方案,保持各情景的用地面积、用地分布、街区空间形态和各建筑类型屋顶面积不变,在此基础上定量模拟城市街区屋顶绿化实施后的降温潜力。

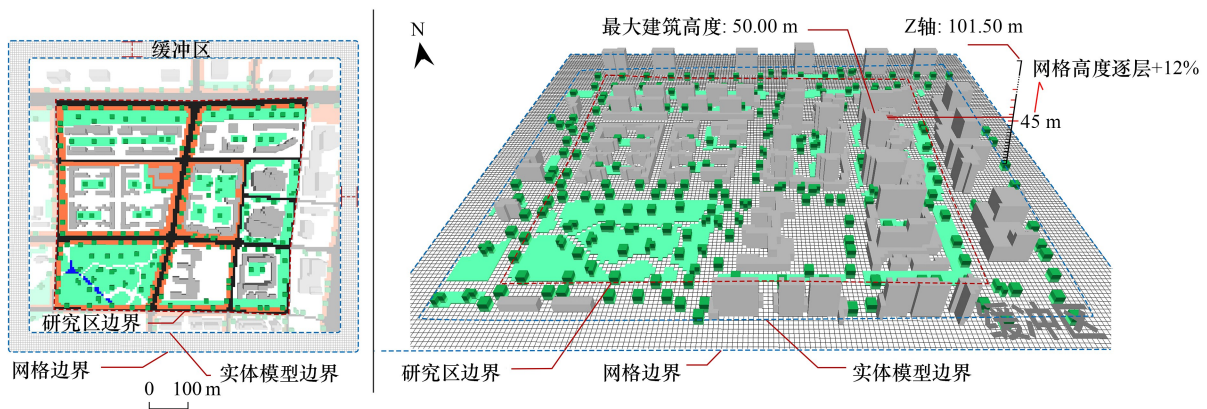


图3 研究区 ENVI-met 模型

Fig.3 ENVI-met model

(2) 降温效应影响要素的转译

根据刘凤凤等^[47]、孔繁花等^[48]、王一鸣等^[49]在城市生态学领域的研究和综述,以及实践中城市绿地系统规划和生态规划中的指标调控^[50-51],可以将绿地对城市环境和公共健康的影响要素主要概括为规模(覆盖率)、空间布局和植物配置三个方面。此外,部分学者和规划实践者也严谨地认为,城市绿地相关规划较于传统规划是更加长期、慎重的阶段性任务^[52]。所以,应根据实际街区条件对影响因素进行转译。虽然此案例中屋顶位置及布局已无法更改,但可以根据团队先前董菁等^[53]提出的优先建设原则以缓解热岛严重区的热环境状况为目标,基于局部热环境改善的紧迫性调整不同位置屋顶绿化的建设时序,最终确定每个建设时序下阶段性的规模。因此,在本实验的情景设置中,降温效应的自变量调整为建设规模、建设时序和建设类型。

(3) 降温效应影响要素取值的依据

1) 基于适建性分析确定屋顶绿化建设上限

通过资料收集、遥感影像目视译、文献阅读和实地调研等研究方法获取适建性判别标准与街区内建筑基本情况。在上海市屋顶绿化技术规范(DB31/T 493—2020)、成都市屋顶绿化及垂直绿化技术导则(试行)等相关规范与导则的基础上,结合相关文献提出的适建标准,筛选出可以从土地利用和城市设计方案直观判别的指标作为本研究中屋顶绿化适建性判别依据,主要指标如下(表2):

表2 屋顶绿化适建性影响因素及原因分析

Table 2 Analysis of factors affecting the suitability of roof greening

适建性指标 Factors	参考的标准或相关研究 References				本研究的判别标准 Criteria in this study
	上海市屋顶绿化技术规范	成都市屋顶绿化及垂直绿化技术导则	邵天然等 ^[54]	董菁等 ^[53]	
承重结构 Load-bearing structures	充分考虑屋顶绿化静荷载及雨、雪等活荷载。	设计活荷载应大于 200kg/m ² (粗放型),宜大于 350kg/m ² (密集型)	通常情况下,钢筋混凝土结构的建筑可直接进行屋顶绿化	设计承载力大于 2.0kN/m ²	通常情况下的钢筋混凝土框架结构可满足荷载要求
建筑功能类型 Building functional types	新建公共建筑鼓励建设	—	建筑类型在具体绿化方案选择时加以考虑	公共建筑或商业建筑为高适	优先考虑公共建筑、其次商业建筑
屋面坡度 Roof Slope	<15°(平屋顶)	—	≤30°	—	小于 15°或平屋顶
屋面高度 Roof heights	≤50m	12 层以下、40m 高以下的建筑物屋顶	12 层或 40m 以下	12 层或 40m 以下优先	小于 12 层或≤40m

2) 基于实施难易程度确定屋顶绿化建设规模

不同建筑功能类型在例如产权情况、促进方法等方面有显著区别,这会影响建筑屋顶绿化的最大建设规模,进而成为制约屋顶绿化降温效应最大化的关键因素^[55-57]。根据上文研究学者所提及应优先建设的建筑

类型,对研究区内主要建筑类型的屋顶绿化建设难易程度进行初步判断(表3)。

表3 不同建筑功能类型实施难易程度及优先性
Table 3 Implementation difficulty and priority of buildings with different functional types

建筑功能类型 Building functional types	产权复杂度 Complexity of property rights	建设难易程度 Implementation difficulty	依据 References
公共建筑 Public buildings	简单	易	上海市屋顶绿化技术规范
商业建筑(包括住宅裙房) Commercial buildings (Podiums)	简单	较易	董菁等 ^[53]
住宅建筑 Residential buildings	复杂	较难	简兴等 ^[58]

3) 基于局部热环境改善紧迫性确定屋顶绿化建设时序

随后,在上文确定规模上限的基础上,对规划方案的相对热环境情况进行评估,并对相对高温的区域进行划分。为了优先实现局部炎热地段的屋顶绿化降温效应,梳理安排研究区中各建筑的建设时序。建设时序在较长时间跨度上也会间接影响建设规模,应体现于情景构建的环节中。

4) 基于植物种类确定屋顶绿化建设类型

在均采用容器式轻型屋顶绿化施工方式的前提下,表4对各类植物作为屋顶绿化在厦门市建设的优劣势进行了初步分析,以便于在实验情景中模拟潜在的屋顶绿化建设类型差异。

表4 不同植物种类作为屋顶绿化的优劣势
Table 4 Advantages and disadvantages of different plant species as green roofs

植物种类 Plant species	叶面积密度 Leaf area density	建设成本 Costs of construction	适合屋顶绿化类型 Suitable types of green roofs
乔木植物 Trees	较高	较高(约 400 元/株)	密集型屋顶绿化
灌木植物 Shrubs	较高	一般(约 350 元/m ²)	密集型屋顶绿化
草本植物 Herbaceous plants	低	较低(约 250 元/m ²)	粗放型屋顶绿化

表中建设成本相关数据来源于厦门屋顶绿化从业公司的市场定价,假定均采用容器式轻型屋顶绿化施工方式,仅考虑植物类型差异

1.3.4 降温效应的比较与分析

(1) 降温效应的输出时空设置

为了排除系统性的模拟软件误差,本研究中 ENVI-met 输出指标中的不同情景下屋顶绿化的降温效应均为室外空气温度的相对差值。先前研究表明,日间植物可以吸收的短波太阳辐射多,降温效果较明显。而夜晚植物通过捕获的长波辐射增加气温,出现区域升温现象^[59]。且在高温热浪的天气情况下降温幅度高于普通夏日^[60]。因此,预期在太阳辐射和热岛效应较为强烈的高温夏季日间,对屋顶绿化的降温效应进行探索。对 2022 年 8 月 1 日至 9 月 30 日全天气温数据进行收集(数据来源:厦门市气象台站;代号:59134),选取日间大气温度最高的 2022 年 9 月 3 日(日间最高大气温度 35.3℃)作为模拟日期。

所有情景的模拟起止时间均为 2022 年 9 月 3 日 00:00—24:00。从高温时段的起点 10:00 开始,选取降温效应结果分析的典型时刻为 2022 年 9 月 3 日 10:00、12:00、14:00、16:00。参考世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)等气象和气候观测组织的统一规定,输出高度为距离表面 1.5m。而研究区建筑高度多集中于 10—20m,考虑到 ENVI-met 竖向网格划分后对数据输出平面高度的限制,在输出模拟结果时将高度设置为 12.5m、17.5m、22.5m,即主要屋顶绿化建设高度上方的 1.5m 处,以便更为直观考察研究区城市冠层顶部的温度变化。

(2) 降温效应的指标统计方法

为了对比各情景中屋顶绿化在研究区范围内的整体降温效应差异,首先应对输出结果进行预处理。对结果进行处理时剔除高于平面输出高度的建筑轮廓与研究区范围外的部分网格(网格点坐标 $x=23$ 、 $x=130$ 、 $y=111$ 、 $y=20$ 范围外的所有网格),统计研究区内部各高度输出平面上剩余所有网格的降温效应。本研究对

屋顶绿化降温效应的分析主要涵盖降温强度、降温影响范围、降温强度衰减三个方面。

一方面,用降温强度表征屋顶绿化的降温效应。基于某一时刻模拟计算的结果,分别输出情景 i (i 可取 2—7) 中 h 高处 (h_1 、 h_2 、 h_3 分别为 12.5m、17.5m、22.5m) 所有共 j 个网格的温度,每个网格的温度分别表示为 T_j ;输出情景 1(对照组)中对应高度 h 的共 j 个网格温度,每个网格的温度分别表示为 T_{cj} 。则屋顶绿化的降温强度在每个网格中体现为 ΔT ,为 T_{cj} 和 T_j 的差值,表示为:

$$\Delta T = T_{cj} - T_j$$

获取各网格降温强度 ΔT 后,在孔繁花等^[46]学者计算方法的基础上,将降温效应累积值这一概念拓展至街区范围并进行改进和适应。进而计算降温强度累积值以表征街区屋顶绿化在三维空间整体的降温强度。即将各情景中所有高度的各网格降温强度 ΔT 进行求和计算,得到此情景中屋顶绿化在整个街区的降温强度累积值 S ,表示方法如图 4。

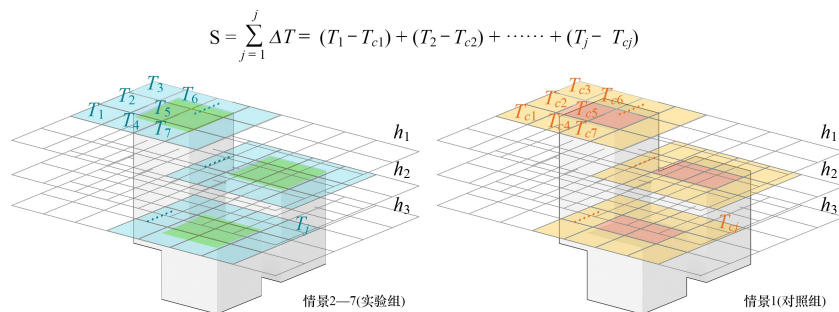


图 4 降温强度表征方法示意图

Fig.4 Characterization method of cooling intensity

S :降温强度累积值; ΔT :增加屋顶绿化后各网格的降温强度; h_1 :距地表 12.5m 高处; h_2 :距地表 17.5m 高处; h_3 :距地表 22.5m 高处; $T_1—T_j$:情景 2—7 中各情景在 h_1 、 h_2 、 h_3 每个网格的输出温度; $T_{c1}—T_{cj}$:情景 1(对照组)中 h_1 、 h_2 、 h_3 每个网格的输出温度

降温效应的空间范围则通过“LEONARDO Visualize”进行可视化输出和分析,以便直观的考察不同情景屋顶绿化的降温效应的影响范围。模拟结果从屋顶绿化的街区整体降温效应变化、地块局部降温效应特征与不同类型降温效应对比三个层次展开分析。并采用降温强度最大值、衰减幅度、与屋顶绿化边界距离等指标进行辅助分析。

2 结果与分析

2.1 屋顶绿化多情景构建结果

2.1.1 适建建筑的判别

研究区内总建筑屋顶面积为 44242m²,适建屋顶绿化面积为 27644m²,占屋顶面积的 62.50%(图 5)。部分住宅屋面在规划方案中已设计为坡屋顶,且因产权问题较为复杂,故不予考虑建设屋顶绿化。

2.1.2 建设规模的分类

根据厦门市城市规划设计研究院提供的土地利用信息,对建筑功能进行初步划分。适建建筑功能类型及分布如图 6 所示。在实际建设中,不同功能类型的建筑屋顶绿化建设难易程度有较大差异,因此,对模拟实验中屋顶绿化的总体建设规模的可能情景进行拟定(图 7);规模 1:研究区内公共建筑的适建屋面均建设屋顶绿化,包括了学校、社区服务中心等公共建筑。此时研究区屋顶绿化建设规模约为 5388m²,屋顶绿化覆盖比例占有适建屋顶面积的 19.49%(简称为覆盖率);规模 2:在规模 1 的基础上,对商业建筑进行屋顶绿化建设。此时研究区屋顶绿化建设规模约为 9891m²,覆盖率为 35.78%;规模 3:在规模 2 的基础上,研究区内所有适建的公共建筑、商业建筑和住宅裙房屋面全部建设屋顶绿化。此时研究区屋顶绿化建设规模约为 27644m²,覆盖率为 100.00%。

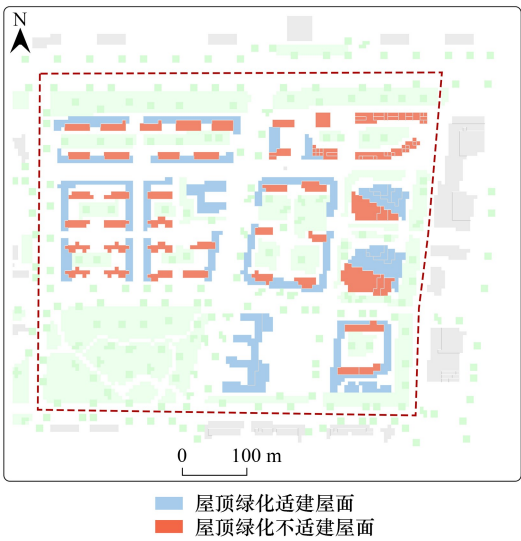


图5 屋顶绿化适建性判别与分布结果
Fig.5 Suitability and distribution of roof greening

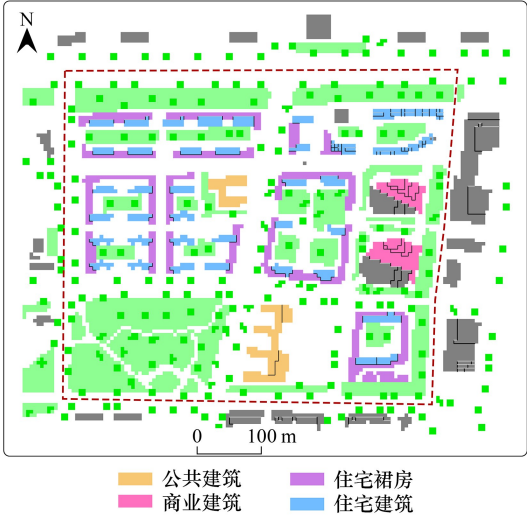


图6 不同功能建筑分布
Fig.6 Distribution of buildings with different functions

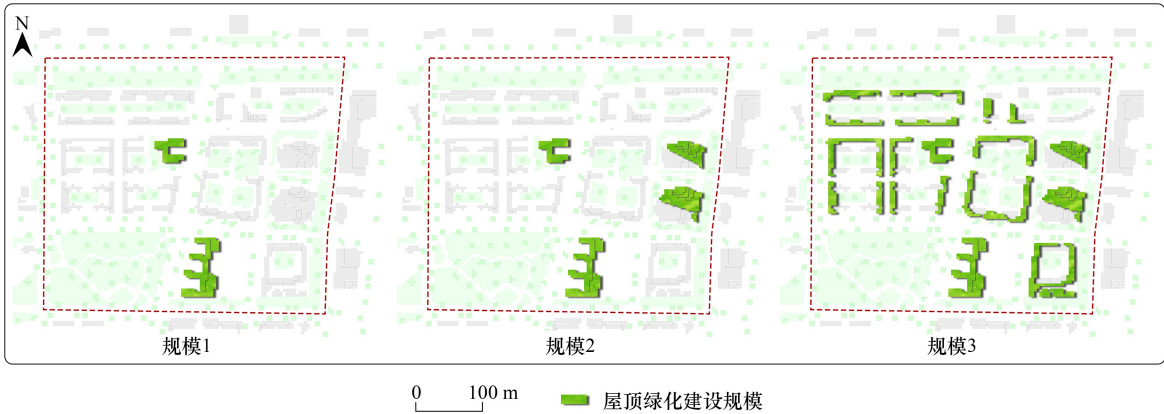


图7 不同屋顶绿化建设规模示意
Fig.7 Different construction scales of roof greening

2.1.3 建设时序的分类

根据不同建筑类型确定了建设上限后,实际规划应充分关注街区局部热环境改善的紧迫性,并通过屋顶绿化的建设时序予以回应。运用 ENVI-met 对研究区进行建模并初步进行热环境模拟后,输出 12.5、17.5、22.5m城市冠层高度在 10:00、12:00、14:00 和 16:00 的高温分布并叠加,得到相对炎热区、相对高温区、相对温暖区三种温度区域。区域划分均为街区内部的相对而非绝对温度比较,仅仅用于构建情景时屋顶绿化是否优先建设的考虑依据(图 8)。随后,在三种规模的基础上对建设时序进行判别。由于公共建筑和商业建筑面积较小,暂不考虑对其进行建设时序的划分,而裙房建筑面积大分布广,依据街区局部热环境改善的紧迫性将其分为三种时序建设(图 9),从而落脚于对应短期的建设规模:时序 1:选取街区热环境相对炎热的区域周边的住宅裙房建设屋顶绿化,此时建设规模约为 16277m²,覆盖率为 58.88%;时序 2:选取街区热环境相对炎热的区域和相对高温的区域周边的住宅裙房优先建设屋顶绿化,此时建设规模约为 21642m²,覆盖率为78.29%;时序 3:选取街区热环境相对炎热区、相对高温区和相对温暖区周边的住宅裙房建设屋顶绿化,此时建设规模约为 27644m²,覆盖率为 100.00%。

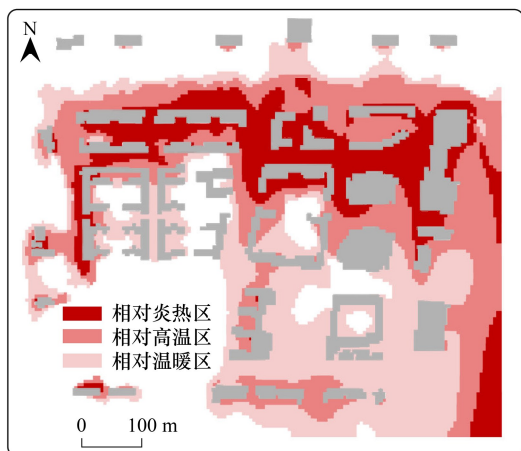


图 8 研究区热环境分区

Fig.8 Thermal environment zoning map of the study area

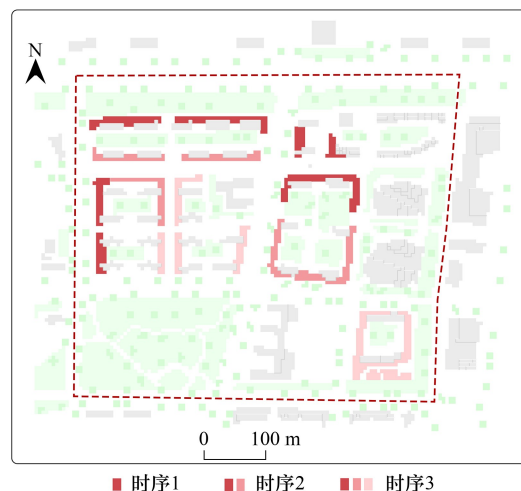


图 9 住宅裙房各时序建设区域分布

Fig.9 Construction areas of residential podium buildings in different time sequences

2.1.4 建设类型的分类

根据屋顶绿化植物的优劣势分析确定了模拟实验中的 2 种屋顶绿化建设类型:类型 1 为密集型屋顶绿化,即小乔木、灌木、草本植物类型的组合绿化方式。因亚热带海洋性气候适合小乔木及灌木的生长,且在厦门市的实际建设中也多采用密集型屋顶绿化。由于相关导则没有明确植物配比要求,本实验在控制成本并保持屋顶绿化美观错落的前提下,拟定小乔木的覆盖面积比例约为 25%,灌木约为 50%,草本植物约为 25%;类型 2:粗放型屋顶绿化。考虑到屋顶绿化的在厦门市的大力推广现状,类型 2 中屋顶绿化均为粗放型屋顶绿化,即以植株高度较为低矮的如佛甲草等景天科草本植物为主要植物类型的屋顶绿化。具体如图 10 所示。

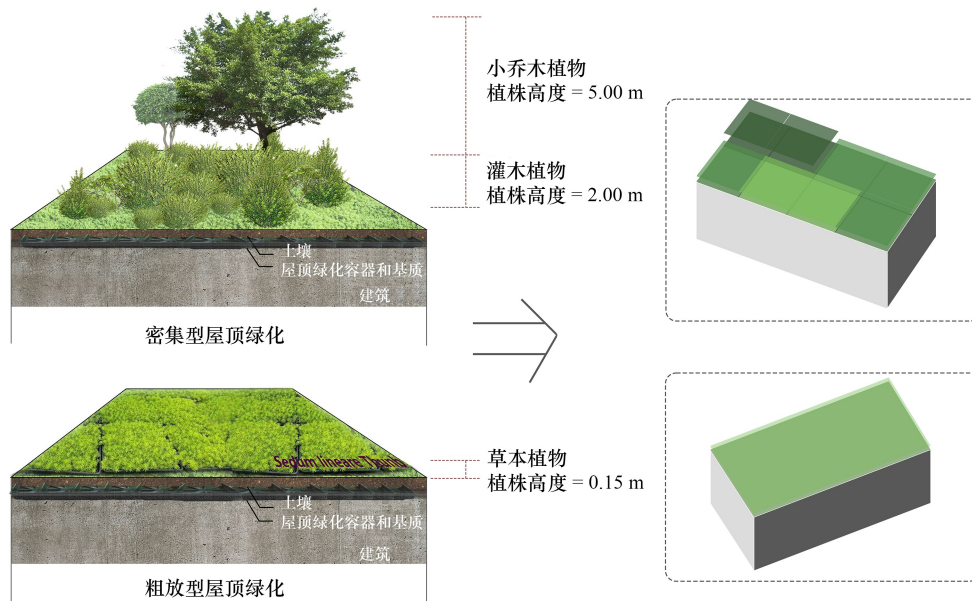


图 10 不同屋顶绿化类型示意图

Fig.10 Different types for green roofs

2.1.5 基于要素整合的多情景构建结果

将上述三类建设要素叠加,构建了 7 种屋顶绿化建设情景,情景 1 为对照组。所有情景如表 5 所示。

表 5 7 种模拟情景展示
Table 5 Presentation of 7 simulated scenarios

情景分类 Classification of scenarios	屋顶绿化建设规模及 (覆盖率) Construction scale of roof greening (coverage)	建设建筑类型 Building functional types	屋顶绿化类型 Cnstruction types of roof greening
情景 1Scenario 1	0m ² (0.0%)	无	无
情景 2(规模 1 +类型 1) Scenario 2 (Scale 1+Type 1)	5388m ² (19.49%)	公共建筑	密集型屋顶绿化
情景 3(规模 2+类型 1) Scenario 3 (Scale 2+Type 1)	9891m ² (35.78%)	公共建筑+商业建筑	密集型屋顶绿化
情景 4(规模 3+时序 1+类型 1) Scenario 4 (Scale 2+Sequence 1+Type 1)	16277m ² (58.88%)	公共建筑+商业建筑+住宅 裙房	密集型屋顶绿化
情景 5(规模 3+时序 2+类型 1) Scenario 5 (Scale 3+Sequence 2+Type 1)	21642m ² (78.29%)	公共建筑+商业建筑+住宅 裙房	密集型屋顶绿化
情景 6(规模 3+时序 3+类型 1) Scenario 6 (Scale 3+Sequence 3+Type 1)	27644m ² (100.00%)	公共建筑+商业建筑+住宅 裙房	密集型屋顶绿化
情景 7(规模 3+时序 3+类型 2) Scenario 7 (Scale 3+Sequence 3+Type 2)	27644m ² (100.00%)	公共建筑+商业建筑+住宅 裙房	粗放型屋顶绿化

2.2 街区整体屋顶绿化降温效应变化

为了探究不同情景中屋顶绿化在街区尺度的降温效应,计算其余所有情景与情景 1(对照组)相同位置网格的温度差值(℃)以表征各情景中屋顶绿化在城市街区的降温强度,正值代表降温,负值代表升温。详细结果如下:

(1)情景 2、3、4 中研究区范围内屋顶绿化降温强度累积值均随屋顶绿化建设规模的增加而递增,并呈现幅度不同的分段式线性增长,在不同典型时刻表现出差异明显的降温强度累积值及其增长速度(图 11)。各时刻降温强度累积值变化趋势基本一致。分析图 15 中的折线趋势可知,在情景 4—情景 6 中,当街区内住宅裙房建设屋顶绿化后,相比于情景 1—情景 3 阶段,提高近乎相等屋顶绿化规模时街区网格的平均降温强度累积值增幅更快。情景 3 到情景 4 屋顶绿化建设规模上升了 1.65 倍,但研究区降温强度累积值却上升了 3.75 倍,增幅较之前显著加快。

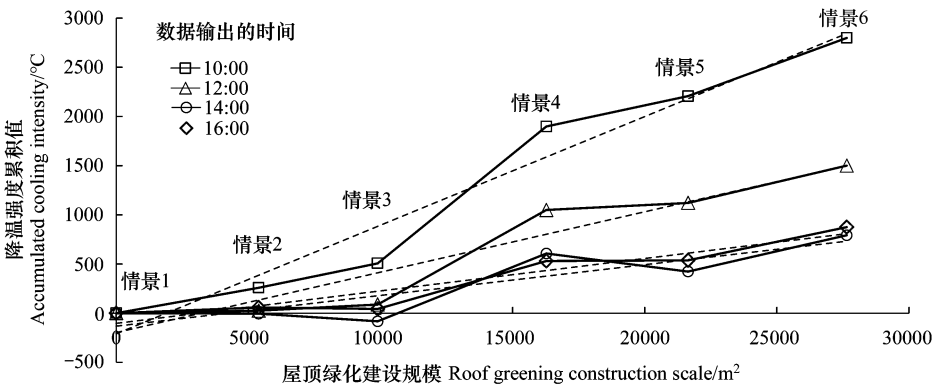


图 11 各情景不同时刻屋顶绿化降温强度累积值随建设规模增大的变化曲线

Fig.11 Curves of accumulated cooling intensity of green roofs at different time in various scenarios with increasing construction scale

(2)在热环境急需改善的区域建设屋顶绿化可以实现局部降温,但从整体上看并未获得更高的降温收益。从曲线上(图 11)可知,10:00 时,情景 5—情景 6 阶段新增建设规模相比情景 4—情景 5 阶段只提高了 11.87%,但降温强度累积值的增幅却显著提升了 91.58%。在街区整体视角下新建屋顶绿化在情景 4—情景 5 阶段降温强度累积值的提升幅度远远弱于情景 5—情景 6 阶段。情景 4—情景 5 阶段有部分屋顶绿化新建位

置与之前情景相近,表现出明显的降温效应增长放缓的现象。即,在热环境改善需求更急迫的区域建设屋顶绿化并未达到预想的降温效应。此外,以 12:00 时刻为例,观察图 12 可知,在下风向区域出现了非常微弱的升温现象,这进一步在街区整体视角下稀释了屋顶绿化的降温效应。

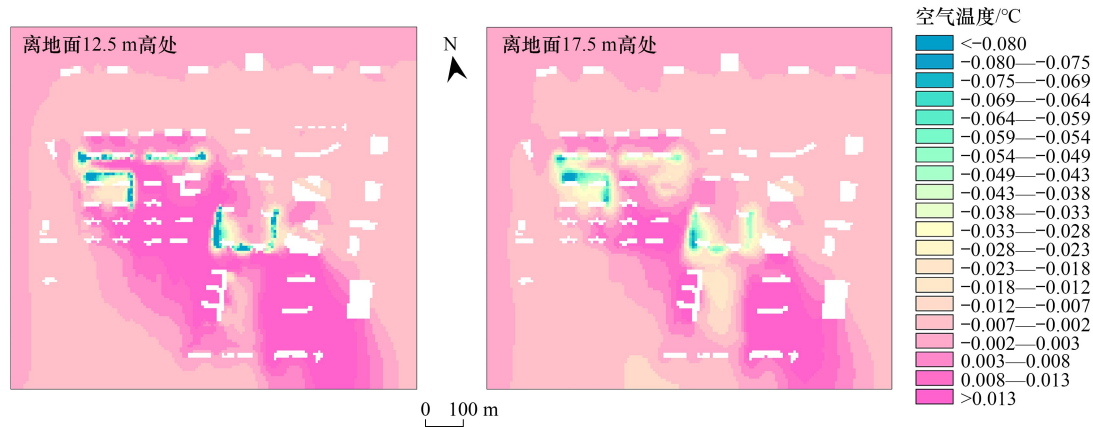


图 12 情景 5 相较于情景 4 中 12.5m、17.5m 高度的温度差值分布图

Fig.12 Air temperature reduction of grids between scenario 5 and scenario 4 at 12.5m、17.5m

2.3 局部地块屋顶绿化降温效应特征

局部地块屋顶绿化的降温强度随其与屋顶绿化边界距离的增大总体呈现指数型函数衰减的变化特征。但有所不同的是,当距离屋顶绿化较小时,降温强度的衰减速度相对较慢。此外,平行于风向时表现出更慢的衰减趋势。

为了探究屋顶绿化局部降温效应的分布和衰减特征,以情景 4 中 10:00 为例对研究区学校地块展开分析。由情景 4 的降温效应分布图(图 13)可以直观的看出,本实验中主导风向为正北(344°),屋顶绿化产生的降温影响范围有限,冷空气多集中于屋顶绿化周边,整体呈现向下风向有限度扩散的分布特征。高度越高,屋顶绿化降温影响范围越大。

进一步研究街区屋顶绿化降温强度随与绿地边界距离的变化情况:首先为了排除屋顶绿化几何尺度对降温衰减影响,本研究只对实验中绿地轮廓外部的屋顶绿化降温效应进行分析,也是国际上 Lin 等^[21]用来表征屋顶绿化降温范围的方法。因此选取建筑轮廓边缘网格(83,24)作为屋顶绿化降温衰减情况的统计起点。

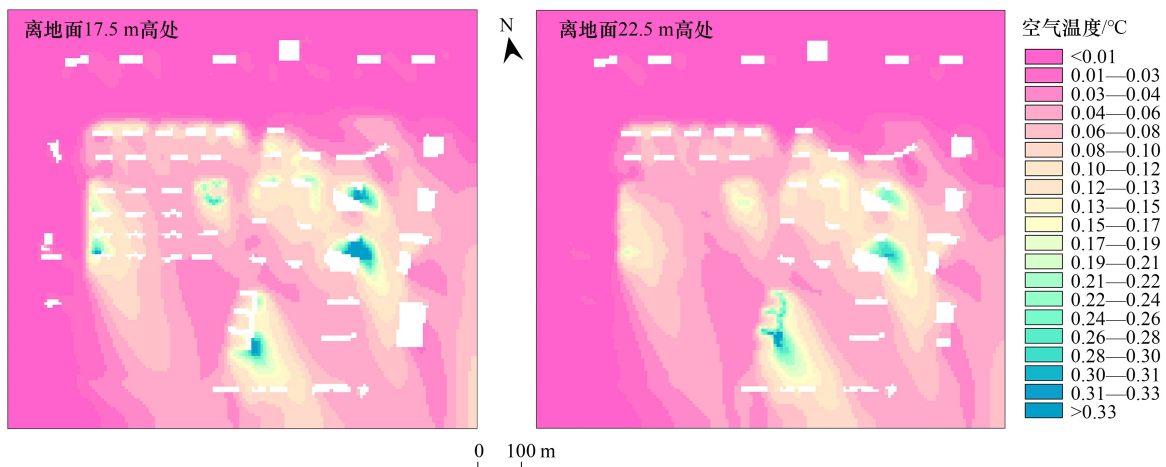


图 13 情景 4 中 10:00 时刻 17.5m 与 22.5m 高处屋顶绿化的降温效应分布

Fig.13 Spatial distribution of cooling effects of green roofs in scenario 4 at 17.5m and 22.5m

在研究区南侧分别截取学校地块内 AB 线段与 AC 线段(图 14)对应的 17.5m 与 22.5m 高度(选取较高视角便于分析风对其降温效应的影响)的网格降温强度绘制成曲线(图 15)。线段 AC 与主导风向基本垂直,线段 AB 与主导风向基本平行。此区域建筑密度较低,东侧为操场,受城市绿地等其他因素影响较弱。选择只在公共建筑和商业建筑建设屋顶绿化的情景 3 的 10:00 时刻作为分析对象,便于直接观察研究区地块屋顶绿化降温效应的衰减现象。

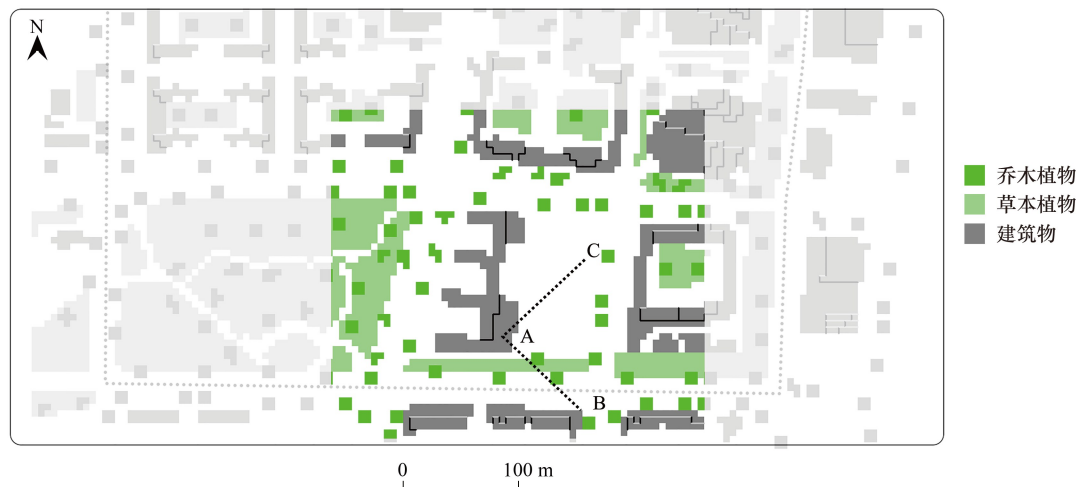


图 14 线段 AB、AC 位置示意图

Fig.14 Positions of line segments AB and AC

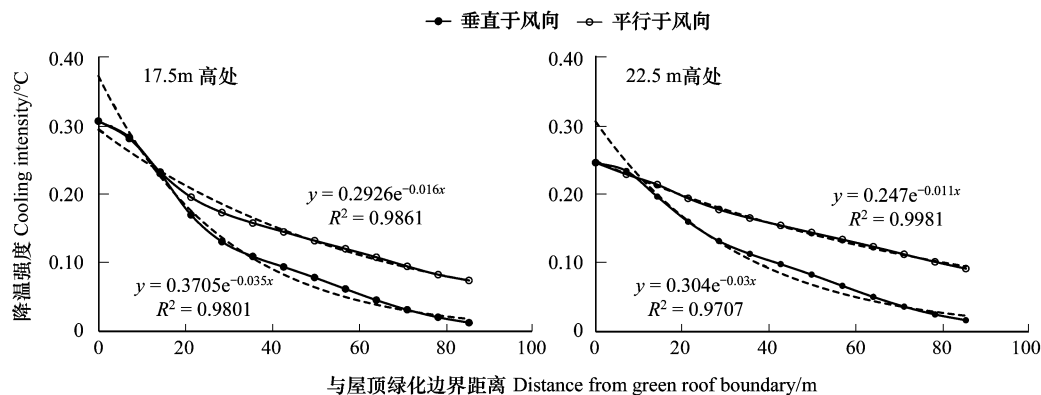


图 15 线段 AB 和 AC 处网格降温强度随与屋顶绿化边界距离增加的衰减曲线图

Fig.15 Decay curve of cooling intensity of grids along line segments AB and AC with the increase of distance from green roof boundary

由图 15 可知,总体来看,屋顶绿化的降温强度随与屋顶绿化边界距离的增加而总体呈现出指数型函数的衰减特征,风可以使屋顶绿化降温强度衰减速度变慢。在情景 3 中,当与屋顶绿化边界距离小于 7m 时,降温强度的衰减速率较慢;当与屋顶绿化边界距离大于 7m 时,降温强度随与屋顶绿化边界距离增加呈现指数型函数的下降趋势,即降温强度的衰减幅度(曲线斜率的绝对值)先增大后缓慢减小,随后趋于稳定衰减。

相对而言,在与屋顶绿化边界距离达到 14m 时,风对于屋顶绿化降温效应衰减速度的影响开始较为明显的展现。此外,当平行于风向时,屋顶绿化的降温强度向下风向衰减的速度相较于垂直于风向较慢,随着与屋顶绿化边界距离的增加,两者降温强度差值越大。例如在 22.5m 高度时,当与屋顶绿化边界距离达到 85.2m 时,垂直于风向网格的降温强度仅仅为平行于风向同距离网格的 18.77%。

2.4 不同类型屋顶绿化降温效应对比

对比情景 6、7 的实验结果(表 6、图 16)可知,以厦门市本土乔灌木植物为主体的密集型屋顶绿化在城市街区的降温强度累积值与降温影响范围均高于以佛甲草为主体植被的粗放型屋顶绿化。当屋顶绿化覆盖比例均达到 100%时,密集型屋顶绿化情景(情景 6)中研究区的降温强度累积值在 4 个时刻分别比粗放型屋顶绿化情景(情景 7)高 2105.57℃、1488.41℃、911.61℃、126.44℃,而最大降温强度为粗放型屋顶绿化的 469.23%。

表 6 情景 4、5 中城市街区降温强度累积值与最大值

Table 6 Accumulated and maximum cooling intensity of green roofs in neighborhood for scenarios 4 and 5

情景 Scenarios	研究区降温强度累积值/℃ Accumulated cooling intensity of green roofs				研究区降温强度最大值/℃(时间) Maximum cooling intensity of green roofs (Time)
	10:00	12:00	14:00	16:00	
情景 6 Scenario 6	2798.68	1500.26	791.98	874.65	0.61(10:00)
情景 7 Scenario 7	693.11	11.85	-119.63	748.21	0.13(16:00)

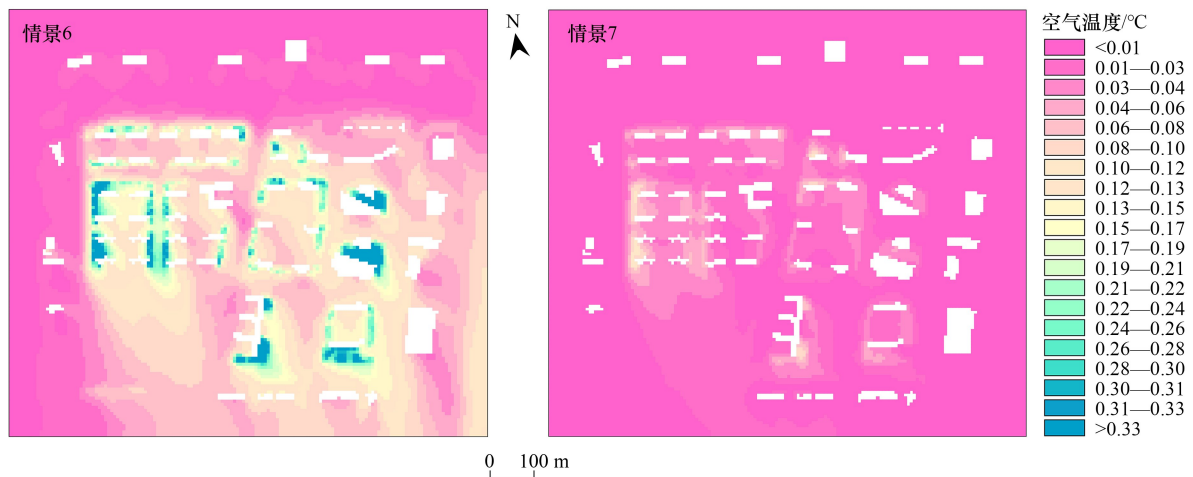


图 16 情景 6、7 中 10:00 时刻 12.5m 高处屋顶绿化的降温效应分布对比

Fig.16 Comparison of spatial Distribution of green roofs' Cooling Effects at 12.5m Height at 10:00 in Scenarios 6 and 7

3 讨论

模拟结果表明屋顶绿化可以在其周围降低空气温度约 0.1—0.6℃,这与其他模拟研究^[31,61—62]及相关综述^[32]提及的结果相当,略低于部分如 Ouldboukhitine 等^[63]在法国拉罗谢尔(La Rochelle)进行的实测研究(降低 0.8℃)。陈宇等^[66]学者也发现了类似的现象,推测这和 ENVI-met 的数据输出方式有关(一段时间的平均而非瞬时值)。

Dong 等^[20]、姜之点等^[43]均对屋顶绿化的布局或规模对其降温效应的影响做出过系统性的研究或综述。另如 Zhang 等^[25]通过 ENVI-met 观察到屋顶绿化降温效应在单座建筑屋面上随着规模增加,可能产生阈值。但从街区层面来看增加规模产生的降温效应阈值不明显。在中国的典型城市规划案例中,呈现伸展态势的住宅裙房相比于形体聚集度较高的公共和商业建筑更能街区提供广泛的降温。仅当建设位置较为相近时,规模增长带来的降温收益递减的情况才有所表现。因而相比于单一探讨布局或规模的等比增长,结合建筑功能和权属的模拟方法对于规划从业者来说是更有现实意义的。

在屋顶绿化降温效应的衰减情况上,本实验在小尺度上与 Lin 等^[21]得出了相似的结果。微小的区别在

于靠近屋顶绿化时曲线的状态,但基本可以认为两个研究中屋顶绿化通过平流输送的衰减趋势均为指数型函数的经验模型。此外,例如 Jin 等^[29],Yang 等^[64]也观察到或提出了主导风向对屋顶绿化的宏观影响机制。但少有研究者纳入与主导风的相对方向这一要素,对屋顶绿化降温衰减程度展开量化对比。因此,在实践中应合理利用屋顶绿化降温效应的扩散和衰减现象,科学把控屋顶绿化建设间隔,避免资金浪费。

小幅度的升温现象可能与植物自身的生理特性以及屋顶绿化对周围小气候的间接影响有关。当正午太阳辐射过强时,植物会避免蒸散过多水分而关闭气孔但仍进行呼吸作用,从而影响其降温能力并微弱放热,在陈佳宇等^[45]的研究以及龚修齐等^[48]的综述研究中均有提到类似现象。此外,骆高远^[65]对屋顶绿化对城市气候的影响方式进行了研究。可能的解释是除了区域风场的直接影响外,绿地上空的空气温度降低,气压升高^[66]从而引起冷空气横向挤压与热空气的抬升,在局地产生热力环流^[67],增加了局部热环境中靠近地表的高温空气在竖向上分布的不均匀性。

不同类型的屋顶绿化降温量化指标必须结合当地屋顶绿化市场才有现实意义。在实际建设中以佛甲草等草本植物为主体的粗放型屋顶绿化在厦门的市场平均造价约为 250 元/m²(包含施工与维护费用);而以灌木和小乔木为主体的密集型屋顶绿化,若按照实验中的比例平均造价约为 450 元/m²(约 4m² 种植 1 株小乔木),仅为粗放型屋顶绿化的 1.8 倍。因此,当建设屋顶绿化时预算较为宽裕时,建议适当优化屋顶绿化建设类型,以期在城市街区达到最大降温效应。

4 结论与展望

(1)屋顶绿化降温强度随建设规模的增加呈分段线性增长,街区整体视角下相同规模裙房建设屋顶绿化的降温效应要远高于公共建筑和商业建筑。(2)在热环境改善更急迫的区域建设屋顶绿化可以局部降温,但从整体上看并未获得更高的降温收益。当新建屋顶绿化位置相近时,表现出明显的降温效应增长放缓的现象。(3)屋顶绿化的降温强度随与屋顶绿化边界距离的增加而总体呈现出指数型函数的衰减特征,平行于风方向的降温强度衰减速率要明显慢于垂直于风方向,且随与屋顶绿化边界距离的增加而更加明显。(4)密集型屋顶绿化在研究区网格的平均降温强度为粗放型屋顶绿化的 4.69 倍,而建设成本仅仅为粗放型屋顶绿化的 1.8 倍。

实践中建设屋顶绿化的过程还将面临更多的限制和挑战,例如不同街区类型的策略区分和如当地政策及法律等多种相关要素的精准回应。未来屋顶绿化降温效应研究也宜从以上两个方面重点推进,探索和讨论可能出现的科学现象和潜在的优化目标,从而为改善街区和城市热环境做出积极贡献,回应推动城市健康转型的紧迫需求。

参考文献(References):

- [1] Oreskes N. Beyond the ivory tower-The scientific consensus on climate change. *Science*, 2004, 306(5702): 1686.
- [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. *大气科学学报*, 2022, 45(2): 161-166.
- [3] Ouyang Z, Sciusco P, Jiao T, Feron S, Lei C, Li F, John R, Fan P, Li X, Williams C A, Chen G, Wang C, Chen J. Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3800.
- [4] 寿亦萱,张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. *气象学报*, 2012, 70(3): 338-353.
- [5] 程杨,杨林生,李海蓉. 全球环境变化与人类健康. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 46-58.
- [6] Manoli G, Fatichi S, Schlöpfer M, Yu K L, Crowther T W, Meili N, Burlando P, Katul G G, Bou-Zeid E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 2019, 573(7772): 55.
- [7] Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T, Foley J A. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 2005, 438(7066): 310-317.
- [8] 刘正莹,杨东峰. 为健康而规划:环境健康的复杂性挑战与规划应对. *城市规划学刊*, 2016, 60(2): 104-110.
- [9] Wong N H, Tan C L, Kolokotsa D D, Takebayashi H. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(3): 166-181.
- [10] Li D, Liao W L, Rigden A J, Liu X P, Wang D G, Malyshev S, Shevliakova E. Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? *Science Advances*, 2019, 5(4).
- [11] 吝涛,曾志伟,姚霞,耿红凯,余兆武,王兰,林美霞,张浚茂,郑毅诚. 城市绿地暴露与人群健康效应研究. *生态学报*, 2023, 43(23):

- 10013-10021.
- [12] 黄雯雯, 林广思. 城市绿地社会健康的概念、效益及影响因素. 中国园林, 2023, 39(11): 77-82.
- [13] Huang J, Lu X X, Sellers J M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 82(4): 184-197.
- [14] 庄宇, 周玲娟. 上海中心城街区形态及其密度指标的量化研究. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1090-1099.
- [15] Haaland C, van den Bosch C K. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(4): 760-771.
- [16] 黄静, 尹海伟, 孔繁花, 刘宏庆, 孙涛. 屋顶绿化生态系统调节服务与政策效应研究综述. 生态学报, 2023, 43(22): 9107-9120.
- [17] 张海滨, 孙佳奇, 敖茂易, 陈舒. 建筑立体绿化对微气候改善作用实测研究. 建筑节能(中英文), 2024, 52(1): 130-139.
- [18] Sangkakool T, Techato K, Zaman R, Brudermann T. Prospects of green roofs in urban Thailand - A multi-criteria decision analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 400-410.
- [19] McConnell K, Braneon C V, Glenn E, Stamler N, Mallen E, Johnson D P, Pandya R, Abramowitz J, Fernandez G, Rosenzweig C. A quasi-experimental approach for evaluating the heat mitigation effects of green roofs in Chicago, Illinois. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 76: 103376.
- [20] Dong J, Lin M, Zuo J, Lin T, Liu J, Sun C, Luo J. Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area-A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255(120152).
- [21] Lin M, Dong J, Jones L, Liu J, Lin T, Zuo J, Ye H, Zhang G, Zhou T. Modeling green roofs' cooling effect in high-density urban areas based on law of diminishing marginal utility of the cooling efficiency: A case study of Xiamen Island, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316(128277).
- [22] Knaus M, Haase D. Green roof effects on daytime heat in a prefabricated residential neighbourhood in Berlin, Germany. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 53(126738).
- [23] Ng E, Chen L, Wang Y, Yuan C. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 2012, 47: 256-271.
- [24] Zheng X, Kong F, Yin H, Middel A, Liu H, Wang D, Sun T, Lensky I. Outdoor thermal performance of green roofs across multiple time scales: A case study in subtropical China. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 70: 102909.
- [25] Zhang G, He B, Zhu Z, Dewancker B J. Impact of Morphological Characteristics of Green Roofs on Pedestrian Cooling in Subtropical Climates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(1792).
- [26] 姜之点, 杨峰. 建筑立体绿化方式和设计高度对三维空间降温潜力的影响. 风景园林, 2023, 30(5): 75-82.
- [27] Perez M G R, Laprise M, Rey E. Fostering sustainable urban renewal at the neighborhood scale with a spatial decision support system. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 38: 440-451.
- [28] Zuo J, Ma J H, Lin T, Dong J, Lin M X, Luo J C. Quantitative valuation of green roofs' cooling effects under different urban spatial forms in high-density urban areas. *Building and Environment*, 2022, 222.
- [29] Jin C, Bai X, Luo T, Zou M. Effects of green roofs' variations on the regional thermal environment using measurements and simulations in Chongqing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 223-237.
- [30] Razzaghamanesh M, Beecham S, Salemi T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 15: 89-102.
- [31] Smith K R, Roebber P J. Green Roof Mitigation Potential for a Proxy Future Climate Scenario in Chicago, Illinois. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(3): 507-522.
- [32] Jamei E, Chau H W, Seyedmahmoudian M, Stojcevski A. Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of the Total Environment*, 2021, 791(148407).
- [33] 阳建强. 走向持续的城市更新——基于价值取向与复杂系统的理性思考. 城市规划, 2018, 42(6): 68-78.
- [34] 沈中健. 厦门市建设用地功能区的热环境分异研究. 地理科学, 2022, 42(9): 1627-1637.
- [35] 李敏, 叶昌东. 高密度城市的门槛标准及全球分布特征. 世界地理研究, 2015, 24(1): 38-45.
- [36] 董春方. 高密度建筑学. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [37] Vaz Monteiro M, Blanuša T, Verhoef A, Richardson M, Hadley P, Cameron R W F. Functional green roofs: Importance of plant choice in maximising summertime environmental cooling and substrate insulation potential. *Energy and Buildings*, 2017, 141: 56-68.
- [38] Ferrante P, La Gennusa M, Peri G, Rizzo G, Scaccianoce G. Vegetation growth parameters and leaf temperature: Experimental results from a six plots green roofs' system. *Energy*, 2016, 115: 1723-1732.
- [39] Soligo M J, Irwin P A, Williams C J, Schuyler G D. A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 77-78: 753-766.
- [40] Bruse M, Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 1998, 13(3-4): 373-384.
- [41] 史宝刚, 尹海伟, 孔繁花, 刘佳. 基于 ENVI-met 模型的南京市新街口地区垂直绿化降温效应评价. 现代城市研究, 2021(12): 125-132.
- [42] 董楠楠, 吴静. 基于 ENVI-met 模拟的屋顶绿化热环境影响. 中国城市林业, 2020, 18(4): 61-66.

- [43] 姜之点, 彭立华, 杨小山, 姚灵烨, 朱春磊. 街区尺度屋顶绿化热效应及其与城市形态结构之间的关系. 生态学报, 2018, 38(19): 7120-7134.
- [44] Tsoka S, Tsikaloudaki A, Theodosiou T. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications-A review. Sustainable Cities and Society, 2018, 43: 55-76.
- [45] 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. 生态学报, 2020, 40(4): 1445-1454.
- [46] Alizadehtazi B, Stolper J, Singh K, Montalto F A. Microclimatic implications of a large-scale green roof and high-rise redevelopment in New York City. Building and Environment, 2024, 250.
- [47] 刘凤凤, 闫伟姣, 孔繁花, 尹海伟, 班玉龙, 徐文彬. 基于气温实地调查的城市绿地降温效应研究现状与未来展望. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1387-1396.
- [48] 龚修齐, 骆天庆. 屋顶绿化缓解城市热岛效应的研究进展——2003—2018 年 Web of Science 核心期刊文献综述. 中国风景园林学会 2019 年会论文集(下册). 中国上海, 2019, 114-119.
- [49] 王一鸣, 尹海伟, 孔繁花, 苏杰. 顾及屋顶绿化的城市三维生态网络构建——以南京市中心城区为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9121-9132.
- [50] 李敏. 论城市绿地系统规划理论与方法的与时俱进. 中国园林, 2002(5): 18-21.
- [51] 周聪惠. 城市微绿地的基本属性与规划关键问题. 国际城市规划, 2022, 37(3): 105-113.
- [52] 刘滨谊, 姜允芳. 中国城市绿地系统规划评价指标体系的研究. 城市规划汇刊, 2002, 46(2): 27-29.
- [53] 董菁, 左进, 李晨, 范大林, 吴元君. 城市再生视野下高密度城区生态空间规划方法——以厦门本岛立体绿化专项规划为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4412-4423.
- [54] 邵天然, 李超骥, 曾辉. 城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例. 生态学报, 2012, 32(15): 4852-4860.
- [55] Liberalesso T, Cruz C O, Silva C M, Manso M. Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. Land Use Policy, 2020, 96.
- [56] Baptiste A K, Foley C, Smardon R. Understanding urban neighborhood differences in willingness to implement green infrastructure measures: a case study of Syracuse, NY. Landscape and Urban Planning, 2015, 136: 1-12.
- [57] 王新军, 席国安, 陈聃, 王燕, 王继开. 屋顶绿化适建性评估指标体系的构建. 北方园艺, 2016(2): 85-88.
- [58] 简兴, 鲍嵌, 王雪娟. 屋顶绿化研究现状与展望. 世界林业研究, 2021, 34(6): 14-19.
- [59] Morakinyo T E, Dahanayake K W D K, Ng E, Chow C L. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. Energy and Buildings, 2017, 145: 226-237.
- [60] 张弥, 马红云, 林卉娇, 李海俊, 王莹. 不同类型冷却屋顶方案对城市群热环境的缓解效果. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 45-57.
- [61] Abuseif M, Dupre K, Michael R N. The effect of green roof configurations including trees in a subtropical climate: A co-simulation parametric study. Journal of Cleaner Production, 2021, 317(128458).
- [62] Shen Y, Wang C, Cao L, Gao H, Wang Y. A Case Study of Simulated Cooling Effect of Roof Greening in Urban Area of Nanjing. Meteorological Monthly, 2017, 43(5): 610-619.
- [63] Ouldboukhite S E, Belarbi R, Sailor D J. Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. Applied Energy, 2014, 114: 273-282.
- [64] Yang J, Bou-Zeid E. Scale dependence of the benefits and efficiency of green and cool roofs. Landscape and Urban Planning, 2019, 185: 127-140.
- [65] 骆高远. 城市“屋顶花园”对城市气候影响方法研究. 长江流域资源与环境, 2001, 10(4): 373-379.
- [66] 李延明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究. 中国园林, 2004, 20(1): 77-80.
- [67] 郝兴宇, 蔺银鼎, 武小钢, 王娟, 梁峰, 梁娟. 城市不同绿地垂直热力效应比较. 生态学报, 2007(2): 685-692.