DOI:10.14188/j.2095-6045.20260128

文章编号:2095-6045(2026)05-0027-07

武汉都市发展区冷屋顶与绿色屋顶热环境改善效应分析

詹庆明[1,2]　陆亦潇[1,2]　林　凯[1,2]

1 武汉大学城市设计学院,湖北 武汉,430072

2 武汉大学数字城市研究中心,湖北 武汉,430072

Analysis of the Thermal Environment Improvement Effects of Cool Roofs and Green Roofs in Wuhan Urban Development Zone

ZHAN Qingming[1,2]　*LU Yixiao*[1,2]　*LIN Kai*[1,2]

1 School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 Research Center for Digital City, Wuhan University, Wuhan 430072, China

摘　要:为评估屋顶改造对城市热环境的改善效应,本文以武汉市都市发展区为研究对象,基于500 m分辨率的WRF城市模式构建对照情景与两类屋顶改造情景(冷屋顶、绿色屋顶),对北京时间2024年8月6日08:00～8月7日08:00的高温时段开展对比模拟,并通过地面观测资料对2 m气温与2 m相对湿度进行验证。结果表明:模式能够较好再现气温与湿度的日变化过程,气温一致性指标较高。在热环境响应方面,冷屋顶与绿色屋顶均可降低近地2 m气温,降温效应主要集中于白天关键时段,最低降温幅度接近0.5 ℃,夜间效应减弱并趋于收敛。空间上,白天降温信号在建成区呈现一定集聚性,体现出显著的空间异质性。机制诊断显示,冷屋顶主要通过削弱地表向大气的显热加热过程实现快速降温;绿色屋顶在抑制显热加热的同时显著增强蒸散,使地表能量更多以潜热形式释放,从而形成较为平缓且持续的降温响应。进一步采用对照情景气温第90百分位作为极端高温阈值统计发现,两类屋顶改造均能显著削减极端高温暴露面积,全天极端高温比例分别减少68.98%(冷屋顶)与58.40%(绿色屋顶),其中08:00～12:00与13:00～18:00时段削减效应最为突出。研究构建了屋顶改造热环境改善效应的评估与制图表达框架,可为城市更新背景下的高温风险治理与空间精细化调控提供参考。

关键词:冷屋顶;绿色屋顶;城市热环境;高分辨率数值模拟;极端高温暴露

中图分类号:TU119;P208;TP751

文献标志码:A

Abstract: To evaluate the effects of roof retrofitting on the urban thermal environment, this study takes the Wuhan Metropolitan Development Zone as the study area and applies the WRF urban model at a spatial resolution of 500 m to construct a control scenario and two roof-retrofitting scenarios, namely cool roofs and green roofs. Comparative simulations were conducted for the high-temperature period from 08:00 on 6 August to 08:00 on 7 August 2024 (Beijing Time), and the model results are validated using observed 2 m air temperature and 2 m relative humidity. The results show that the model reproduces the diurnal variations of temperature and humidity well, with relatively high agreement for air temperature. In terms of thermal-environment response, both cool roofs and green roofs reduce near-surface 2 m air temperature, and the cooling effect is mainly concentrated during key daytime periods, with the maximum cooling magnitude approaching 0.5 ℃, while the nighttime effect weakens and gradually converges. Spatially, daytime cooling signals exhibit a certain degree of clustering in built-up areas, indicating significant spatial heterogeneity. Mechanism analysis shows that cool roofs achieve rapid cooling mainly by weakening sensible heat transfer from the surface to the atmosphere, whereas green roofs not only suppress sensible heating but also markedly enhance evapotranspiration, causing more surface energy to be released as latent heat and thereby producing a more gradual and sustained cooling response. Further analysis using the 90th percentile of air temperature under the control scenario as the threshold for extreme heat shows that both roof-retrofitting strategies significantly reduce the area exposed to extreme high temperatures. Over the whole day, the proportion of extreme high-temperature grids decreases by 68.98% for cool

引用格式:詹庆明,陆亦潇,林凯. 武汉都市发展区冷屋顶与绿色屋顶热环境改善效应分析[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):27-33(ZHAN Qingming, LU Yixiao, LIN Kai. Analysis of the Thermal Environment Improvement Effects of Cool Roofs and Green Roofs in Wuhan Urban Development Zone[J]. Journal of Geomatics,2026,51(5):27-33)

基金项目:国家自然科学基金(52078389)。

roofs and 58.40% for green roofs, with the most pronounced reductions occurring during 08:00~12:00 and 13:00~18:00. This study establishes a framework for evaluating and mapping the effects of roof retrofitting at the urban scale, and provides a reference for heat-risk governance and fine-scale spatial regulation under urban renewal.

Key words: cool roof; green roof; urban thermal environment; high-resolution numerical simulation; extreme heat exposure

近年来,极端高温事件频发并呈现更强的持续性与强度特征,高温热害已成为影响城市公共健康、运行安全与宜居品质的重要环境风险[1]。武汉位于长江中游平原,夏季高温高湿背景显著,叠加快速城市化带来的下垫面硬化、建筑密度提高与通风受限,使热岛效应及其空间差异更加突出[2]。相比区域平均意义上的升温,城市热环境风险往往以高温暴露面积扩张的形式体现[3],并在高密度建成区、老旧城区等空间单元内表现为更强的集聚性[5]。因此,面向城市更新与精细化治理需求,亟需在可操作的空间尺度上评估降温措施的作用强度、时段差异与空间异质性,为城市热风险治理提供依据。

屋顶作为城市建成环境中可规模化改造的关键界面,其辐射收支与能量交换特征直接影响近地层热环境,是缓解城市高温的优先对象之一。既有研究表明,冷屋顶通过提高反照率、降低短波吸收,可有效削弱白天升温并降低热岛强度[6-8];绿色屋顶通过植被蒸散、遮蔽与基质蓄热等过程,能够促进能量由显热向潜热转化,从而在一定程度上实现降温并改善局地热环境[9]。随着数值模拟与城市冠层参数化的发展,WRF 等中尺度模式已被广泛用于评估城市降温措施的热环境响应与机理诊断,为多情景对比提供了可控实验平台[10]。然而,从面向城市空间治理的角度看,现有成果仍存在三方面不足:一是研究尺度常停留在城区平均或较粗分辨率网格,难以支撑精细化制图表达与优先实施区识别;二是对措施效应的描述多集中于平均降温,对“极端高温暴露”的削减效应量化不足,难以直接对接风险治理目标;三是对不同措施在日内关键时段的响应差异与空间格局缺乏一致口径的对比表达,影响规划实施的可解释性与可复现性。

基于上述问题,本文以武汉都市发展区为研究对象,构建 500 m 格网尺度的情景模拟与差分评估框架,重点对比冷屋顶与绿色屋顶两类屋顶改造对近地层热环境的调控效应。研究内容包括:(1)在对照情景基础上,分析冷屋顶与绿色屋顶对 2 m 气温日变化过程的影响及其昼夜差异;(2)在 500 m 格网尺度刻画分时段降温效应的空间格局与异质性;(3)结合显热通量与潜热通量的时空变化,解释不同屋顶策略的能量分配机制及其与降温响应的对应关系;(4)量化两类策略对极端高温暴露面积的削减效应。本文旨在为城市更新背景下的屋顶改造策略选择提供可复现的空间化证据,并为武汉及空间形态与气候背景相近城市的高温风险治理与韧性发展提供参考。

1 研究区域和数据

武汉都市发展区是《武汉市城市总体规划(2010—2020 年)》划定的重点发展区域,基本以外环高速公路附近的乡镇行政边界为界,总面积约 3 261 km^2,约占武汉市行政区域面积的 37%。该区域集中了武汉市主要建成区与人口活动空间,是城市功能高度集聚的核心承载区,也是城市热环境问题较为突出的区域之一。基于其在城市更新与环境调控中的重要地位,本文选取武汉都市发展区作为研究区域,以更具针对性地刻画城市热环境空间特征并评估调控策略的潜在效应(见图 1)。

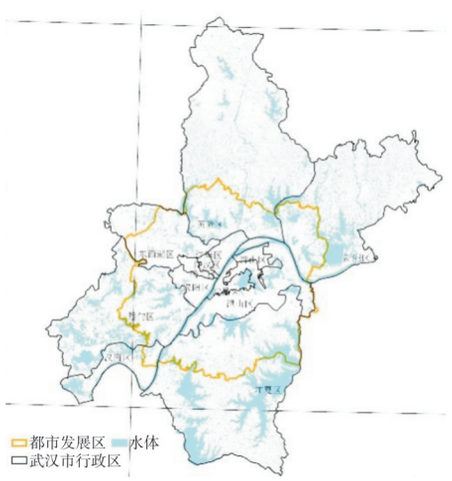


图 1 武汉都市发展区区位图

Fig. 1 Location Map of Wuhan Urban Development Zone

WRF 模式初始场与侧边界条件采用美国国家环境预报中心(NCEP)FNL(Final Analysis)再分析资料,空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 6 h,包含温度、湿度、风场等常规气象要素及地表特征参数,用于驱动区域气象模拟[11-13]。

为评估模拟对极端高温过程的再现能力,本文采用地面观测资料对 2 m 气温($T2$)与 2 m 相对湿度(RH2)进行有效性验证。观测数据包括:CMA 国家气象数据中心地面观测站点资料,以及用于刻画城市内部局地热湿差异的自动气象站观测数据。验证时段与情景模拟时段严格对齐,并按北京时间

(UTC+8)统一时间基准。

为提升城市热环境模拟的空间精细度,本文在城市下垫面与形态参数方面引入本地化数据。城市类型编码与空间异质性表达以LCZ分类为基础,并据类型映射关系转换为BEP/BEM所需城市类型编码;土地利用数据用于提取建成区并替换WRF默认静态地理数据,进而计算城市二维覆盖率参数;建筑数据集用于城市冠层模型所需形态信息的统计与制备,以支撑500 m格网尺度的空间差异表达。

2　研究方法

2.1　中尺度数值模拟

本文采用WRF-BEP/BEM城市参数化方案开展高温过程模拟[14-23],并在内层500 m网格上开展情景对比分析。为突出屋顶改造对近地层热环境的影响机理与改善效应,设置对照情景CTRL及两类屋顶改造情景:冷屋顶情景(CR)与绿色屋顶情景(GR)。对照情景为本研究的基准空白情景,是所有改造效应评估的统一参照基线。该情景完全采用武汉都市发展区本地化的真实下垫面参数构建。两类屋顶改造情景均假定研究区内建筑屋顶实现100%全覆盖改造,该理想化设定核心用于两类技术路径在同等边界条件下的热环境改善理论上限与物理机制差异的精准识别,排除实施规模、空间布局等混杂因素对两类措施效应对比的干扰;除屋顶核心参数外,其余地表输入数据、模式物理方案与配置参数均与对照情景保持完全一致,确保情景间的唯一变量与结果可比性。

数值模拟采用三重嵌套网格。外层网格分辨率4.5 km用于表征区域尺度环流背景,中层网格分辨率1.5 km覆盖武汉都市圈,内层最细网格分辨率为0.5 km,聚焦武汉都市发展区,是本文制图与统计分析的基本空间单元(见图2)。垂直方向采用44层η坐标,以增强对城市边界层热湿结构的解析能力。

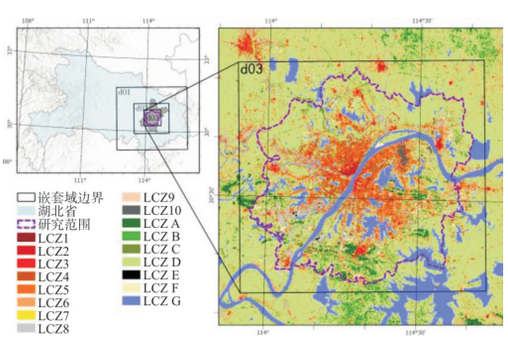


图2　WRF模拟区域示意图

Fig. 2　Schematic Diagram of the WRF Simulation Domain

为刻画极端高温条件下屋顶改造的热环境改善效应,本文以北京时间2024年8月6日08:00至2024年8月7日08:00作为分析期,对CTRL、CR与GR三类情景的模式输出进行对比与机制诊断。为降低初始场对城市边界层过程的影响,模拟设置预热(spin-up),预热期输出不纳入统计与制图分析。

两类屋顶改造的关键参数设置如下:

(1)绿色屋顶:植被类型设为草被,叶面积指数(LAI)为2.5,基质层厚度为0.12 m,初始土壤含水率为25%。

(2)冷屋顶:屋顶表面反照率为0.8,发射率为0.90,涂层热导率为0.2 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$。

2.2　模式有效性验证

模式有效性验证在最内层嵌套域进行。从模式输出中提取与观测站点位置对应的模拟序列,站点-网格匹配采用最近邻网格方式;观测数据进行缺测剔除与异常值筛查后,与模拟结果按小时尺度对齐。

性能评估采用均方根误差(RMSE)、平均偏差(MBE)、一致性指数(IOA)与相关系数(R^2)。其中RMSE反映总体误差幅度,MBE表征系统性偏差方向与大小,IOA刻画模拟与观测的一致程度,R^2反映时序变化相关性。

2.3　热环境改善效应指标与统计口径

为从平均状态和极端风险两个层面刻画屋顶改造的热环境改善效应,本文在500 m格网尺度上构建评价指标体系,并统一采用“情景-对照”差分口径,即以各改造情景相对于CTRL情景的变化量表征屋顶改造效应。

(1)近地气温差值。以2 m气温($T2$)作为基状态变量,定义降温效应为:

$$\Delta T2 = T2_{SCEN} - T2_{CTRL} \tag{1}$$

式中,$T2_{SCEN}$表示改造情景下的2 m气温;$T2_{CTRL}$表示对照情景下的2 m气温。当$\Delta T2<0$时,表示屋顶改造产生降温效应。本文利用区域平均差值曲线来分析不同情景下近地气温的日变化响应,并通过500 m格网差场揭示降温效应的空间异质性。

(2)极端高温比例减少率。为量化屋顶改造对高温“削峰/削尾”的效应,本文引入基于CTRL情景的分位数阈值判别。以CTRL情景下研究时段$T2$样本分布的第90百分位作为极端高温阈值T_{90}。当格网满足$T2$大于等于该阈值时判定为极端高温状态,并统计极端高温格网比例。

进一步统计各时段内极端高温格网占全部格网的比例,并计算相对于CTRL情景的减少率,以衡量

不同屋顶改造策略对极端高温暴露面积的削减效果。该指标能够从风险暴露角度补充平均降温分析，为识别高温治理优先时段和重点区域提供依据。

(3)显热通量和潜热通量差值。为揭示屋顶改造影响近地层热环境的物理机制，本文引入显热通量和潜热通量作为地表能量分配的诊断指标，并分别定义其相对于CTRL情景的差值为：

$$\Delta HFX = HFX_{SCEN} - HFX_{CTRL} \quad (2)$$

$$\Delta LH = LH_{SCEN} - LH_{CTRL} \quad (3)$$

式中，HFX_{CTRL}和LH_{CTRL}分别表示对照情景下的地表显热通量和潜热通量；HFX_{SCEN}和LH_{SCEN}分别表示改造情景下对应通量。当$\Delta HFX<0$时，表示地表向大气传输的显热减弱；当$\Delta LH>0$时，表示以蒸发或蒸腾形式释放的潜热增强。本文分别计算显热通量差值和潜热通量差值的区域平均日变化曲线，用于分析不同屋顶情景在日内各时段对地表能量分配的调节过程。

3 结果与分析

3.1 模式验证结果

为保证情景对比的可信度，首先对CTRL情景下近地2 m气温与2 m相对湿度的模拟结果进行验证(见图3)。整体上，模式能够较好再现分析期内气温的日变化过程及高温峰值出现时段。$T2$验证统计指标为RMSE=1.46 ℃、MBE=0.77 ℃、IOA=0.97、R^2=0.92，表明模拟与观测具有较高一致性。RH2同样能够再现日变化特征，RMSE=5.43%、MBE=−4.13%、IOA=0.97、R^2=0.96，但存在一定偏干倾向。总体而言，该组模拟结果满足后续屋顶改造情景差分分析与机理诊断需要；同时本文主要采用“情景—对照”差分口径，背景偏差对差分结果的影响可在一定程度上抵消。

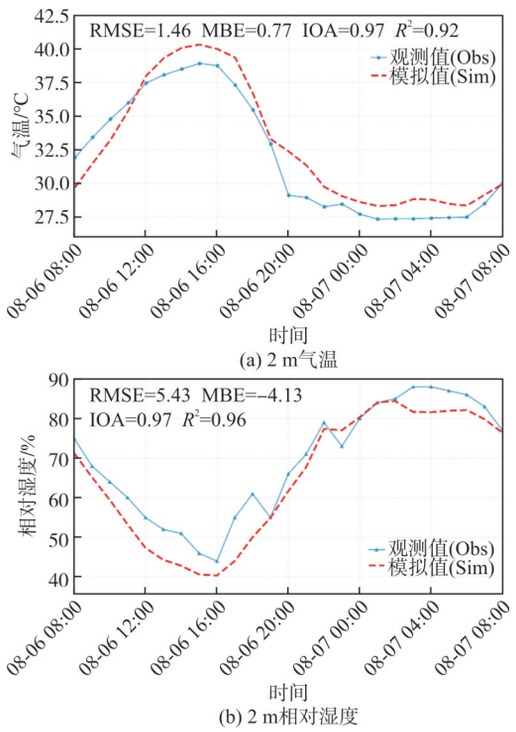


图3 2 m气温与2 m相对湿度模拟与观测对比

Fig. 3 Comparison of Simulated and Observed 2 m Air Temperature and 2 m Relative Humidity

3.2 气温日变化响应及昼夜差异

冷屋顶(CR)与绿色屋顶(GR)对近地层气温的影响呈现显著日内差异(见图4)。在上午至午后升温阶段，两类策略均表现为稳定的降温效应，差值曲线整体为负，说明屋顶改造能够有效削弱白天增温过程。降温效应在白天关键时段达到最强，CR与GR的最大降温幅度接近0.5 ℃，且CR在多数时段的降温幅度略强于GR。需要注意的是，傍晚前后差值曲线出现短时正偏，即$\Delta T2>0$，随后迅速转为更强的负值并进入夜间衰减阶段。这表明屋顶改造对近地层温度的影响不仅取决于瞬时辐射条件，还与傍晚过渡期的边界层结构调整及下垫面热储释热过程有关。进入后半夜至清晨，$\Delta T2$逐渐趋近于0，说明夜间短波消失、湍流交换减弱后，屋顶参数变化对$T2$的直接调制能力明显降低，降温效应整体收敛。

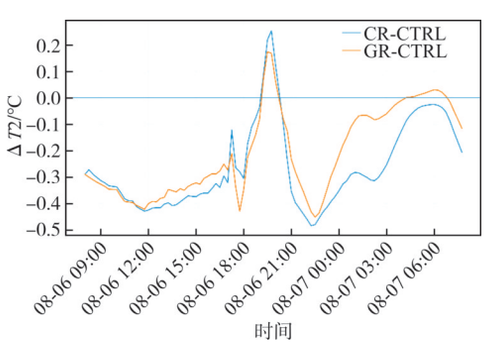


图4 冷屋顶与绿色屋顶情景下2 m气温差值的日变化

Fig. 4 Diurnal Variation of 2 m Air Temperature Differences Under Cool Roof and Green Roof Scenarios

3.3 分时段降温效应的空间格局

为了揭示降温效应的空间异质性，进一步在500 m格网尺度绘制不同时段的$\Delta T2$差场(见图5)。总体上，CR与GR在白天(08:00～12:00、13:00～18:00)均表现出更大范围的负温差分布，降温区域在空间上呈现一定集聚性；相对而言，夜间至清晨(01:00～08:00)差场整体偏弱、分布更为零散，表明降温效应具有明显的“白天强、夜间弱”特征。

从策略差异看，CR在白天时段的降温信号更集

中、强度更突出,表现为较明确的“降温高值斑块”;GR的降温分布相对更连续,在部分区域呈现“广域但中等强度”的特征。两者在空间格局上的差异提示其作用路径不同:CR更偏向通过改变辐射吸收快速抑制白天增温,GR则更多通过调节地表能量分配形成较为平缓的降温响应。

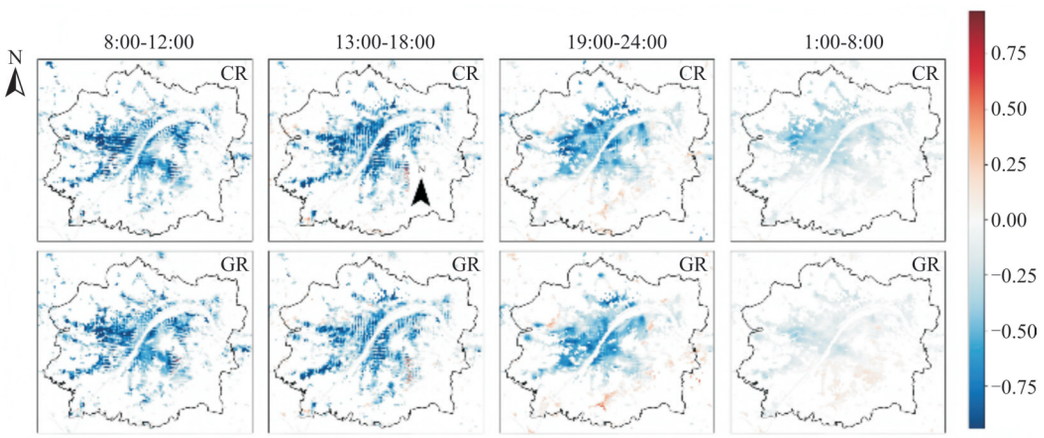


图5　不同时段冷屋顶与绿色屋顶对2 m气温差值的影响空间分布

Fig. 5　Spatial Patterns of 2 m Air Temperature Differences Under Cool Roof and Green Roof Scenarios During Different Periods

3.4　降温效应的物理机制分析

3.4.1　日内通量变化的过程验证

为了解释温度响应差异,本文进一步分析地表显热通量(HFX)与潜热通量(LH)的差值日变化(见图6、图7)。显热通量方面,CR与GR在白天均表现出显著的ΔHFX＜0,且负值幅度在中午前后达到最大:CR最低约－50 W·m^{-2}、GR最低约－46 W·m^{-2}。这表明两类屋顶改造均能显著削弱地表向大气的显热加热过程,是白天降温效应形成的直接原因。其中CR在白天的显热削弱更强,与其整体更大的降温幅度相一致。

潜热通量方面,GR在上午至中午表现出显著的ΔLH＞0,峰值约＋26 W·m^{-2},说明绿色屋顶通过蒸散增强将部分可用能量转化为潜热输出,促使能量由显热通道向潜热通道转移;而CR的ΔLH整体接近0,仅在个别时段出现弱正偏,表明冷屋顶主要通过“辐射吸收减少—显热释放抑制”的路径起作用。进入夜间后,两类策略的ΔHFX与ΔLH幅度均明显减弱并趋近于0,与夜间Δ$T2$收敛的特征一致,反映屋顶参数变化对通量的直接调制主要发生在白天辐射驱动与强湍流交换阶段。

3.4.2　通量变化的空间分析

地表通量调控的空间分布,与降温效应的空间异质性高度匹配,进一步印证了两类策略的核心作用机制。午后时段(13:00～18:00)冷屋顶与绿色屋顶情景下显热通量与潜热通量差值的空间分布分别如图8和图9所示。

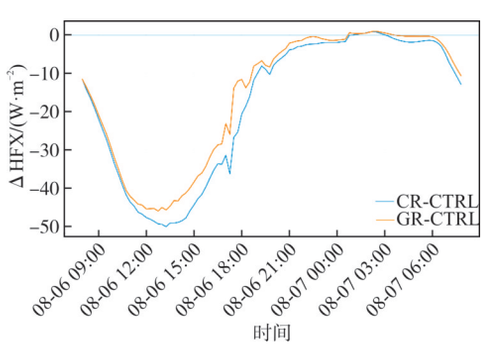


图6　冷屋顶与绿色屋顶情景下显热通量差值的日变化

Fig. 6　Diurnal Variation of Sensible Heat Flux Differences Under Cool Roof and Green Roof Scenarios

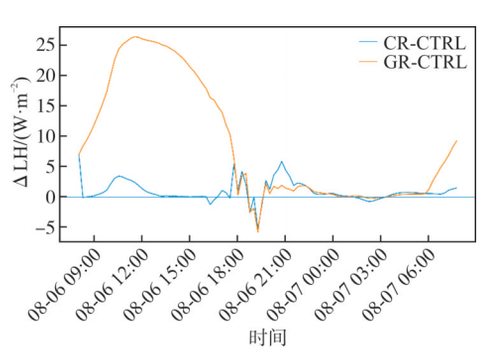


图7　冷屋顶与绿色屋顶情景下潜热通量差值的日变化

Fig. 7　Diurnal Variation of Latent Heat Flux Differences Under Cool Roof and Green Roof Scenarios

CR情景下,显热通量削弱的高值区与降温高值斑块高度重合,均集中于跨江核心建成区与高密度建设片区,同时全域潜热通量无显著空间变化,充分说明其降温效应完全依托于对地表显热加热过程的直接抑制,呈现“高强度、斑块化”的降温特征。

GR 情景下，显热通量削弱的空间分布更为平缓，同时在主要建成区形成大范围连续的潜热通量增强区，与“广域、中强度”的连续降温格局完全对应，证实其降温效应来源于显热抑制与蒸散增强的协同调控，地表能量重分配的作用特征更为突出。

综合显热与潜热通量差场可见，CR 与 GR 均能够改善城市热环境，但其作用机制存在明显差异：CR 主要通过显热通量的大幅削弱实现快速降温，降温高值区与显热削弱高值区在空间上具有较强一致性；GR 则在抑制显热的同时显著增强潜热通量，表现出更明显的能量重分配特征。通量差场与气温差场在空间上的对应关系，为不同屋顶改造策略影响近地层热环境的物理机制提供了直观的空间证据。

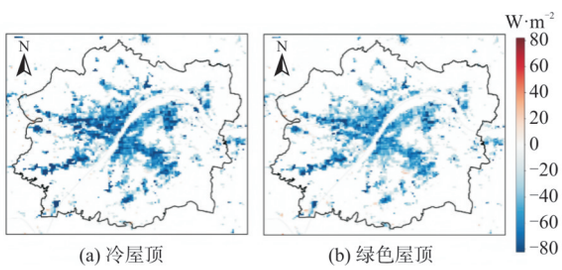


图 8　午后时段（13:00~18:00）冷屋顶与绿色屋顶情景显热通量差值的空间分布

Fig. 8 Spatial Distribution of Sensible Heat Flux Differences Under Cool Roof and Green Roof Scenarios During 13:00～18:00

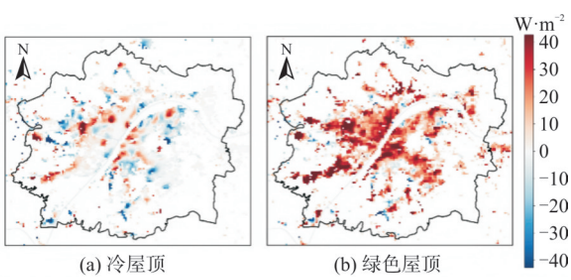


图 9　午后时段（13:00~18:00）冷屋顶（a）与绿色屋顶（b）情景潜热通量差值的空间分布

Fig. 9 Spatial Distribution of Latent Heat Flux Differences Under Cool Roof and Green Roof Scenarios During 13:00～18:00

3.5　极端高温频次削减效应评估

在平均降温之外，城市热环境治理更关注极端高温暴露的削峰效应。本文以 CTRL 情景 *T*2 的第 90 百分位确定极端高温阈值，以 500 m 格网为单元统计不同时段满足 *T*2 大于等于该阈值的格网比例，并比较 CR 与 GR 对极端暴露的削减效应（见表 1）。该阈值表示对照情景中处于温度分布上尾部的高温格网水平，因而更适用于相对意义上的极端高温识别，可用于比较不同改造情景对高温暴露上尾部范围的削减效果。由于该方法采用统一基准情景阈值，能够保证不同屋顶改造情景之间具有可比性，但其结果更适用于相对暴露削减分析，而非绝对气候阈值意义上的极端判定。

结果表明，两类屋顶改造均能显著降低极端高温格网占比，且削减强度具有明显时段差异。夜间至清晨（01:00～08:00）极端高温比例减少率分别为 CR 情景 74.44% 与 GR 情景 47.83%；上午（08:00～12:00）削减效应达到全日高值，分别为 CR 情景 75.46% 与 GR 情景 76.23%；午后高温最强阶段（13:00～18:00）仍保持较高削减水平，分别为 68.02% 与 62.53%；傍晚（19:00～24:00）削减效应相对回落，分别为 CR 情景 53.06% 与 GR 情景 51.42%。从全日尺度看，CR 与 GR 的极端高温比例减少率分别为 68.98% 与 58.40%。总体而言，CR 在多数时段的削峰幅度更高，而 GR 在上午时段达到与 CR 相当甚至略高的削减效应。该指标从暴露面积角度补充了平均温度变化分析，可为面向格网单元的优先实施时段与重点区域识别提供量化依据。

表 1　不同时段平均 2 m 气温及极端高温比例减少率

Tab. 1 Average 2 m Temperature in Different Time Periods and the Reduction Rate of Extreme High Temperature Proportion

情景	时间段	平均 2 m 气温/℃	极端高温比例减少/%
CR	01:00～08:00	29.67	74.44
GR		29.77	47.83
CR	08:00～12:00	34.74	75.46
GR		34.74	76.23
CR	13:00～18:00	38.91	68.02
GR		38.92	62.53
CR	19:00～24:00	32.19	53.06
GR		32.22	51.42
CR	24 h	33.55	68.98
GR		33.61	58.40

注：极端高温阈值取 CTRL 情景分析期 2 m 气温样本分布的第 90 百分位，用于表征对照情景温度分布上尾部的高温暴露水平。

4　结束语

本文以武汉都市发展区为研究对象，基于 500 m 格网尺度的 WRF-BEP/BEM 模拟，对比评估了冷屋顶与绿色屋顶对近地层热环境的调控效应，并从显热通量与潜热通量角度解释其物理机制。结果表明：

（1）冷屋顶与绿色屋顶均能有效降低近地 2 m 气温，高温关键时段降温更为显著，夜间效应相对减弱；

（2）两类策略的作用路径存在差异：冷屋顶主要

通过削弱显热通量快速抑制白天增温,绿色屋顶则通过增强潜热通量并重分配地表能量实现较为平缓、连续的降温;

(3)冷屋顶与绿色屋顶均能显著削减极端高温暴露面积,24 h极端高温比例分别减少68.98%与58.40%,其中白天(08:00~18:00)削减效应最为突出。

研究在城市尺度上形成了武汉市屋顶改造效应评估与制图表达框架,可为典型高温过程下城市更新背景中的高温风险治理与空间精细化调控提供参考:在高密度建成区与热岛强度较高区域,可优先采用冷屋顶以获得快速削峰效果;在具备绿化条件的片区,可布局绿色屋顶以增强潜热调节并提升热环境改善的持续性。需要说明的是,本文采用屋顶全覆盖改造情景,所得结果更适用于表征不同措施的理论改善潜力;在实际推广中,改造效果仍会受到建筑结构条件、屋顶可达性、维护成本及适宜性等因素制约。上述结论可为武汉及发展阶段与空间形态相近城市的韧性规划、存量更新与高温适应性建设提供参考。

参 考 文 献

[1] 华文剑, 冯慧婷, 崔亚朱, 等. 2022年夏季长江流域极端高温的研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2025, 40(5): 456-472

[2] 李祁琪, 李淼, 刘慧民. 城市热岛效应时空演变模式挖掘方法对比: 以武汉都市发展区为例[J]. 应用生态学报, 2026, 37(3): 671-682

[3] Klein T, Anderegg W R L. A Vast Increase in Heat Exposure in the 21st Century Is Driven by Global Warming and Urban Population Growth[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 73: 103098

[4] Liu Dan, Zhou Rui, Ma Qun, et al. Spatio-Temporal Patterns and Population Exposure Risks of Urban Heat Island in Megacity Shanghai, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 108: 105500

[5] 黄焕, 乔亮亮, 林建伟, 等. 缓解城市热岛效应的路径及实践: 以武汉城市降温行动计划为例[J]. 城市规划学刊, 2025(S2): 69-74

[6] 聂危萧, 吴婕, 李晓晖, 等. 面向可持续城市降温的广州国土空间规划导控体系研究[J]. 规划师, 2023, 39(7): 40-47

[7] Chaumont M, Filaine F, Parison S, et al. Impact of Roof Watering on Urban Cooling During Heat Waves[J]. Energy and Buildings, 2025, 337: 115693

[8] Aggarwal C, Molleti S. State-of-the-Art Review: Effects of Using Cool Building Cladding Materials on Roofs[J]. Buildings, 2024, 14(8): 2257

[9] Shafique M, Kim R, Rafiq M. Green Roof Benefits, Opportunities and Challenges— A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 757-773

[10] Joshi M Y, Rodler A, Musy M, et al. Influence of Urban Morphology on Potential of Green Roofs in Regulating Local Microclimate: A Case Study of Liège, Belgium[J]. Urban Climate, 2024, 58: 102144

[11] 武汉市人民政府. 武汉市城市总体规划(2010—2020年)[EB/OL]. (2011-11-30)[2026-03-11]. https://zrzyhgh.wuhan.gov.cn/zwgk_18/fdzdgk/ghjh/zzqgh/202001/t20200107_602858.shtml

[12] National Centers for Environmental Prediction. NCEP FNL Operational Global Final Analysis [EB/OL]. (2024-07-18)[2026-02-10]. https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/

[13] 国家气象信息中心. 中国地面气象站逐小时观测资料[EB/OL]. (2024-08-11)[2026-03-11]. http://data.cma.cn/

[14] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4 [R]. Boulder: NCAR, 2019, doi: 10.5065/1dfh-6p97

[15] 周晶, 刘蕾, 霍飞, 等. 不同下垫面数据和城市冠层参数化方案对江苏气温影响的个例分析[J]. 气象科学, 2018, 38(3):342-350

[16] 成雅田, 吴昌广. 基于不同下垫面数据和城市冠层参数化方案的城市气候数值模拟对比研究——以武汉都市发展区为例[C]. 中国第二届风景园林与小气候国际研讨会, 重庆, 2020

[17] 伍见军, 王咏薇, 朱彬, 等. WRF模式中城市冠层参数化方案在重庆气象环境模拟中的性能比较[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(12):1 627-1 634

[18] 马敏劲, 杨屹, 苏雨萌. 基于兰州市城市冠层模式的一次降水过程的数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(5):650-658

[19] 陆咏晴, 严岩, 丁丁, 等. 我国极端降水变化趋势及其对城市排水压力的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(5):1 661-1 667

[20] 郑丽娜. 近55 a中国西北地区夏季降水的时空演变特征[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(2):50-59

[21] 孔锋, 王一飞, 方建, 等. 中国夏季极端降水空间格局及其对城市化的响应(1961—2010)[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5):996-1 010

[22] 刘翔, 路亚奇, 韩晶, 等. 陇东地区1978—2018年夏季降水变化特征分析[J]. 河南科学,2020,38(5):810-818

[23] 张仲杰, 康景芬, 王士新, 等. 西北地区东部降水异常的大气环流及水汽特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1):87-92

修回日期:2026-05-08

第一作者:詹庆明,教授,现主要从事城市治理与城市热环境研究。E-mail:qmzhan@whu.edu.cn