氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

不同冷却屋顶对城市街区热环境的影响模拟

金玉芝 王咏薇 程迪

Simulation of the Impacts of Different Cooling Roofs on the Thermal Environment of Urban Blocks

JIN Yuzhi WANG Yongwei CHENG Di

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20029

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

1960 ~ 2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势

Linear Trends in Occurrence of High Temperature and Heat Waves in China for the 19602018 Period: Method and Analysis Results

气候与环境研究. 2020, 25(3): 225 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19134

成都地区城市化对气候影响的模拟研究

Simulation Study of Urbanization Impact on Climate in Chengdu

气候与环境研究. 2020, 25(3): 240 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19182

不同行星边界层参数化方案对新疆降水模拟的影响研究

Impact of Different Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes in the Regional Climate Model on Precipitation Simulation for Xinjiang

气候与环境研究. 2020, 25(2): 211 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19082

不同陆地生态系统碳通量对模型模拟全球$_2$浓度的影响

Effect of Terrestrial Ecosystem Carbon Fluxes on Simulating Global CO_2 Concentration Using the GEOS-Chem Model

气候与环境研究. 2019, 24(5): 552 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18060

基于大涡模拟的小区气候态精细化风环境模拟试验

Fine-Scale Structures of the Climatic Wind Environment within a Neighborhood Based on Large-Eddy Simulation

气候与环境研究. 2020, 25(2): 139 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18130

上海市土地利用资料优化方案对WRF模式模拟高温过程的影响

Influence of Land Use Data Optimization Schemes on WRF Model Simulations of High Temperature Processes in Shanghai

气候与环境研究. 2020, 25(4): 443 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20013

关注微信公众号，获得更多资讯信息

金玉芝, 王咏薇, 程迪. 2021. 不同冷却屋顶对城市街区热环境的影响模拟 [J]. 气候与环境研究, 26(1): 91−105. JIN Yuzhi, WANG Yongwei, CHENG Di. 2021. Simulation of the Impacts of Different Cooling Roofs on the Thermal Environment of Urban Blocks [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (1): 91−105. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20029

不同冷却屋顶对城市街区热环境的影响模拟

金玉芝 [1,2] 王咏薇 [1,2] 程迪 [1]

1 南京信息工程大学耶鲁—南京信息工程大学大气环境中心，南京 210044
2 南京信息工程大学大气物理学院，南京 210044

摘 要 当前采用何种冷却屋顶材料缓解城市化带来的高热灾害是城市气象领域的热点问题。本文基于城镇能量平衡模式（TEB），分析了 4 种不同材料的冷却屋顶，包括转化效率为 14% 的太阳能板（覆盖面积分别占屋顶面积的 100% 及 50%）和 3 种高反照率材料：铝箔沥青膜、白色 TPO 膜、科罗拉多大学新研发的玻璃聚合物混合超材料，在 2017 年夏季高温热浪时间段（7 月 16～30 日）对建筑物街区屋顶表面温度及辐射热量产生的影响。结果表明在持续高温的天气背景下，在屋顶铺设超材料和 100% 覆盖面积的太阳能板降温效果最好，屋顶表面温度白天平均分别可降低 18.59 K 和 19.58 K，铝箔沥青膜效果次之，平均降低 13.47 K，50% 覆盖面积的太阳能板 TPO 膜再次，平均降低 9.7 K 和 5.4 K，夜间也具有 1.08～4.53 K 的降温。铺设冷却屋顶材料可以直接或间接地减少冷却能源需求，铺设 100% 太阳能板以及超材料屋顶可以使建筑物冷却能耗降到最低，每平方米分别至多可降低 2.1 W m^{-2} 和 2.16 W m^{-2}，使用铝箔沥青膜效果次之，至多降低 1.47 W m^{-2}，50% 铺设面积的太阳能屋顶及 TPO 膜再次。其中所选太阳能光伏板每日可额外产生最多 1.84 kW h 的电量，模拟的两周内产生电量可全部抵消同期空调制冷能耗。

关键词 冷却屋顶 城镇能量平衡模型（TEB） 高温热浪 冷却能源需求
文章编号 1006-9585(2021)01-0091-15 **中图分类号** P404 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20029

Simulation of the Impacts of Different Cooling Roofs on the Thermal Environment of Urban Blocks

JIN Yuzhi[1,2], WANG Yongwei[1,2], and CHENG Di[1]

1 *Yale−NUIST Center on Atmospheric Environment*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *School of Atmospheric Physics*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract The use of cooling roofing materials to alleviate the effects of urban heat islands and the energy crises brought by urbanization has always been a critical research issue in the field of urban meteorology. This paper used offline town energy balance mode (TEB) to analyze roof surface temperature and the radiant heat of urban blocks during the two-week-long heatwave during 16−30 July 2017. The study involved solar panels with a conversion efficiency of 14% and three kinds of high albedo roof materials: Aluminum foil asphalt membrane, white TPO membrane, and randomized glass-polymer hybrid metamaterial from the University of Colorado. The results show that under continuous high temperature,

收稿日期 2020-03-18；**网络预出版日期** 2020-08-13
作者简介 金玉芝，女，1997 年出生，硕士研究生，主要从事城市气象与大气环境研究。E-mail: jinyz0823@163.com
通讯作者 王咏薇，E-mail: wyw@nuist.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41675016
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41675016)

the super-material roof treatment and the 100% coverage of roof area with solar panels treatment had the best cooling effect, reducing daytime roof surface temperature by 18.59 K and 19.58 K, respectively. The aluminum foil asphalt membrane's effect takes second place, reducing temperatures by 13.47 K on average. The TPO film and covering 50% of the roof area with solar panels had the worst performance, it also has a nighttime cooling effect of 1.08–4.53 K. The setting of cooling roofing materials can reduce cooling energy demand both directly and indirectly. Covering 100% of the roof area with solar panels and using super-material roofs can minimize buildings' cooling energy consumption, and can reduce 2.1 W m^{-2} and 2.16 W m^{-2} per square meter, respectively. Aluminum foil asphalt film takes second place, with a reduction of 1.47 W m^{-2}. TPO film and 50% solar panel coverage had the smallest effect. The selected solar photovoltaic panels can generate an additional 1.84 kW h of electricity per day, and the electricity over the simulated two weeks can offset all the energy consumption of air conditioning during the same period.

Keywords Cooling roof, Town Energy Balance model (TEB), Heat wave, Cooling energy demand

1 引言

近年全球城市化进程一直呈上升趋势，尤其是亚非地区，预计到 2050 年全球将有 66% 的人口居住在城市（United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2012），迅速的城市化导致城市的温度比农村更高（任国玉等, 2005; Santamouris et al., 2018）。严重的城市热岛现象加上类似高温热浪的极端天气事件高发，使得天气酷热，引发各种次生灾害影响人们正常生活（寿亦萱和张大林, 2012; 周梦子等, 2017, 孙永等, 2019），同时也对建筑能源消耗及室内外热舒适条件产生重大影响（彭少麟等, 2005; Sakka et al., 2012; Gunawardena et al., 2017; 王咏薇等, 2018）。有研究表明，夏季气温每升高一度，电量需求峰值就会增加 0.45%～4.6%（Santamouris, 2015）。

为了尽可能地降低城市环境的高温以及热岛对能源消耗产生的巨大影响，科学家们已经开展了一系列研究（谈建国和黄家鑫, 2004; Santamouris et al., 2011; Synnefa et al., 2012; Akbari et al., 2016）。研究表明在现有城市的基础上采取一些改造措施，如：在城市深色的表面使用高反射率材料（Doulos et al., 2004; Cheng et al., 2005; 王豫等, 2019）；在屋顶铺设环保的太阳能板（Akbari et al., 2005; Masson et al., 2014; Salamanca et al., 2016）；或种植绿色植被（Sharma et al., 2016; 周晓宇等, 2019），均有助于减少大气释放的感热，减缓城市热岛并能有效节约冷却能源需求（Santamouris, 2014），但绿色植被屋顶需要定期维护，成本较高（Sun et al., 2016），一般情况下可实施性较低，因此相较而言高反照率屋顶和太阳能屋顶较易于实现。还有不少学者近年来致力研发新型冷却屋顶材料，如 Zhai et al.（2017）研发了一种新型日间可利用辐射制冷的随机玻璃—聚合物混合超材料（膜材料）。理论上可在没有制冷剂和没有电力的条件下实现 24 h 为建筑降温（Zhai et al., 2017），但实际该材料的降温特性具体如何尚未可知。相较高反照率屋顶，太阳能屋顶尽管反射率低，但可以通过转化太阳能来减少建筑能源消耗，且寿命较长适合长期安装（Hu et al., 2016）。

数值模式可以再现当时城市及建筑物的热环境，并能够对不同屋顶的节能及经济效益进行初始的评估（Takebayashi and Moriyama, 2007）。当前采用数值模拟进行冷却屋顶对于热岛缓解效应的研究已有所开展（Zhang et al., 2017; 郭良辰等, 2018）。已有的数值研究充分表明，对于美国、欧洲等国家，应用冷却屋顶后，屋顶温度有非常显著的降低（Oleson et al., 2010），对缓解高温热浪有一定的作用（Akbari, 2003; Synnefa et al., 2012），并可能对未来的气候变化有一定程度的影响（Lu et al., 2013），同时也对于城市能源需求有一定程度的缓解。例如 Salamanca et al.（2016）采用 WRF-BEP+BEM 方案，模拟了 2009 年 7 月 10～19 日在美国菲尼克斯和亚利桑那州部署的太阳能屋顶，结果显示 2 m 气温降低了 0.8°C，并且减少了 13%～14% 电力能源需求。但相较建筑物无法分辨尺度的数值模式运用的城市冠层模式，有不同的学者基于不同的考虑搭建了单层（Masson, 2000; Kusaka et al., 2001; 霍飞和陈海山, 2011）、多层（Martilli, 2002; 王咏薇和蒋维楣, 2009; 张蕾等, 2018）以及考虑室内外能量交换的冠层模型（Salamanca et al., 2010）。其中 Masson（2000）发展的城镇能量平

衡模型（Town Energy Balance, TEB）是一个全面模拟城市街渠单元辐射热量平衡的模型。何晓凤等（2009）利用单层冠层模式 TEB 对南京典型居民区进行离线模拟，结果表明改变建筑物反照率对城市气候改善有重大影响。TEB 在近年不断增加新的模块，如改善街道峡谷内气象场的模拟（Hamdi and Masson, 2008）；增加了建筑能源模块（BEM）（Bueno et al., 2012），包括空调系统及通风状况；加入了道路的方向以及城市建筑物间有绿植的情形（Lemonsu et al., 2012）使得模拟场景更接近实际。当前为了更好地研究城市气象中的热点问题，模型中增加了空调制冷能耗（De Munck et al., 2013）及太阳能屋顶产生电量模块的计算（Masson et al., 2013），为本文研究提供良好的工具。

中国是亚非地区城市发展最快的发展中国家之一（United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2014），城镇化率已超过 50%（李浩, 2013），在一些超大城市例如北京、上海等，高温热浪已经给人群带来严重威胁（谢志清等, 2015; 张明顺和王义臣, 2015; 何苗等, 2017）。于是缓解城市热岛效应，减少城市能耗显得尤为重要。使用何种冷却材料去增加城市表面反照率一直以来也都是该领域的重要研究问题，而目前中国开展研究高反照率冷却屋顶材料热辐射性能的研究以及对更新的具有优秀降温效果的环保材料，例如太阳能板、超材料等，研究尚少。此外，冷却屋顶对于能耗以及相应对经济产生的影响也有待研究。

基于以上的研究背景，本文选择覆盖面积分别为 100% 和 50%的两种太阳能板和 3 种高反射率冷却屋顶膜材料——铝箔沥青膜、白色 TPO 膜及新研发的超材料，基于 METEO-FRANCE/CNRS 发布的最新版本 TEBv2.4406，评估夏季高温热浪期间不同冷却屋顶材料的铺设降温效应和热环境的影响以及各材料节能状况和太阳能板发电状况，拟为城市规划及实际施工提供理论支撑。

2　模式及资料

2.1　天气背景及观测数据

根据中国气象数据网的南京历史气温数据，2017 年 7 月南京有连续两周的高温热浪天气（每日最高气温超过 35°C）（贾佳和胡泽勇, 2017），7 月 23 日最高气温达到 41°C，天气状况均为晴朗。因此，本文选择这段时间开展研究。

本文所用模式驱动及检验数据为江苏省南京市南京信息工程大学一六层教学楼北区楼顶（32.206°N，118.716°E）进行的观测实验所得数据。观测总时长为 2017 年 4 月 1 日至 8 月 15 日、2018 年 1 月 23 日至 2019 年 4 月 27 日、2019 年 6 月 18 日至 2020 年 1 月 8 日、2020 年 2 月 19 日至今。约 1～2 周进行一次数据采集工作，并进行擦拭镜头、设置仪器时间同步等维护工作。本文用于检验的数据为 2017 年 7 月 16 日 00:00（北京时间，下同）至 2017 年 7 月 30 日 00:00。观测期间，天气晴好，数据缺测率为 0，数据质量较好。

建筑物周围道路纵横，人为下垫面占地面积 90% 左右并有一定绿植。学校周围并无高大建筑物环绕，是典型的城郊结合部用地类型。如图 1，观测场地是典型的深灰色混凝土屋顶，实验区域均为 30 m^2 的矩形区域，仪器为荷兰 Kipp & Zonen 四分量辐射仪（CNR4）。可获得楼顶向上发射的长波 E_{ULR}（单位：W m^{-2}），天空向下反射的长波，下垫面向上反射的太阳短波 E_{UR}（单位：W m^{-2}），太阳发射的向下短波 E_{DR}（单位：W m^{-2}）4 个分量数据。为了尽量减少来自非测试表面的光污染以及令仪器检测范围尽可能缩小在所选定的样本区域内，将四分量辐射仪设置为距离样本高 65 cm。另外还在文德北区楼顶东北角的位置架设了小气候观测仪，得到楼顶气温、湿度、风速等气象要素 30 min 数据。

2.2　城镇能量平衡模型（TEB）简介及模拟算例

2.2.1　模型及方案简介

本文使用城镇能量平衡模型 TEBV2.4406 版本（Masson, 2000）。该城镇能量平衡模型基于单层城市建筑物结构的假设，考虑了街道峡谷几何形状对短波和长波辐射的影响，并为每个表面（道路、墙壁、屋顶）建立单独的能源预算，以得到峡谷和屋顶占据面积分数及冠层顶部的热量、动量和质量交换的函数（Pigeon et al., 2008）。基于该城镇能量平衡模型 TEB 已经针对温哥华和密集城区的轻工业区，墨西哥城（Masson et al., 2002），马赛等地（Lemonsu et al., 2004; Roberts et al., 2006）的现场数据进行了评估，均表明 TEB 模型能够很好地再现城市表面和大气之间热量和动量的交换。

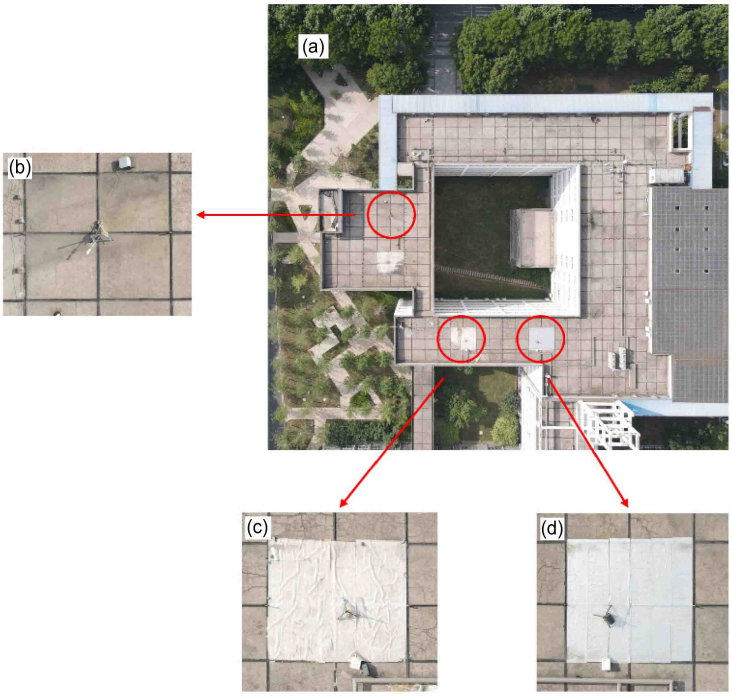

图 1 （a）观测场地俯瞰图；（b）普通水泥屋顶观测项目；（c）白色 tpo 膜观测项目；（d）铝箔沥青膜观测项目

Fig. 1 (a) An aerial view of the observation site; (b) the ordinary cement roof observation project; (c) the observation project of a white TPO membrane; (d) the observation project of the aluminum foil and asphalt-based (SBS) membrane

Bueno et al.（2012）为 TEB 增加了建筑能源模块（BEM），包括了空调系统的能耗计算。假定模拟区域具有均匀的城市形态，每个建筑有相同的室内温湿度且太阳辐射及辐射导致的热量增益可被建筑物很好地吸收并释放到室内环境中。BEM 利用热平衡去计算建筑能源需求，涉及了室内各个表面的热传导，对流及辐射热等：

$$Q_{\mathrm{cd}} + Q_{\mathrm{cv}} + \sum_{s_i} Q_{\mathrm{rd}} = 0, \qquad (1)$$

其中，Q_{cd} 为传导项，Q_{cv} 为对流项，取决于内表面和室内温度；s_{i} 为墙壁、窗户、地板、屋顶和内部质量；Q_{rd} 为辐射项，均由标准传热系数公式

$$Q = h\Delta T \qquad (2)$$

算出（其中，h 为对流传热系数，ΔT 为内表面和室内温度差）。根据空调系统制冷和制热模式中目标温度预设值计算出空调需要将多余的室内热量“搬运”出室外所需要的电量，即冷却能源需求：

$$Q_{\mathrm{HVAC,cool}} = Q_{\mathrm{dem,cool}}/\mathrm{COP}, \qquad (3)$$

其中，COP 为制冷系统的冷却系数；$Q_{\mathrm{dem,cool}}$为感热和潜热能源需求之和，是室内想要达到预设值需要排除的热量。

在 TEB 模式中，为了研究新能源的使用对于建筑物能耗的影响，Masson et al.（2014）在 TEB 中引入了太阳能光伏板的计算。方案中设置太阳能板与屋顶有一定的倾角，太阳能板接收以及发射的能量如图 2 所示。

太阳能光伏板的能量平衡方程（Masson et al., 2014）如下：

$$E_{\mathrm{DR}} + E_{\mathrm{DLR}} + E_{\mathrm{ULR}}(\mathrm{Roof}) = E_{\mathrm{UR}}(\mathrm{panel}) + E_{\mathrm{ULR}}(\mathrm{panel}) + E_{\mathrm{DLR}}(\mathrm{panel}) + H + E_{\mathrm{prod}}, \qquad (4)$$

等式左侧是太阳能电池板的输入能量，E_{DR} 是来自太阳的入射短波辐射（单位：W/m^2）；E_{DLR} 是从大气中传入的长波辐射（单位：W/m^2），两者均为 TEB 的输入数据。E_{ULR}(Roof)是从屋顶上升并被太阳能电池板拦截的长波辐射（单位：W/m^2）。等式右侧是太阳能光伏板的输出能量。E_{UR}(panel)是太阳能电池板反射的太阳辐射（单位：W/m^2）；E_{ULR}(panel)是由太阳能电池板发射（并反射）到天空的长波辐射（单位：W/m^2）；E_{DLR}(panel)是由太阳能电池板发射到屋顶（向下）的长波辐射（单位：W/m^2）；E_{prod}是面板产生的能量（单位：J），它取决于太阳能光伏板的特性、辐照度和倾斜度，并给室内的空调系统提供电量；H 是从太阳能电池

板到大气的显热通量（单位：W/m^2）。因此在建筑物屋顶铺设太阳能光伏板改变了与大气接触的城市表面的能量平衡，改变了屋顶所接收的辐射，从而改变了建筑物的能量平衡。而 TEB 中加入的太阳能光伏板方案参数取决于不断变化的气象条件，可以相对精确地模拟太阳能板能量变化。

2.2.2　输入输出变量

TEB 模型计算了一个城市街区单元内所接收到的以及释放出的能量平衡过程，驱动模式所需要的输入量参见表 1。其中辐射变量数据来自于南京信息工程大学文德楼楼顶架设的四分量辐射仪；CO_2 浓度变量设置为空气中 CO_2 浓度常数；降雨量与降雪量在模拟期间为 0；其余气象数据来自于文德楼顶架设的小气候观测仪。模式输出的变量主要为城市街区总体向上的能量平衡分量、街区内的气象状况、建筑物不同表面的温度以及空调能耗的相关变量（参见表 1）。

2.2.3　本文算例及参数设置

本文采用 6 个算例进行屋顶材料的敏感性实验：1）控制算例 CTRL，即普通水泥屋顶；2）AA 为

表 1　TEB 模式相关变量

Table 1　The Relevant variables of TEB

输入变量		输出变量	
变量名称	变量说明	变量名称	变量说明
CO_2	CO_2浓度（单位：kg/m^3）	RN_TOWN	净辐射（单位：W/m^2）
DIR	风向	H_TOWN	显热通量（单位：W/m^2）
DIR_SW	太阳直接辐射（水平面）（单位：W/m^2）	LE_TOWN	潜热通量（单位：W/m^2）
LW	长波辐射（水平面）（单位：W/m^2）	P_CANYON	道路压力（单位：Pa）
PS	气压（单位：Pa）	Q_CANYON	街区内比湿（单位：kg/kg）
QA	湿度（单位：kg/m^3）	T_CANYON	街区内气温（单位：K）
RAIN	降雨量（单位：kg m^{-2} s^{-1}）	U_CANYON	街区内风强（单位：m/s）
SCA_SW	漫射太阳辐射（水平面）（单位：W/m^2）	TI_BLD	建筑内部温度（单位：K）
SNOW	降雪量（单位：kg m^{-2} s^{-1}）	T_ROAD1	道路表面温度（单位：K）
TA	温度（单位：K）	T_ROOF1	屋顶表面温度（单位：K）
WIND	风速（单位：m/s）	T_WALLA1	墙壁表面温度（墙A）（单位：K）
		T_WALLA2	墙壁表面温度（墙B）（单位：K）
		HVAC_COOL	制冷能源需求（单位：W/m^2）
		HVAC_HEAT	供暖能源需求（单位：W/m^2）

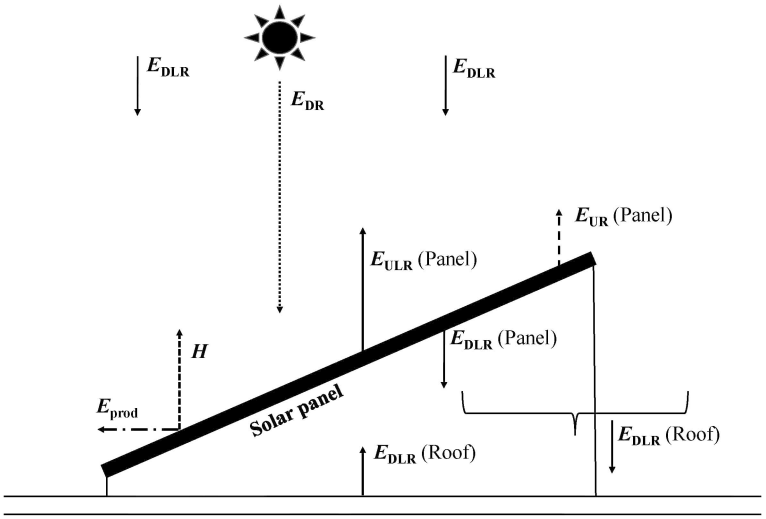

图 2　太阳能光伏板的能量平衡及其对屋顶接收辐射影响的示意图（Masson et al., 2014）

Fig. 2　Schematic diagram of the energy balance of a solar photovoltaic panel and its effect on the roof's received radiation (Masson et al., 2014)

铺设铝箔自粘 SBS 沥青防水卷材（铝箔沥青膜）的屋顶（简称为 AA 是为了方便下文图表中的标注，并不是材料所规定的缩写）；3）TPO 为铺设白色 TPO 自粘单层膜（TPO 膜）的屋顶；4）SP05 和 5）SP1 分别为在屋顶铺设 50% 和 100% 面积的转化效率为 14% 的太阳能板（市面较普遍的太阳能板转化效率为 14%）（尚华和王惠荣, 2010）；6）SM 为随机玻璃—聚合物混合超材料屋顶。算例中白色 TPO 自粘单层膜（TPO 膜）和铝箔自粘 SBS 沥青防水卷材（铝箔沥青膜）均是冷却屋顶中寿命较长的膜材料。本研究中涉及的建筑参数设置为：楼高 20 m，建筑占比 0.58，峡谷纵横比为 20/16，主干道与南北轴夹角为 170°。将路面、屋顶及墙面的热传导系数均设置为 2.5 W m^{-1} K^{-1}，热容则分别设置为 2.01×10^{-6} J m^{-3} K^{-1}、2.51×10^{-6} J m^{-3} K^{-1} 和 2.01×10^{-6} J m^{-3} K^{-1}。另外，本研究将空调目标温度设置为 298 K，空调冷却效率（COP）设置为 4.5，以便进一步探究空调制冷能耗。不同材料的屋顶参数设置参见表 2。其中铝箔沥青膜及 TPO 膜相关参数为屋顶铺设实际材料后实验测得，随机玻璃—聚合物混合超材料参数参考 Zhai et al.（2017）的研究，其他一些物理参数的选取参考何晓凤等（2009）和 Xu et al.（2018）的工作。

3 模拟结果验证

2017 年 7 月南京出现了连续两周的高温热浪现象（2017 年 7 月 16 日 00:00 至 30 日 00:00）。如图 3 所示，该时期南京地区主要受西太平洋副热带高压影响，持续两周高温且无降水。这是由于副热带高压内部存在下沉气流，风力微弱，太阳辐射更容易影响地表，易出现高温少雨情况。因此本文选取该时间段内进行模拟结果的验证。

天气模式常采用气温进行模拟结果验证。本研究采用的是一个离线城市冠层模式，气温非 TEB 模式默认输出变量。因此本文选取了屋顶表面温度这一模式默认输出变量以及净短波、净长波和净辐射这三个具有代表性的辐射分量进行模拟结果验证。图 4 为由高温热浪时期（2017 年 7 月 17～30 日）观测和模拟所得净短波、净长波、净辐射建筑物屋顶表面温度每小时日均误差图及相对误差图组成，其中阴影及误差棒两端分别为观测和模拟的标准差。

从观测和模拟结果的误差棒和误差阴影可知模拟值与观测值比较吻合，这两周每天同一小时的净短波、净长波、净辐射及屋顶表面温度的模拟值与观测值波动大小也相当一致。从观测和模拟结果的平均线看一致性较高，相关系数分别为 0.95、0.97、0.99 和 0.98。3 个辐射项观测值与模拟值差异均小于 40 W m^{-2}，表面温度观测与模拟最大差值小于 3 K。从相对误差来看早晚日出日落时模拟可能有些延迟，但总体都较小，说明模拟效果较好。正午时观测结果略高于模拟值，原因可能是夏季长期晴天高温，白天到达冠层净辐射量值较大。屋顶表面温度午后模拟值会略高于观测值，差值平均在 0.8 K 左右，可能是由于净长波模拟偏小，且 TEB 中模拟会由于屋顶材质的不同储热不同导致模拟出的屋顶表面温度较大（Dominguez et al., 2011）。

表 2 高温热浪时期（2017 年 7 月 16～30 日）不同冷却屋顶与普通水泥屋顶的模拟算例及屋顶参数设置

Table 2 Simulation examples and roof parameters setting of different cooling roofs and a cement roof from 16–30 Jul 2017

算例	屋顶类型	参数设置	
		屋顶反照率	屋顶发射率
CTRL	普通水泥屋顶	0.18	0.94
AA	高反照率屋顶	0.76	0.83
TPO	高反照率屋顶	0.42	0.9
SP05	太阳能板屋顶	0.1	0.9
SP1	太阳能板屋顶	0.1	0.9
SM	随机玻璃—聚合物混合超材料屋顶	0.96	0.93

4 模拟结果分析

为了研究铺设不同冷却屋顶材料对屋顶表面热通量及夏季高温热浪时期空调制冷能耗的影响。本文选择了 4 种不同冷却屋顶材料进行不同材料参数的敏感性分析。

4.1 四种冷却屋顶对屋顶表面温度的影响

TEB 模式设置街渠中有 3 种表面：屋顶、路面和墙面，分别在这三种面上建立几何特征的能量平衡关系，算出每个面与临近大气间的热通量交换，再依照每种表面占街渠单元的面积权重换算出总的热通量交换。

使用不同冷却屋顶材料后建筑物屋顶和普通屋

顶（控制算例）在 2017 年 7 月 16～30 日表面温度日小时变化如图 5a 所示，图 5b 为使用冷却屋顶材料后屋顶表面可降低的温度。从图可看出白天降温效果明显优于夜间，12:00 至 14:00 是一天中各种屋顶表面温度最高的时候。在这段时间内，各种冷却屋顶材料可达到一天中最大降温效果，使屋顶表面温度降到最低。其中铺设 100% 面积的太阳能板降温效果最好，平均降温 13 K。铺设超材料降温效果仅次于 100% 面积的太阳能板，平均降温可达 12.34 K。铺设铝箔沥青膜、50% 面积的太阳能板和白色 TPO 膜在高温热浪时期则分别平均可降低 8.8 K、6.49 K 和 3.52 K。

根据图 5b 中降温情况可知铺设冷却屋顶材料在白天夜晚均可降温，其降温效果在白天（06:00 至 18:00）与夜晚（19:00 至次日 06:00）的具体体现见图 6。其中，白天降温效果较好。铺设随机玻璃—聚合物混合超材料的屋顶会使得白天屋顶表面温度平均降低 18.59 K，至多可降低 31.85 K；铺设 100% 面积的太阳能板则会使白天屋顶表面平均降温达 19.58 K，至多可降低 33.57 K；其次是铝箔沥青膜、50% 面积的太阳能板和白色 TPO 膜，分别至多可降温 23 K、16.48 K 和 9.15 K。夜间这几种冷却屋顶材料也有一定的降温效果。夜间超材料屋顶可平均降温 4.28 K，100% 面积的太阳能板降温可达 4.53 K，其他几种材料也有平均 1.08～2.77 K 的降温效果。

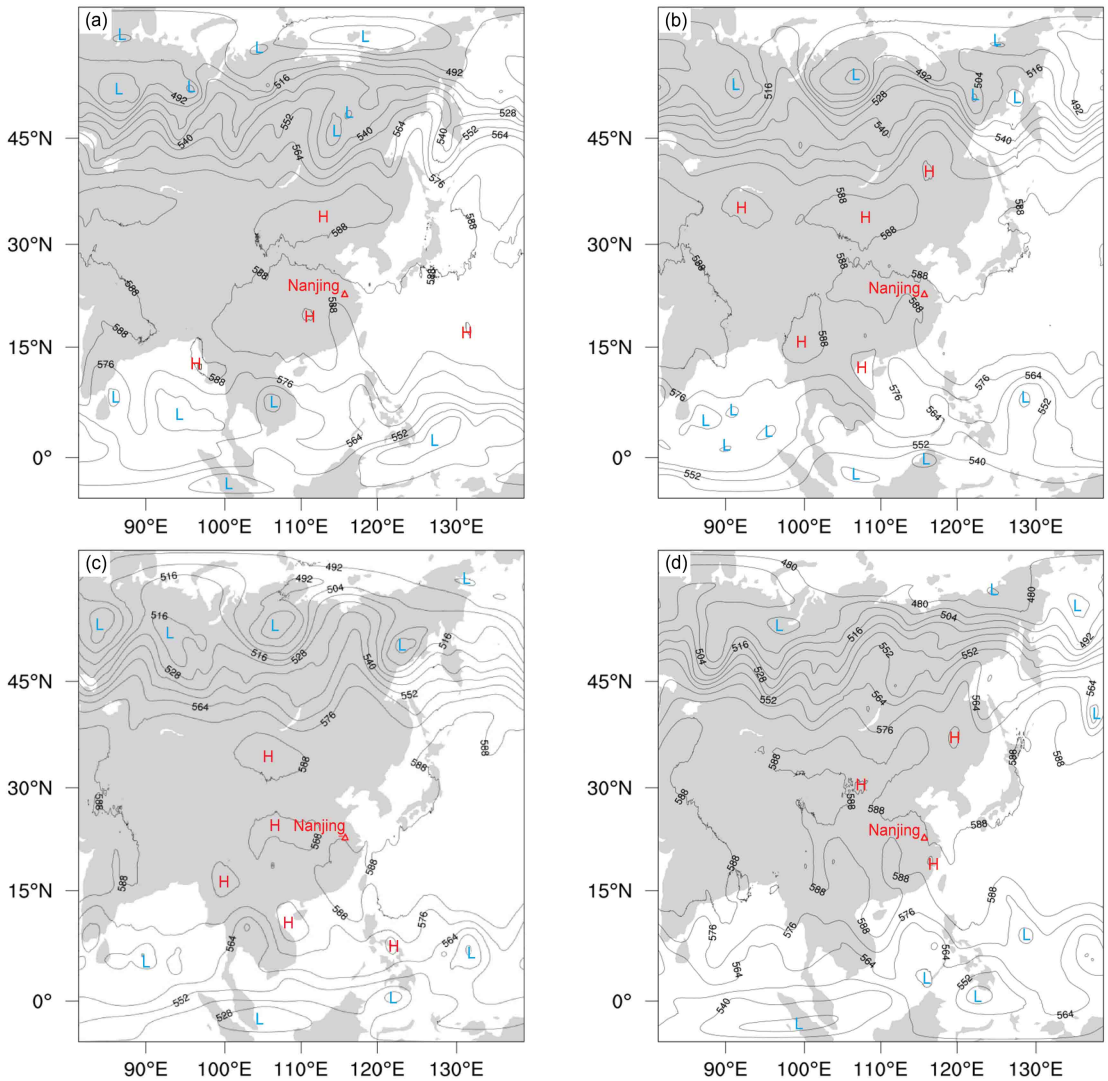

图 3　2017 年 7 月（a）16 日、（b）23 日、（c）25 日及（d）30 日 00:00 的高空 500 hPa 天气图（等值线为位势高度，单位：gpm）

Fig. 3　Synoptic chart of 500 hPa at 0000 LST on (a) 16 Jul, (b) 23 Jul, (c) 25 Jul, and (d) 30 Jul 2017 (contour lines represent geopotential height, units: gpm)

超材料屋顶在模拟期间比其他两种高反照率屋顶平均多降温 2.04～4.65 K，是降温效果较好的一种材料。这是由于模拟算例中对于高反照率冷却屋顶材料设置的反照率较大，尤其是随机玻璃—聚合物混合超材料屋顶将 96% 的太阳短波辐射返回大气，自身红外发射率为 0.93，减少了大量到达地面的太阳短波辐射，从而降低了城镇表面温度。太阳能板理论上来说反照率低，表温应该较高，但实际计算出来的温度却降到一个很理想的状态，应该是由于模式中设置太阳能板摆放设置是倾斜的，直接在屋顶表面创造出阴影使得屋顶接收的入射短波辐射减少，从而达到降温的效果。在 Dominguez et al.（2011）的研究中证实倾斜光伏板在屋顶形成阴影，温度显著小于裸露的屋顶，太阳能板下方热量还可通过空气对流移除，且铺设面积越大降温越好，至多可比其他的冷却屋顶材料多 1.72～24.42 K，他

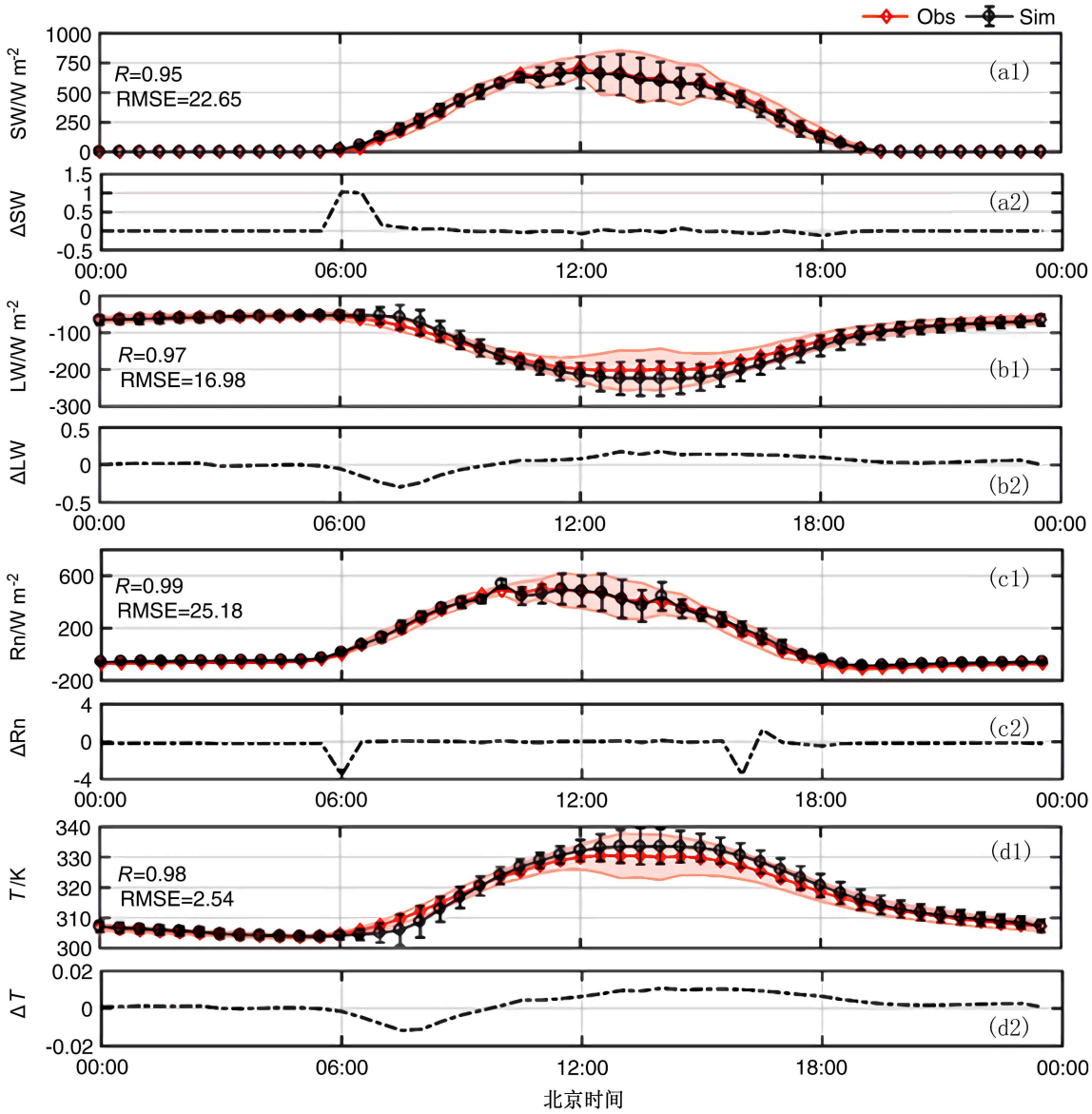

图 4　2017 年 7 月 16～30 日（a1、a2）净短波辐射、（b1、b2）净长波辐射、（c1、c2）净辐射、（d1、d2）屋顶表面温度模拟值与观测值（a1、b1、c1、d1）平均误差及（a2、b2、c2、d2）相对误差（红色实线为每时刻观测值日均值，阴影是每时刻观测值日均标准差，黑色实线为每时刻模拟日均值，误差棒两端为每时刻模拟值日均标准差）

Fig. 4　(a1, b1, c1, d1) Average errors and (a2, b2, c2, d2) relative errors of (a1, a2) net shortwave radiation absorbed by roofs, (b1, b2) net longwave radiation absorbed by roofs, (c1, c2) net radiation, and (d1, d2) roof surface temperature during 16−30 Jul 2017. Red line is the mean value of observed values at each moment and black line is the simulated values mean of each moment, standard deviations are represented by a gray shaded area and error bars for the experiment's simulation period

们的研究结论与本文相近。

4.2　四种冷却屋顶的辐射热特性差异

屋顶表面温度的变化，是由于热量的传递导致。图 7 和图 8 分别为铺设各类冷却屋顶材料后与普通屋顶感热通量和净辐射差值的小时日均变化情况。对比可知，4 种冷却屋顶的感热通量与净辐射差值均具有典型的低谷型日变化特征，变化趋势一致，夜间差值较小，日最大感热通量出现在 13:00 左右，即感热通量全天向上输送。与普通屋顶相比，铺设随机玻璃—聚合物混合超材料和 100% 面积太阳能板的感热通量分别平均降低 122.82 W m^{-2}、129.69 W m^{-2}，铝箔沥青膜可降低 86.03 W m^{-2}，50% 面积的太阳能板平均也可降低 62.82 W m^{-2}。

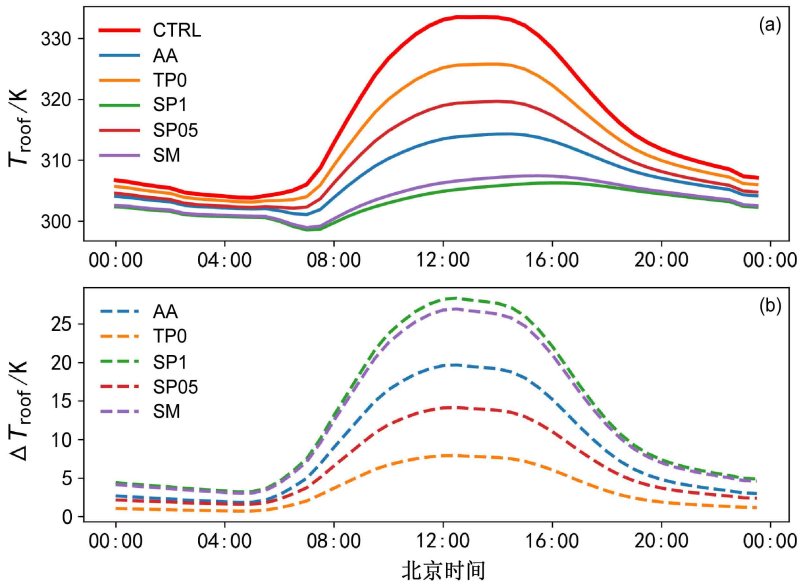

图 5　（a）高温热浪时期（2017 年 7 月 16～30 日）不同冷却屋顶材料表面温度；（b）铺设不同冷却屋顶材料后与普通水泥屋顶相比，可降低的屋顶表面温度小时平均

Fig. 5　Ensemble average daily cycle of different cooling roof materials' surface temperature; (b) Degrees of temperature reduction for various materials from 16–30 Jul 2017

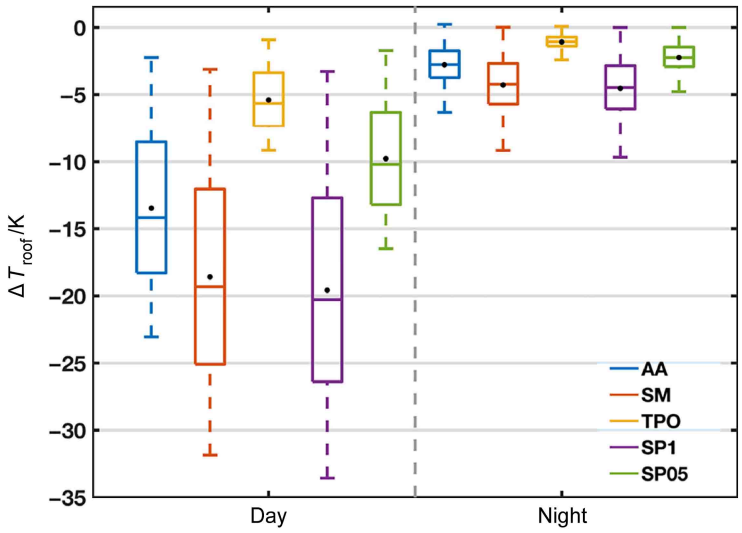

图 6　高温热浪时期（2017 年 7 月 16～30 日）4 种冷却屋顶材料的屋顶表面温度在白天（06:00 至 18:00）与夜晚（19:00 至次日 06:00）的降温情况

Fig. 6　Boxplot of the degrees of temperature reduction for various materials during the day (0600 LST–1800 LST) and at night (1900 LST–0600 LST), respectively, during 16–30 Jul 2017

各种冷却屋顶能减少净辐射的能力与感热通量一致。铺设随机玻璃—聚合物混合超材料和100%面积的太阳能板可降低的净辐射最多，在高温热浪的两周时间里分别至多降低547.63 W m^{-2}和516.72 W m^{-2}（表3）；铺设铝箔沥青膜和50%面积的太阳能板可降低的净辐射次于前两种材料，至多可降低417.53 W m^{-2}和297.87 W m^{-2}；白色TPO膜至多也可降低168.47 W m^{-2}，但相较其他几种冷却屋顶效果一般。表3中还总结了高温热浪时期（2017年7月16～30日）各种冷却屋顶与普通屋顶相比屋顶表面温度、感热通量、潜热通量、净辐射平均和最多降低程度。

表3 高温热浪时期（2017年7月16～30日）不同冷却屋顶与普通水泥屋顶各热辐射分量平均差值及最大差值

Table 3 The average difference and the maximum difference of thermal radiation components between different cooling roofs and a cement roof during 16–30 Jul 2017

	平均差值				最大差值			
算例	净辐射/W m^{-2}	感热通量/W m^{-2}	潜热通量/W m^{-2}	屋顶表面温度/K	净辐射/W m^{-2}	感热通量/W m^{-2}	潜热通量/W m^{-2}	屋顶表面温度/K
AA	−92.12	−86.03	−2.45	−8.8	−417.53	−312.87	−129.6	−23.06
TPO	−36.84	−34.42	−0.92	−3.51	−168.47	−125.33	−49.12	−9.15
SM	−131.35	−122.82	−3.48	−12.34	−516.72	−400.78	−176.2	−31.86
SP05	−67.34	−62.82	−1.81	−6.49	−297.87	−223.17	−95.33	−16.5
SP1	−138.68	−129.69	−3.71	−13.01	−547.63	−425.72	−184.46	−33.58

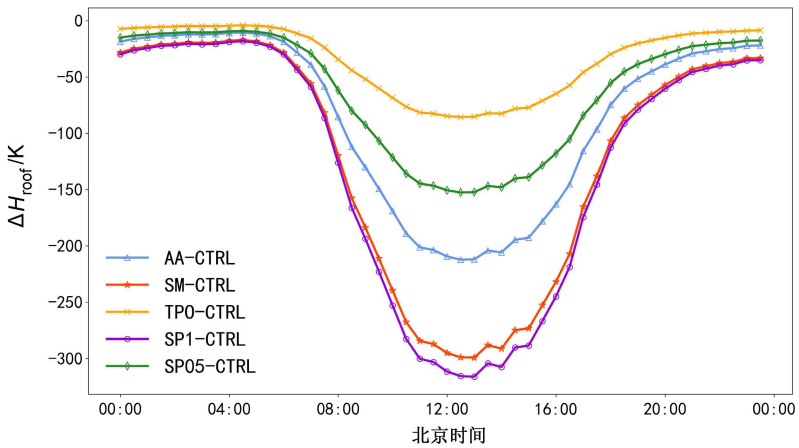

图7 铺设不同材料屋顶在高温热浪时期（2017年7月16～30日）屋顶感热通量差值小时日均变化

Fig. 7 Ensemble average daily cycle of sensible heat of different cooling roof materials during 16–30 Jul 2017

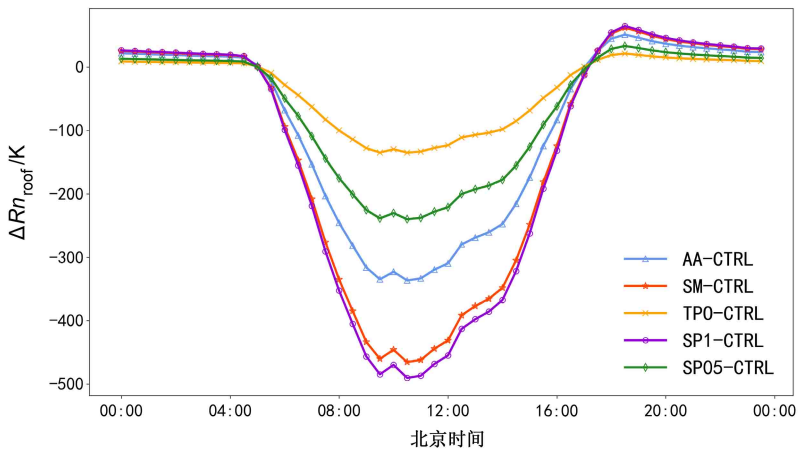

图8 同图7，但为净辐射差值小时日均变化

Fig. 8 Same as Fig.7, but for average daily cycle of net radiation of different cooling roof materials

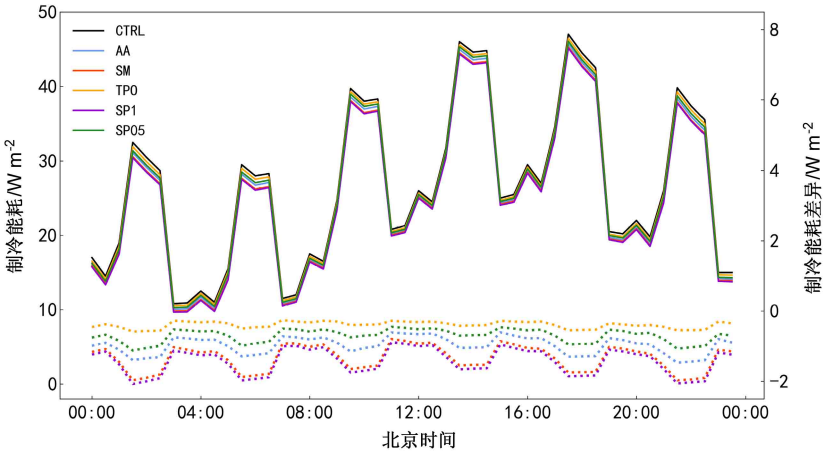

图 9　不同材料屋顶在高温热浪时期（2017 年 7 月 16～30 日）建筑物每平米所需冷却能源消耗（实线）及铺设冷却屋顶后每平米可减少的冷却能源消耗小时平均值（虚线）

Fig. 9　Energy consumption per square meter of buildings with different roof materials (solid lines) and the daily average hourly cooling energy consumption that can be reduced per square meter after the cooling roof is laid (dotted lines) during the heatwave of 16–30 Jul 2017

综上可知，高反照率材料通过将太阳短波辐射反射回大气层，并将自身热量以红外形式发射出去，即反照率的增大会减少每个面吸收的净短波辐射，导致感热通量减少，净辐射减少。从而降低了表面温度，减弱了建筑物对冠层内大气的感热交换，使得屋顶表面温度降低；太阳能屋顶尽管反照率低，但由于倾斜摆放减少了屋顶表面接收的太阳短波以及自身将太阳短波转化为电能的原因也可以降低大量感热及净辐射等，减少建筑物储热，从而减少释放的热量，使表温降低。

4.3　四种冷却屋顶对能源需求的影响

高反射率材料增加建筑物表面反照率，减少建筑物的储热，从而达到节约冷却能源需求。而太阳能板则是通过吸收太阳短波来发电，减少了建筑物吸收的短波辐射，还能直接生产电量来缓解冷却能源需求。图 9 是不同材料屋顶在高温热浪期间的冷却系统耗能情况（左轴）以及使用冷却屋顶后可以节省的冷却能耗（右轴）。图中能耗表现为锯齿状，是由于空调工作达到预设室内温度后会进入休息阶段，14:00 是一天最热的时候，达到预设值所需冷却能源消耗也是最多的。

从图中可以看出所有屋顶耗能趋势一致，各材料正午可降低的空调冷却能耗比早晚略低。其中在屋顶铺设超材料屋顶以及 100% 面积的太阳能板可以使建筑物冷却能耗降到最低，分别至多可降低 2.1 W m^{-2} 和 2.16 W m^{-2}；使用铝箔沥青膜效果次之，至多降低 1.47 W m^{-2}；50% 铺设面积的太阳能屋顶及 TPO 膜再次。与第一部分中各种冷却屋顶材料可降低的屋顶表面温度相比，理论上可节省更多的冷却能耗，但实际模拟出来节省的能源却很少，可能是由于模式中设置屋顶为 5 层，热量层层递减，因此室内初始温度并没有预想的高。

Salamanca et al.（2016）在研究中证实铺设 100% 面积太阳能光伏板在夏季至多可减少 2 MW km^{-2}（即 2 W m^{-2}）冷却能源，与本文模拟结果相似。除此之外，使用太阳能光伏板还可以利用吸收的太阳短波转化成电量。这里选用的 14% 转化效率的太阳能板 1 m^2 发电量日均小时变化如图 10 所示。其中电量度数千瓦时（度）计算方法（密保秀等, 2008）如下：

1 h 产生电量=太阳能板转化效率×1 h 内接收太阳短波/1000,

其中太阳短波为所选高温热浪时期（2017 年 7 月

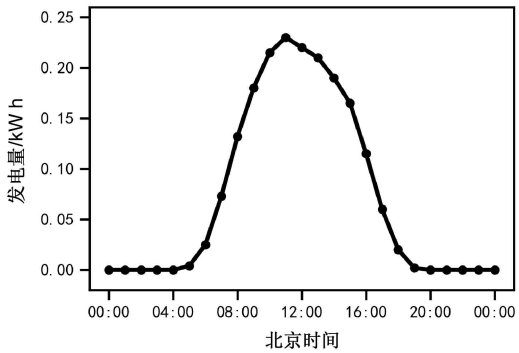

图 10　转化效率为 14% 的太阳能板在高温热浪时期（2017 年 7 月 16～30 日）) 发电量

Fig. 10　Daily power generation of a solar panel with a conversion efficiency of 14% during the heatwave of 16–30 Jul 2017

16～30日）屋顶所接收的太阳短波（单位：W m^{-2}）。

从图10中看出在11:00左右太阳能板转化电量最多，每平方米可发电0.23 kW h，累计整日每平米可发电1.84 kW h。按照图9中左轴展示的普通屋顶控制算例，在高温热浪时期累计整日每平米需要消耗1.76 kW h的冷却能源，因此铺设100%屋顶面积14%转化效率的太阳能板同期产生的额外发电量，可完全抵消这两周全部空调制冷能耗。

因此太阳能板较其他冷却屋顶材料而言可以节省更多的建筑能源，从而可节省更多的电费。但由于太阳能光伏板的造价较其他冷却屋顶材料昂贵，因而生活中使用何种冷却屋顶材料还需结合经济效益等具体分析。

5 结论

本研究采用了城镇能量平衡模型（TEB），探讨了两种铺设面积的太阳能屋顶和3种高反照率屋顶铝箔沥青膜、白色TPO膜和科罗拉多大学新研发的玻璃聚合物混合超材料屋顶在南京高温热浪时期（2017年7月16～30日）对城市热环境以及冷却能源需求的影响。得到如下初步结论：

（1）在持续高温的天气背景下，不同冷却屋顶材料降温效果不同。在屋顶铺设超材料和100%覆盖面积的太阳能板降温效果最好，屋顶表面温度白天至多分别可降低31.85 K和33.57 K；铝箔沥青膜效果次之，最多降低23 K；50%覆盖面积的太阳能板和TPO膜再次，最大降低16.48 K和9.15 K。各冷却屋顶材料夜间也平均有1.08～4.53 K的降温。

（2）铺设冷却屋顶材料使辐射量发生一定变化。相对普通屋顶来说，铺设冷却屋顶材料可使屋顶感热平均降低34.42～129.69 W m^{-2}，使潜热通量降低1.81～3.71 W m^{-2}，净辐射降低36.84～138.68 W m^{-2}。两种不同铺设面积的太阳能屋顶尽管反照率低，相较3种高反照率膜材料感热、潜热和净辐射也略高，但由于自身将太阳短波转化为电能的原因，减少建筑物储热，从而减少了入射的太阳短波，减少了释放到大气中的热量。

（3）铺设冷却屋顶材料可以直接或间接地减少冷却能源需求。铺设超材料屋顶以及铺设100%面积的太阳能板可以使建筑物冷却能耗降到最低，分别至多可降低2.1 W m^{-2}和2.16 W m^{-2}；使用铝箔沥青膜效果次之，至多降低1.47 W m^{-2}；50%铺设面积的太阳能屋顶及TPO膜再次。其中所选太阳能光伏板每平方米可发电0.23 kW h，累计整日每平米可发电1.84 kW h，可全部抵消同期空调系统制冷能耗。

本文研究发现铺设冷却屋顶材料可以有效降低城镇在高温热浪时期的屋顶表面温度，主要是随机玻璃—聚合物混合超材料和在屋顶铺设100%覆盖面积的太阳能板效果最好。使用城镇能量平衡模型（TEB）进行模拟得到可以节约的冷却能源需求，尤其是所选太阳能板可产生相当可观的电量，但这样的结果是建立在假设建筑物屋顶上100%覆盖太阳能板的理想情况下，这一假设在实际安装上难度较大。在未来的研究中，需要采用与实际情况相符的冷却屋顶参数化方案，并作更长时间的模拟分析，从而更好地为缓解城市夏季高温提供有效的数据支持。

参考文献（References）

Akbari H. 2003. Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non-residential buildings [J]. Energy, 28(9): 953−967. doi:10.1016/S0360-5442(03)00032-X

Akbari H, Levinson R, Rainer L. 2005. Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings [J]. Energy and Buildings, 37(10): 1007−1016. doi:10.1016/j.enbuild.2004.11.013

Akbari H, Cartalis C, Kolokotsa D, et al. 2016. Local climate change and urban heat island mitigation techniques—The state of the art [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 22(1): 1−16. doi:10.3846/13923730.2015.1111934

Bueno B, Pigeon G, Norford L K, et al. 2012. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme [J]. Geoscientific Model Development, 5(2): 433−448. doi:10.5194/gmd-5-433-2012

Cheng V, Ng E, Givoni B. 2005. Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate [J]. Solar Energy, 78(4): 528−534. doi:10.1016/j.solener.2004.05.005

De Munck C, Pigeon G, Masson V, et al. 2013. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? [J]. Int. J. Climatol., 33(1): 210−227. doi:10.1002/joc.3415

Dominguez A, Kleissl J, Luvall J C. 2011. Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer [J]. Solar Energy, 85(9): 2244−2255. doi:10.1016/j.solener.2011.06.010

Doulos L, Santamouris M, Livada I. 2004. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials [J]. Solar Energy, 77(2): 231−249. doi:10.1016/j.solener.2004.04.005

Gunawardena K R, Wells M J, Kershaw T. 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity [J]. Science of the

Total Environment, 584: 1040−1055. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.158

郭良辰, 王咏薇, 张艳晴. 2018. 冷却屋顶对南京夏季高温天气的缓解作用 [J]. 科学技术与工程, 18(21): 16−23. Guo Liangchen, Wang Yongwei, Zhang Yanqing. 2018. Mitigative effect of cool roof on summer high temperature in Nanjing area [J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 18(21): 16−23. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2018.21.003

Hamdi R, Masson V. 2008. Inclusion of a drag approach in the Town Energy Balance (TEB) scheme: Offline 1D evaluation in a street canyon [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(10): 2627−2644. doi:10.1175/2008JAMC1865.1

何苗, 徐永明, 李宁, 等. 2017. 基于遥感的北京城市高温热浪风险评估 [J]. 生态环境学报, 26(4): 635−642. He Miao, Xu Yongming, Li Ning, et al. 2017. Assessing heat wave risk in Beijing by remote sensing [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 26(4): 635−642. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.04.013

何晓凤, 蒋维楣, 周荣卫. 2009. 一种单层城市冠层模式的建立及数值试验研究 [J]. 大气科学, 33(5): 981−993. He Xiaofeng, Jiang Weimei, Zhou Rongwei. 2009. Development of a single-layer urban canopy model and numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(5): 981−993. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.09

Hu A X, Levis S, Meehl G A, et al. 2016. Impact of solar panels on global climate [J]. Nature Climate Change, 6(3): 290−294. doi:10.1038/nclimate2843

霍飞, 陈海山. 2011. 大尺度环境风场对城市热岛效应影响的数值模拟试验 [J]. 气候与环境研究, 16(6): 679−689. Huo Fei, Chen Haishan. 2011. Numerical simulation of the effect of large-scale wind on urban heat island [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(6): 679−689. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.06.01

贾佳, 胡泽勇. 2017. 中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势 [J]. 地球科学进展, 32(5): 546−559. Jia Jia, Hu Zeyong. 2017. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 32(5): 546−559. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.05.0546

Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models [J]. Bound.-Layer Meteor., 101(3): 329−358. doi:10.1023/A:1019207923078

Lemonsu A, Grimmond C S B, Masson V. 2004. Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille [J]. J. Appl. Meteor., 43(2): 312−327. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0312:MTSEBO>2.0.CO;2

Lemonsu A, Masson V, Shashua-Bar L, et al. 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas [J]. Geoscientific Model Development, 5(6): 1377−1393. doi:10.5194/gmd-5-1377-2012

李浩. 2013. 城镇化率首次超过 50% 的国际现象观察——兼论中国城镇化发展现状及思考 [J]. 城市规划学刊, (1): 43−50. Li Hao. 2013. International phenomenon observation of urbanization rate exceeding 50% threshold: Implications for China [J]. Urban Planning Forum (in Chinese), (1): 43−50. doi:10.3969/j.issn.1000-3363.2013.01.007

Lu L L, Bi D Q, Liu Z, et al. 2013. Pollution problems in the production process of solar cells [J]. Scientia Sinica Chimica, 43(6): 687−703. doi:10.1360/032013-79

Martilli A. 2002. Numerical study of urban impact on boundary layer structure: Sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture [J]. J. Appl. Meteor., 41(12): 1247−1266. doi:10.1175/1520-0450(2002)041<1247:NSOUIO>2.0.CO;2

Masson G, Latour M, Rekinger M, et al. 2013. Global Market Outlook for Photovoltaics 2013−2017 [M]. Brussels: European Photovoltaic Industry Association, 12–32.

Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. Bound.-Layer Meteor., 94(3): 357−397. doi:10.1023/A:1002463829265

Masson V, Grimmond C S B, Oke T R. 2002. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities [J]. J. Appl. Meteor., 41(10): 1011−1026. doi:10.1175/1520-0450(2002)041<1011:EOTTEB>2.0.CO;2

Masson V, Bonhomme M, Salagnac J L, et al. 2014. Solar panels reduce both global warming and urban heat island [J]. Frontiers in Environmental Science, 2: 14. doi:10.3389/fenvs.2014.00014

密保秀, 高志强, 邓先宇, 等. 2008. 基于有机薄膜的太阳能电池材料与器件研究进展 [J]. 中国科学 (B 辑: 化学), 38(11): 957−975. Mi Baoxiu, Gao Zhiqiang, Deng Xianyu, et al. 2008. The research progress of materials and devices for solar cells based on organic thin films [J]. Science in China (Ser. B: Chemistry) (in Chinese), 38(11): 957−975. doi:10.1360/zb2008-38-11-957

Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. 2010. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model [J]. Geophys. Res. Lett., 37(3): 174−180. doi:10.1029/2009GL042194

彭少麟, 周凯, 叶有华, 等. 2005. 城市热岛效应研究进展 [J]. 生态环境, 14(4): 574−579. Peng Shaolin, Zhou Kai, Ye Youhua, et al. 2005. Research progress in urban heat island [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 14(4): 574−579.

Pigeon G, Moscicki M A, Voogt J A, et al. 2008. Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme [J]. Meteor. Atmos. Phys., 102(3–4): 159−171. doi:10.1007/s00703-008-0320-9

任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 10(4): 701−716. Ren Guoyu, Chu Ziying, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10(4): 701−716. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2005.04.01

Roberts S M, Oke T R, Grimmond C S B, et al. 2006. Comparison of four methods to estimate urban heat storage [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 45(12): 1766−1781. doi:10.1175/JAM2432.1

Sakka A, Santamouris M, Livada I, et al. 2012. On the thermal performance of low income housing during heat waves [J]. Energy and Buildings, 49: 69−77. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.023

Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—Part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model [J]. Theor. Appl. Climatol., 99(3–4): 331. doi:10.1007/s00704-009-0142-9

Salamanca F, Georgescu M, Mahalov A, et al. 2016. Citywide impacts of cool roof and rooftop solar photovoltaic deployment on near-surface air temperature and cooling energy demand [J]. Bound.-Layer Meteor., 161(1): 203−221. doi:10.1007/s10546-016-0160-y

Santamouris M. 2014. Cooling the cities—A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments [J]. Solar Energy, 103: 682−703. doi:10.1016/j.solener.2012.07.003

Santamouris M. 2015. Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges [J]. Energy and Buildings, 91: 43−56. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.027

Santamouris M, Synnefa A, Karlessi T. 2011. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions [J]. Solar Energy, 85(12): 3085−3102. doi:10.1016/j.solener.2010.12.023

Santamouris M, Haddad S, Saliari M, et al. 2018. On the energy impact of urban heat island in Sydney: Climate and energy potential of mitigation technologies [J]. Energy and Buildings, 166: 154−164. doi:10.1016/j.enbuild.2018.02.007

尚华, 王惠荣. 2010. 太阳能光伏发电效率的影响因素 [J]. 宁夏电力, (5): 48−50, 57. Shang Hua, Wang Huirong. 2010. Analysis on the factors affecting the efficiency of solar energy photovoltaic power generation [J]. Ningxia Electric Power (in Chinese), (5): 48−50, 57. doi:10.3969/j.issn.1672-3643.2010.05.015

Sharma A, Conry P, Fernando H J S, et al. 2016. Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model [J]. Environmental Research Letters, 11(6): 064004. doi:10.1088/1748-9326/11/6/064004

寿亦萱, 张大林. 2012. 城市热岛效应的研究进展与展望 [J]. 气象学报, 70(3): 338−353. Shou Yixuan, Zhang Dalin. 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70(3): 338−353. doi:10.11676/qxxb2012.031

Sun T, Grimmond C S B, Ni G H. 2016. How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(10): 5320−5335. doi:10.1002/2016JD024873

孙永, 王咏薇, 高阳华, 等. 2019. 复杂地形条件下城市热岛及局地环流特征的数值模拟 [J]. 大气科学学报, 42(2): 280−292. Sun Yong, Wang Yongwei, Gao Yanghua, et al. 2019. Numerical simulation of urban heat island and local circulation characteristics under complex terrain conditions [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(2): 280−292. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180204001

Synnefa A, Saliari M, Santamouris M. 2012. Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens [J]. Energy and Buildings, 55: 7−15. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.044

Takebayashi H, Moriyama M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island [J]. Building and Environment, 42(8): 2971−2979. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.017

谈建国, 黄家鑫. 2004. 热浪对人体健康的影响及其研究方法 [J]. 气候与环境研究, 9(4): 680−686. Tan Jianguo, Huang Jiaxin. 2004. The impacts of heat waves on human health and its research methods [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9(4): 680−686. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2004.04.12

United Nations, Department of Economic and Social Affairs. 2012. World urbanization prospects, the 2011 revision [R].

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2014. World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights [R]. ST/ESA/SER.A/352.

王豫, 王咏薇, 赵小艳, 等. 2019. 随机玻璃—聚合物混合超材料屋顶对南京夏季降温效应的模拟分析 [J]. 气象, 45(8): 1149−1157. Wang Yu, Wang Yongwei, Zhao Xiaoyan, et al. 2019. Simulation analysis of cooling effect of randomized glass−polymer hybrid metamaterial roof in Nanjing during summer [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(8): 1149−1157. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.011

王咏薇, 蒋维楣. 2009. 多层城市冠层模式的建立及数值试验研究 [J]. 气象学报, 67(6): 1013−1024. Wang Yongwei, Jiang Weimei. 2009. Numerical study on development of a multi-layer urban canopy model [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67(6): 1013−1024. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.06.011

王咏薇, 王恪非, 陈磊, 等. 2018. 空调系统对城市大气温度影响的模拟研究 [J]. 气象学报, 76(4): 649−662. Wang Yongwei, Wang Kefei, Chen Lei, et al. 2018. Numerical study of effect of indoor-outdoor heat exchange on urban atmospheric temperature [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(4): 649−662. doi:10.11676/qxxb2018.020

谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 2015. 上海城市集群化发展显著增强局地高温热浪事件 [J]. 气象学报, 73(6): 1104−1113. Xie Zhiqing, Du Yin, Zeng Yan, et al. 2015. The exacerbated intensity and duration of the heat waves events over Shanghai as caused by urban clusters expansion [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73(6): 1104−1113. doi:10.11676/qxxb2015.075

Xu X Y, Chen F, Shen S H, et al. 2018. Using WRF-urban to assess summertime air conditioning electric loads and their impacts on urban weather in Beijing [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(5): 2475−2490. doi:10.1002/2017JD028168

Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al. 2017. Scalable-manufactured randomized glass−polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling [J]. Science, 355(6329): 1062−1066. doi:10.1126/science.aai7899

张蕾, 王咏薇, 赵小艳, 等. 2018. 城市街区形态及冷却屋顶对冠层内辐射热通量的影响 [J]. 气候与环境研究, 23(5): 563−573. Zhang Lei, Wang Yongwei, Zhao Xiaoyan, et al. 2018. A preliminary analysis of the influence of block morphology and cool roof on the

radiation heat flux in urban canopy [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(5): 563−573. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17076

张明顺, 王义臣. 2015. 北京市高温热浪脆弱性评价 [J]. 城市与环境研究, (1): 16−33. Zhang Mingshun, Wang Yichen. 2015. Research on evaluation system of heat wave vulnerability in Beijing City [J]. Urban and Environmental Studies (in Chinese), (1): 16−33.

Zhang N, Chen Y, Luo L, et al. 2017. Effectiveness of different urban heat island mitigation methods and their regional impacts [J]. Journal of Hydrometeorology, 18(11): 2991−3012. doi:10.1175/JHM-D-17-0049.1

周梦子, 王会军, 霍治国. 2017. 极端高温天气对玉米产量的影响及其与大气环流和海温的关系 [J]. 气候与环境研究, 22(2): 134−148. Zhou Mengzi, Wang Huijun, Huo Zhiguo. 2017. The influence of heat stress on maize yield and its association with atmospheric general circulation and sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(2): 134−148. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16119

周晓宇, 王咏薇, 孙绩华, 等. 2019. 冷却屋顶对北京城市热环境影响的模拟研究 [J]. 气象学报, 77(1): 129−141. Zhou Xiaoyu, Wang Yongwei, Sun Jihua, et al. 2019. A simulation study on the influence of cooling roof on the thermal environment in Beijing [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 77(1): 129−141. doi:10.11676/qxxb2018.045