

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 Y, Wang Y W, Zhao X Y, et al, 2019. Simulation analysis of cooling effect of randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof in Nanjing during summer[J]. Meteor Mon, 45(8):1149-1157(in Chinese).

## 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\*

王 豫<sup>1,2</sup> 王咏薇<sup>2</sup> 赵小艳<sup>2</sup> 郭良辰<sup>2</sup> 张艳晴<sup>2</sup>

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

2 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044

**提 要:** 为缓解南京夏季城市热环境危机, 利用天气研究和预报模式(WRF), 模拟了 3 类屋顶(普通屋顶、高反照率屋顶、随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶)对南京夏季高温天气的影响。结果表明:(1)冷却屋顶(高反照率屋顶和随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶)均可通过削弱到达城市表面的太阳辐射而使城市降温, 随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶白天平均降温为 0.8~1.2℃, 夜间平均降温为 0.2~0.4℃, 高反照率屋顶白天平均降温为 0.6~0.8℃, 夜间平均降温为 0.2℃;(2)表面温度指数可表征冷却屋顶的热力性能, 随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶的表面温度指数为 0.16~0.43, 高反照率屋顶的表面温度指数为 0.05~0.26, 表明随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶的冷却效果强于高反照率屋顶;(3)高反照率屋顶和随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶分别能将 36.7% 和 47.1% 的太阳短波辐射返回到大气层, 分别比普通屋顶少吸收 19.6% 和 34.8% 的热量。

**关键词:** 随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶, 高反照率屋顶, WRF 模式, 高温

中图分类号: X16, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.011

## Simulation Analysis of Cooling Effect of Randomized Glass-Polymer Hybrid Metamaterial Roof in Nanjing During Summer

WANG Yu<sup>1,2</sup> WANG Yongwei<sup>2</sup> ZHAO Xiaoyan<sup>2</sup> GUO Liangchen<sup>2</sup> ZHANG Yanqing<sup>2</sup>

1 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

2 Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** To alleviate the crisis of urban thermal environment of Nanjing, the Weather Research and Forecasting Model (WRF) was used to simulate the effects of three types of roofs (conventional roof, high albedo roof and randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof) during the extreme high temperature weather in Nanjing in 1–31 July 2017. The results showed that (1) cooling roofs (like high albedo roof and randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof) can reduce the temperature of cities by weakening the solar radiation reaching the surface of the city. During the daytime, the average temperature of randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof drops by 0.8–1.2℃, and the average temperature decreases 0.2–0.4℃ in the nighttime. The average temperature of the high albedo roof drops by 0.6–0.8℃ during the day and decreases 0.2℃ at night. (2) The surface temperature index can be used to characterize the thermal performance of the cooling roof. The surface temperature index of the randomized

\* 国家自然科学基金项目(41675016)、教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)和中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室开放课题(LAPC-KF-2017-09)共同资助

2018 年 4 月 20 日收稿; 2019 年 1 月 25 日收修定稿

第一作者:王豫,主要从事大气边界层与大气环境研究. Email:wy@nuist.edu.cn

通信作者:王咏薇,主要从事大气边界层与大气环境,以及陆面过程参数化方案研究. Email:wyy@nuist.edu.cn

glass-polymer hybrid metamaterial roof is 0.16—0.43. The surface temperature index of the high albedo roof is 0.05—0.26, indicating that the cooling effect of the randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof is stronger than the high albedo roof. (3) The high albedo roof and the randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof can return 36.7% and 47.1% of the solar short-wave radiation respectively. The atmosphere absorbs heat 19.6% less and 34.8% less than conventional roof.

**Key words:** randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof, high albedo roof, Weather Research and Forecasting Model (WRF), high temperature

## 引 言

联合国在 2014 年“世界城市化前景”报告中指出,随着城市化的迅速发展,全球超过 1000 万人口的超级城市已从 1990 年的 10 个变成现在的 28 个,其中增长最快的是亚非发展中国家(United Nations, 2015)。目前,我国的城镇化率已达 50%(翁清鹏等, 2015),以长三角和京津冀地区为显著代表,在全球气候变化背景下,长三角快速城市化对夏季平均最高气温上升趋势的贡献率高达 33%~68%(谢志清等, 2007),导致极端高温事件频发,严重影响了城市居民生活和健康(Li et al, 2015)。因此,如何缓解城市极端高温成为近年来的研究热点。

城市下垫面的变化对其热环境的影响尤为显著(王咏薇等, 2017)。已有研究证明街道植被(Shashua-Bar and Hoffman, 2000)、反光路面(Akbari and Matthews, 2012)、白色屋顶(Oleson et al, 2010)、太阳能屋顶(Masson et al, 2014)和冷却材料屋顶(Salamanca et al, 2016)等方式有明显的冷却效果。在屋顶上铺设具有高反照率和高红外发射率的冷却材料,可减少太阳辐射对建筑物的加热与储存,降低环境温度。目前,已有学者通过数值模拟的方法评估以上各类屋顶的降温效果, Oleson et al (2010)采用 Community Atmosphere Model version 3.5 进行模拟, 1941—1999 年夏季在全球城市区域内铺设高反照率屋顶后,城市区域日最大降温为 0.6℃,最小降温为 0.3℃;Salamanca et al(2016)采用 Weather Research and Forecasting-Multilayer Urban Canopy Scheme 和 Building Energy Model 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太阳能屋顶,结果显示 2 m 气温降低了 0.8℃,并且减少了 13%~14% 电力能源需求;Sun et al(2016)采用 Weather Research and

Forecasting-Princeton Urban Canopy Model 方案模拟了 2010 年 7 月 4—7 日在中国北京铺设绿色屋顶后,城市区域内表面温度降低了 0.22~2.5℃。

在理想条件下,模拟绿色屋顶及太阳能屋顶均会在一定程度上缓解高温现象,但必须考虑绿色屋顶需要定期维护,成本较高(Sun et al, 2016),太阳能板的生产会带来重污染问题(卢兰兰等, 2013)。Zhai et al(2017b)卷轴生产,用于日间辐射制冷、可规模化实测的随机玻璃-聚合物混合超材料,该降温薄膜可完全透过太阳辐射,在屋顶上铺设时,将朝下的一面镀银,太阳光会就被该混合超材料反射回去,使其具有高反照率(0.96),高红外发射率(0.93),接近理想黑体。它可以在没有制冷剂,没有电力的条件下实现 24 h 为建筑降温。试验及理论上的研究表明,该材料铺设于屋顶可以缓解城市极端高温,然而在实际天气中,该材料的降温特性还需要进一步去验证。

基于以上背景,本研究选择长三角典型大城市南京(沈滢洁等, 2017)作为研究对象,以 2017 年 7 月的城市高温热浪事件高发时段为研究时段,评估和量化随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶对南京极端高温天气的降温效应。

## 1 模式及资料

### 1.1 WRF 模式简介

Weather Research and Forecasting Model (WRF)是新一代非静力可压缩的中尺度天气预报模式(Richardson, 2007)。目前其被广泛应用于城市气象的相关研究(Zhai et al, 2017a)。本次研究采用耦合了单层城市冠层模式(Single-Layer City Canopy Model, SLUCM)的中尺度数值天气预报模式 WRF3.7.1 版本(Kusaka et al, 2001)。

## 1.2 模拟算例

选取 2017 年盛夏 7 月 1—31 日为研究时段,该段时间南京以晴朗小风天气为主,7 月 1—2 日有降水,15—31 日连续 17 d 全市范围内温度超过 35℃,主导风向为偏南气流。模拟采用双向反馈的三重嵌套(图 1),模拟中心经纬度为 32.06°N、118.8°E,水平分辨率分别为 9、3、1 km,最内层包含南京主城区及周边郊区,下垫面数据选用分辨率为 1 km 的 MODIS(30 s)数据。初始和边界条件选用 NCEP 提供的 1°×1°再分析资料,该资料每 6 h 更新一次,为评估在夏季高温天气背景下,高反照率屋顶、随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶对南京城区辐射传输过程及热环境的影响,本文采用 3 个算例进行模拟分析,算例设置参见表 1。模拟区域及地形高度分布参见图 1a,最内层 MODIS 下垫面类型分布参见图 1b。模式中短波辐射方案选用 Dudhia(1989)方案,长波辐射方案选用 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)方案(Mlawer et al,1997),微物理方案选用 Singlemoment 6-Class Microphysics Scheme (SWM6)(Hong et al,2004)。模拟区域中最内层没有选用积云参数化方案。城市冠层参数化方案中建筑物的合理设定能够更准确地模拟出气象条件,算例中一些物理参数的选取参考肖丹等(2011)、苗世光等(2007)及沈滢洁等(2017)的工作,建筑物相关参数的设置(楼房高度、屋顶宽度、街道

宽度和人工材料在城市中的占比)参考对南京城区楼房形态的实地测量得出。热系数(如热容量、热传导率和比辐射率)是根据南京屋顶、墙面、街道的实际材料确定,使模拟结果与观测结果尽量相符,因此在一定程度上可以代表南京典型城市地区,具体参数的设置参见表 1。

## 2 模拟结果验证

本文采用南京市 5 个气象站点的观测数据,观测资料包括 2017 年 7 月 1—31 日每 3 h 气温(2 m)、风速(10 m)对控制算例(CTRL)的结果进行评估。图 2a、2c 分别为 2 m 气温和 10 m 风速控制算例模拟值(红线)与 5 个站点观测数据平均值(黑线)的对比图,图 2b、2d 则为相应的相关关系图。由图 2a、2b 可见,2 m 气温模拟结果同实际观测的变化趋势基本吻合,相关系数为 0.97。在 15 时达到气温最高值,06 时左右为最低值。模拟与观测值的最大偏差均在 3℃以内,白天模拟值与观测值存在明显温差,最大温差出现在 12—14 时,平均达 2℃左右。主要的原因是 SLUCM 方案将人为热排放量设置为 90 W·m<sup>-2</sup>(Chen et al,2016),而 2017 年 7 月南京有连续 17 d 的持续高温热浪天气,空调效应会加大对大气带来废热,导致实际人为热排放源远大于模式默认设置。另外,王咏薇等(2013)的研究表明,由于缺乏实际的观测数据,模拟采用的建筑物形

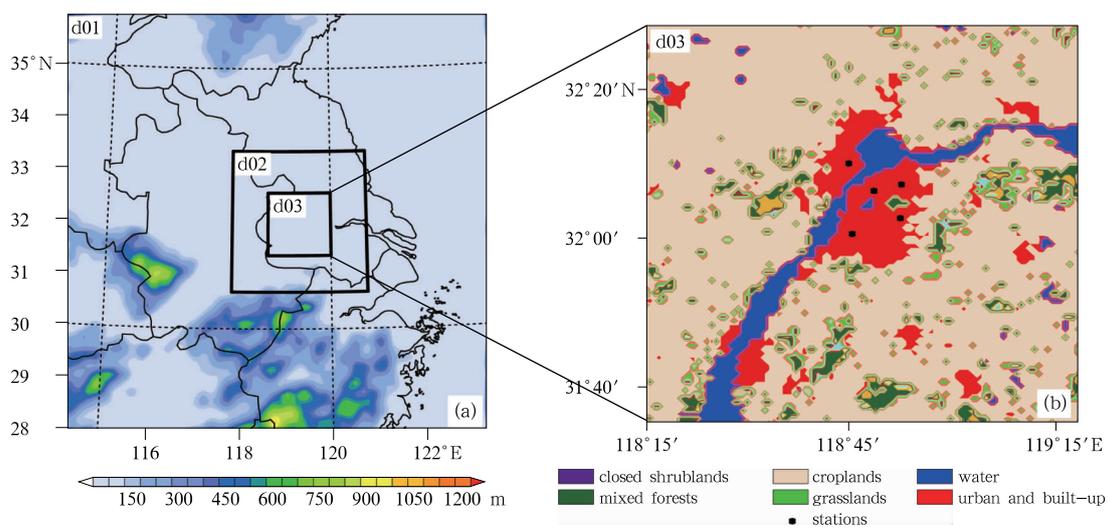


图 1 WRF 模拟区域及地形高度分布(a),最内层 MODIS 下垫面分布(b,黑点为气象站点的位置)

Fig. 1 WRF simulation area and terrain height (a), the innermost underlying surface (b, black spots are the location of weather station)

表 1 模拟算例和城市参数设置

Table 1 Numerical cases and setting of urban parameter

算例	CTRL	HR	SR
屋顶类型	普通屋顶	高反照率屋顶	随机玻璃-聚合物
混合超材料屋顶反照率	0.2(Georgescu et al,2014)	0.65(Jacobson and Ten Hoeve,2012)	0.96(Zhai et al,2017b)
屋顶发射率	0.9(Georgescu et al,2014)	0.9(Jacobson and Ten Hoeve,2012)	0.93(Zhai et al,2017b)
模拟时间	2017 年 7 月 1—31 日		
模拟中心区域	南京(32.06°N,118.8°E)		
初始及边界条件	NCEP FNL 1°×1°		
嵌套	3 层(100×100,88×88,100×100)		
分辨率/m	9000,3000,1000		
建筑高度/m	30		
屋顶宽度/m	10		
街道宽度/m	10		
路面/屋顶/墙面热容量/J·m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	1.75×10 <sup>6</sup>		
物理方案	Noah 陆面过程、单层城市冠层(SLUCM)、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、MYJ 边界层方案、WSM6 微物理方案		

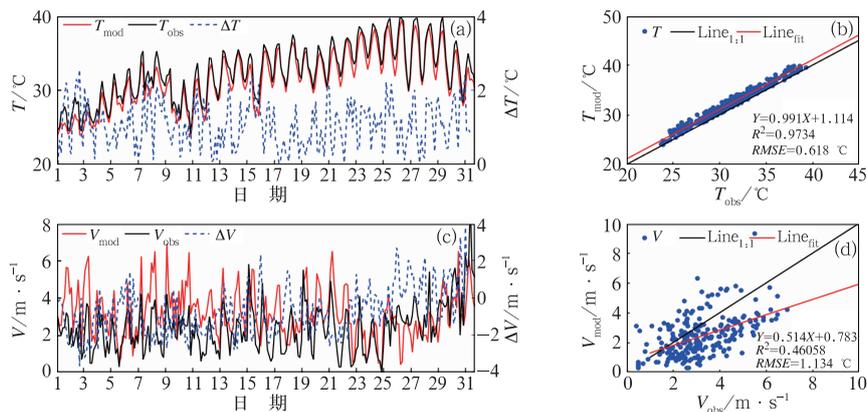


图 2 2017 年 7 月 1 日 00 时至 31 日 00 时 2 m 气温(a,b)、10 m 风速(c,d)模拟值与观测值对比(a,c)及其相关系数(b,c)

(黑色实线为观测值,红色实线为模拟值,蓝色虚线为观测值与模拟值的差值)

Fig. 2 Comparisons of simulated and observed values (a, c) of 2 m air temperature (a, b), 10 m wind speed (c, d) and the relevance diagrams (b, d) in 1–31 July 2017 (Solid black line shows the observed value, solid red line shows the simulated value, and blue dotted line shows the difference between observed and simulated values)

态参数,有可能存在低估建筑物高宽比,从而导致模拟温度相对较低。由图 2c,2d 可见,10 m 风速模拟结果与实际观测值相比,整体偏大,相关系数为 0.46。模拟与观测值的偏差平均达到  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,这主要是由于 SLUCM 方案没有考虑建筑物的详细外形特征,冠层内 10 m 风速是由大气模式第一层的风速值取对数得到的,假设所有城市建筑物采用统一的高度分布,这样会造成城市下垫面的动力粗糙度被低估,导致模拟的 10 m 风速大于实际值。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶对近地表气温的影响

不同类型的冷却屋顶与控制算例在 2017 年 7 月 1—31 日白天(07—19 时)和夜间(20 时至次日 06 时)2 m 气温差的平均值(图 3),其中南京城市区域处于被黑色实线包围的地区。从图中可以看出,

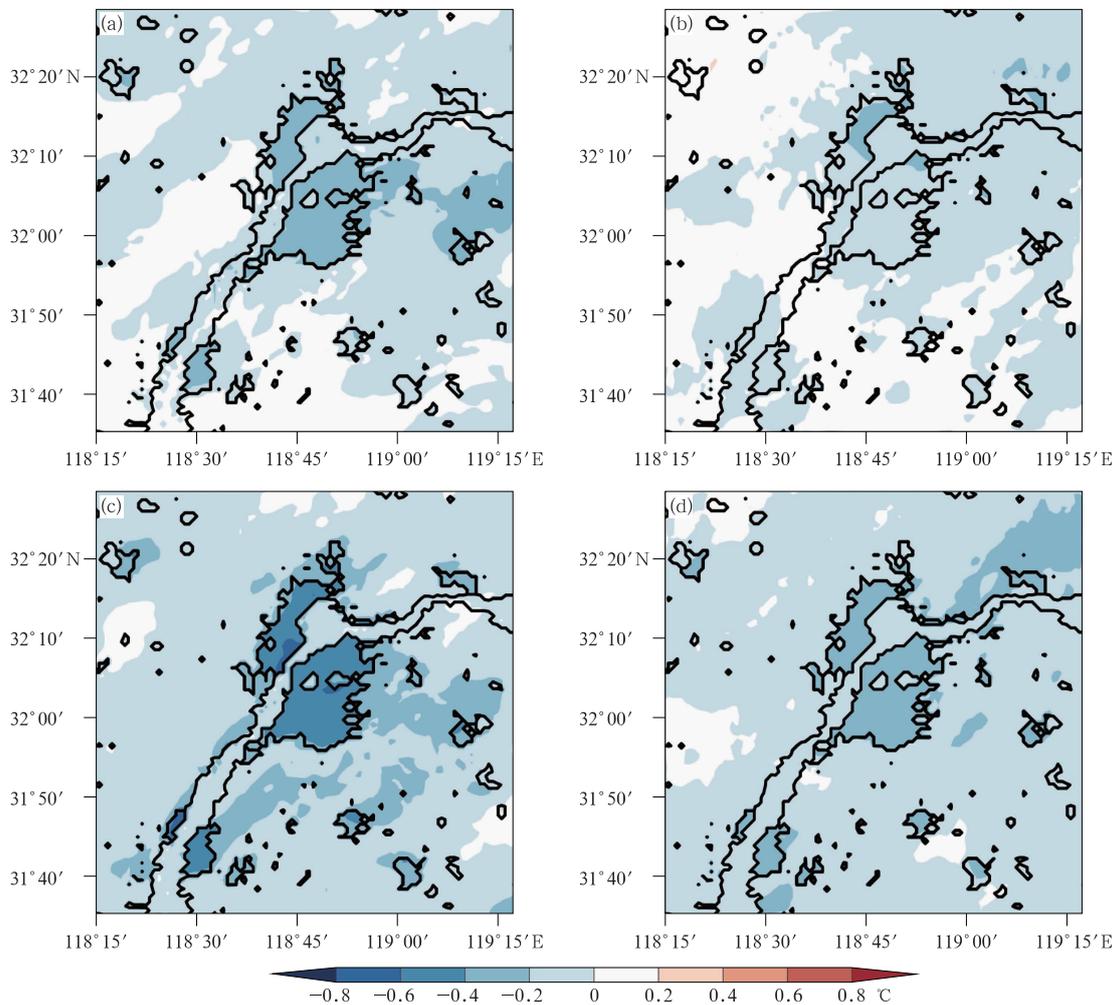


图 3 2017 年 7 月 1—31 日(a,c)白天,(b,d)夜间高反照率屋顶(a,b)、随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶(c,d)与控制算例 2 m 气温差平均值

Fig. 3 The mean 2 m air temperature difference value between high albedo roof (a, b), randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof (c, d) and control of day (a, c) and control of night (b, d) respectively during 1—31 July 2017

随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶和高反照率屋顶的铺设均对 2 m 气温有明显的影响。随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶降温效果整体比高反照率屋顶高 0.2℃,且白天降温效果明显优于夜间。这是由于模拟算例假设高反照率屋顶会将 65% 的太阳短波辐射反射回大气,自身热红外发射率为 0.9,假设随机玻璃-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 0.93,两者均减少了到达地面的短波辐射用于加热大气的短波辐射。

如图 3c,铺设随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶会使得白天南京城区 2 m 气温平均降低 0.8~1.2℃,郊区气温平均降低 0.2~0.6℃;由图 3d 可

见,夜间城区降温也达到了 0.2~0.4℃,约为白天降温效果的 1/2。由图 3a 可见,对于高反照率屋顶,铺设后白天南京城区 2 m 气温平均降低 0.6~0.8℃,郊区气温平均降低 0~0.2℃;由图 3b 可见,夜间南京城区降温也达到了 0.2℃左右。

### 3.2 随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶对城市热环境的影响

给定一定的空气温度( $T_a$ ),较高的表面温度( $T_s$ )通常伴随着较高的感热通量,加热大气。由于在 SLUCM 方案中,假设城区由建筑物和街道按比例构成,大面积铺设高反照率屋顶和随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶的使用会造成城市表面温度降

低,为进一步了解两种冷却屋顶的热力性能,采用归一化指标即表面温度指数( $IT$ )表征铺设冷却屋顶后城市表面温度的降低程度,公式如下(Sun et al, 2013):

$$IT = \frac{(T_{Ctrl} - T_{actrl}) - (T_i - T_{actrl})}{T_{Ctrl} - T_{actrl}} = \frac{T_{Ctrl} - T_i}{T_{Ctrl} - T_{actrl}} \quad (1)$$

式中, $T_{Ctrl}$ 、 $T_{actrl}$ 分别为铺设普通屋顶时的城市地表温度、2 m 气温; $i$  指示不同的冷却屋顶, $i=1$  时, $T_1$  为铺设高反照率屋顶时的城市地表温度, $i=2$  时, $T_2$  为铺设随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶时的城市表面气温。随着指标的增加,由冷却屋顶引起的温度梯度降低程度越大,即冷却屋顶的热力性能得到改善,当  $IT=0$  时,冷却屋顶没有降温效应,当  $IT=1$  时,冷却屋顶降温效应最大。

如图 4 所示,对于随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶其  $IT$  值变化范围在 0.16~0.43,对于高反照率屋顶其  $IT$  值变化范围在 0.05~0.26,表明随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶的冷却效应优于高反照率屋顶。7 月 1—2 日  $IT$  值处于较低值(0.1 左右),这是由于该段期间南京有少量降水,太阳辐射强度较弱,导致屋顶蒸发能力减弱,降温效应低于其他时段。

高反照率屋顶  $IT$  值位点的范围比随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶窄,通过对气象条件的研究发现:(1)在晴天,尽管两类冷却屋顶的中值不同, $IT$  值保持稳定,有少量波动;(2)7 月 1—2 日,出现较低的百分位值(第 25%分位点)对应该段时间内南京有降雨事件发生,蒸散量大;(3)7 月 15—31 日,连续 17 d 的持续高温热浪背景下,出现较高的百分位值(第 75%分位点)。

### 3.3 随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶对辐射传输过程的影响

气温的变化是由下垫面表面能量平衡的变化引起的,为进一步量化两种屋顶对城市地表能量的影响,图 5 为南京城区各类屋顶地表能量月均值的分配情况,对比图 5a~5c 可知:对于传统普通屋顶,其吸收净辐射的月平均为  $156 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,用于加热大气的感热通量值最高,可达  $135 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,78.3% 的能量被反射回大气;高反照率屋顶吸收的净辐射月均值比普通屋顶减少了  $30.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,将 82.9% 的能量反射回大气;而随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶相比与普通屋顶,其吸收的净辐射月均值减少了  $54.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,将 85.4% 的能量反射回大气,感热通量月均值减少了  $40.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,潜热通量月均值

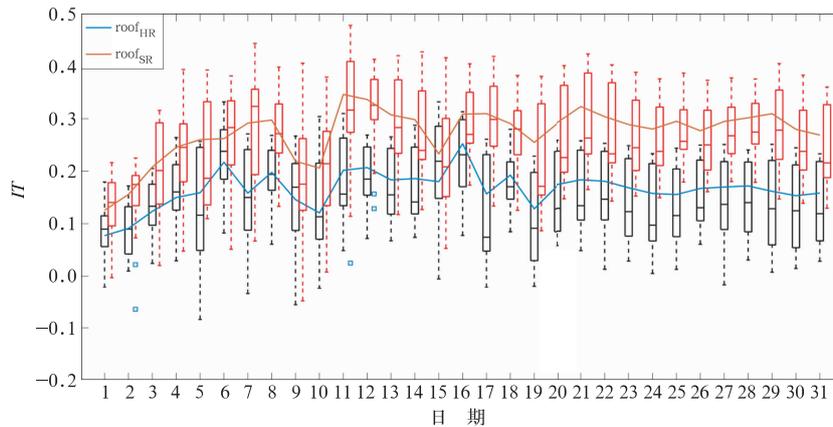


图 4 2017 年 7 月 1—31 日冷却屋顶表面温度指数( $IT$ )日变化  
(红色箱式图为随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶的  $IT$ ,中线表示中值,误差线分别表示第 75%和第 25%分位;黑色箱式图为高反照率屋顶的  $IT$ ;橘色和蓝色实线分别为随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶和高反照率屋顶  $IT$  均值的连线)

Fig. 4 Daily change of the surface temperature index ( $IT$ ) of cooling roof during 1—31 July 2017

(Red box shows the  $IT$  of the randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof, middle line indicates the median value, error bars indicate the 75th and 25th percentage points, respectively; The black box chart shows the  $IT$  of high albedo roof; The orange and blue solid lines are average of the randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof and the high albedo roof, respectively)

减少了  $13.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 土壤热通量月均值增加了  $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这主要是由于冷却屋顶的降温作用是通过将太阳短波辐射反射回大气层, 同时尽可能多地将自身热量以波长  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的红外线形式发射出去, 对于这个波长的红外线, 地球大气层是透明的, 不会进行反射、吸收和散射。

为进一步分析随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶对辐射过程日变化的影响, 选取地表能量的日均值进行分析。图 6 中黑色实线表示普通屋顶, 红色实线表示高反照率屋顶, 蓝色实线表示随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶, 可看出, 三类屋顶的感热通量和净辐射均存在明显的日变化, 呈单峰型特征, 其中感热通量日最高值出现在 14 时左右, 净辐射日最高值出现在 12 时左右。对于感热通量来说, 三类屋顶

的日变化趋势一致, 夜间三者的差值较小, 均在  $10 \sim 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 白天三者差值可达到  $50 \sim 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 14 时差值最大, 这是由于随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶和高反照率屋顶相比普通屋顶来说, 夜间能量交换弱于白天, 且白天它们自身吸收的热量少于普通屋顶, 导致感热通量减少, 在 14 时累积达到最大。

三类屋顶的地面热通量均具有典型的单谷型日变化特征(图 6b), 日最大土壤热通量出现在 13 时, 约为  $-335 \sim -280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 在白天, 地面热通量绝对值增加, 夜间稍有减少。综上可知, 在白天随机玻璃-聚合物混合超材料和高反照率等冷却屋顶降低 2 m 气温是由于表面净辐射大幅减少, 导致加热大气的感热通量显著减小; 在夜间, 由于白天地面储

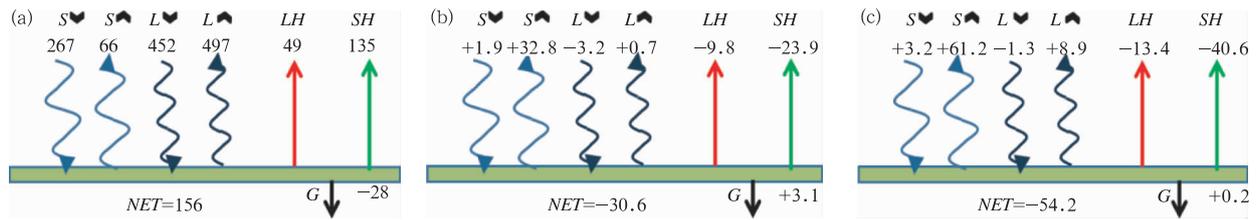


图 5 2017 年 7 月 1—31 日南京城区地表能量平衡月均值(单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

(a) 普通屋顶, (b) 高反照率屋顶, (c) 随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶

(S: 太阳短波辐射, L: 太阳长波辐射, NET: 净辐射, LH: 潜热通量, SH: 感热通量, G: 热存储; 向上和向下的通量用箭头表示)

Fig. 5 Mean surface energy balance averaged in Nangjing urban for the entire 31 d extreme heat period in July 2017 (unit:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

(a) conventional roof, (b) high-albedo roof, (c) randomized glass-polymer hybrid metamaterial roof

(S: solar radiation, L: longwave radiation, NET: net radiation, LH: latent heat flux, SH: sensible heat flux, S: storage; downward and upward fluxes are identified by arrows)

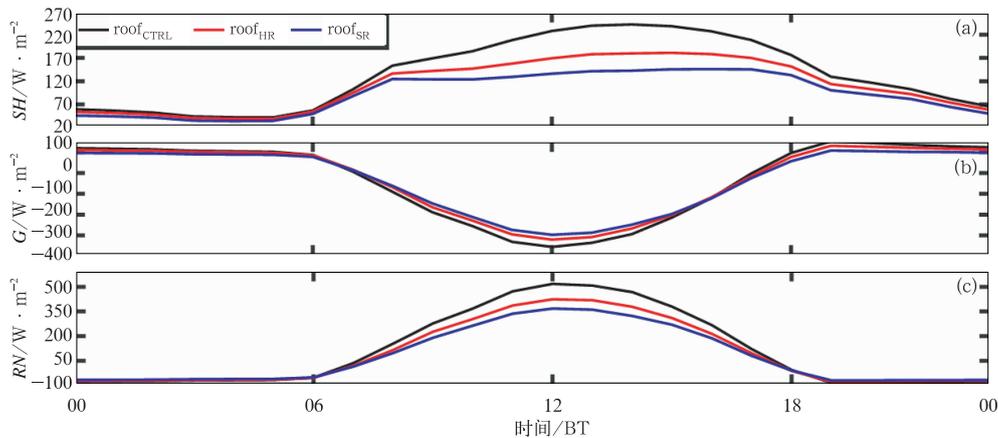


图 6 地表能量平衡日均值变化

(a) 感热通量(SH), (b) 地面热通量(G), (c) 净辐射(RN)

Fig. 6 Mean diurnal variation of surface energy balance

(a) sensible heat flux (SH), (b) surface heat flux (G), (c) net radiation (RN)

存的热量减少,可释放加热气温的热量减小,且无太阳短波辐射,导致温度降低。

## 4 结 论

本研究采用耦合了单层城市冠层方案(SLUCM)的 WRF 模式,探讨了南京 2017 年 7 月 1—31 日,冷却屋顶(高反照率、随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶)对南京盛夏高温的影响。得到如下初步结论:

(1) 在持续高温的天气背景下,两类冷却屋顶均对近表面气温有降低作用。不同冷却屋顶类型,降温程度也有差异,随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶的降温效果优于高反照率屋顶,两者的降温温差在 0.2~0.4℃,夜间两类冷却屋顶的降温效果均弱于白天。

(2) 冷却屋顶对城市热环境的影响,采用表面温度指数评估两种冷却屋顶对城市表面温度的降低程度,高反照率屋顶和随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶其表面温度指数变化范围分别在 0.05~0.26 和 0.16~0.43,表明随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶的冷却效应优于高反照率屋顶。

(3) 冷却屋顶对辐射传输过程有一定的影响,其中对太阳辐射的影响占到 85%,高反照率屋顶和随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶分别能将 36.7% 和 47.1% 的太阳短波辐射返回到大气层,随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶将太阳短波辐射反射回大气层的能力强于高反照率屋顶,并且还能够尽可能多地向外发射自身热量,它比普通屋顶多放出了  $8.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  的长波辐射,表明随机玻璃-聚合物混合超材料屋顶对辐射过程的影响大于高反照率屋顶。

本文是在一种极为理想的情况下假设建筑物屋顶上 100% 覆盖随机玻璃-聚合物混合超材料和高反照率材料,这一假设只能作为评估两类冷却屋顶潜在好处的参考。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,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

卢兰兰,毕冬勤,刘壮,等,2013. 光伏太阳能电池生产过程中的污染问题[J]. 中国科学:化学,43(6):687-703. Lu L L, Bi D Q, Liu Z, et al, 2013. Pollution problems in the production process of

solar cells[J]. Sci Sin Chem, 43(6):687-703(in Chinese).

- 苗世光,王晓云,蒋维楣,等,2007. 城市小区规划对大气环境影响的评估研究[J]. 高原气象,26(1):92-97. Miao S G, Wang X Y, Jiang W M, et al, 2007. Impact assessment of urban sub-domain planning on the atmospheric environment[J]. Plateau Meteor, 26(1):92-97(in Chinese).
- 沈滢洁,王成刚,曹乐,等,2017. 屋顶绿化对城市降温效应的模拟分析—以南京市为例[J]. 气象,43(5):610-619. Shen Y J, Wang C G, Cao L, et al, 2017. A case study of simulated cooling effect of roof greening in urban area of Nanjing[J]. Meteor Mon, 43(5):610-619(in Chinese).
- 王咏薇,伍见军,杜钦,等,2013. 不同城市冠层参数化方案对重庆高密度建筑物环境的数值模拟研究[J]. 气象学报,71(6):1130-1145. Wang Y W, Wu J J, Du Q, et al, 2013. Numerical study of the Chongqing high-density buildings environment by the WRF with the different urban canopy schemes[J]. Acta Meteor Sin, 71(6):1130-1145(in Chinese).
- 王咏薇,翟雪飞,齐德莉,等,2017. 城市下垫面扩张对局地热力环流影响的模拟[J]. 科学技术与工程,17(3):16-29,35. Wang Y W, Zhai X F, Qi D L, et al, 2017. Simulation of the land-use change effect on urban local thermodynamic circulation[J]. Sci Technol Eng, 17(3):16-29,35(in Chinese).
- 翁清鹏,张慧,包洪新,等,2015. 南京市通风廊道研究[J]. 科学技术与工程,15(11):89-94. Weng Q P, Zhang H, Bao H X, et al, 2015. Study on ventilation channels of Nanjing City[J]. Sci Technol Eng, 15(11):89-94(in Chinese).
- 肖丹,陈静,陈章,等,2011. 成都精细下垫面信息对城市气象影响的模拟试验[J]. 气象,37(3):298-308. Xiao D, Chen J, Chen Z, et al, 2011. Effect simulation of Chengdu fine underlying surface information on urban meteorology[J]. Meteor Mon, 37(3):298-308(in Chinese).
- 谢志清,杜银,曾燕,等,2007. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响[J]. 地理学报,62(7):717-727. Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al, 2007. Impact of urbanization on regional temperature change in the Yangtze River Delta[J]. J Geogr Sci, 62(7):717-727(in Chinese).
- Akbari H, Matthews H D, 2012. Global cooling updates: reflective roofs and pavements[J]. Energy Build, 55:2-6.
- Chen L, Zhang M G, Wang Y W, 2016. Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions: a case study of Nanjing, China[J]. Theor Appl Climatol, 125(3/4):713-728.
- Dudhia J, 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. J Atmos Sci, 46(20):3077-3107.
- Georgescu M, Morefield P E, Bierwagen B G, et al, 2014. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 111(8):2909-2914.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H, 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation[J]. Mon Wea Rev, 132(1):103-120.

- Jacobson M Z, Ten Hoeve J E, 2012. Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate[J]. *J Climate*, 25(3): 1028-1044.
- 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 Meteorol*, 101(3): 329-358.
- Li D, Sun T, Liu M F, et al, 2015. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves[J]. *Environ Res Lett*, 10(5): 054009.
- Masson V, Bonhomme M, Salagnac J L, et al, 2014. Solar panels reduce both global warming and urban heat island[J]. *Front Environ Sci*, 2: 14.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres; RRTM, a validated correlated- $k$  model for the longwave[J]. *J Geophys Res Atmos*, 102(D14): 16663-16682.
- 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): L03701.
- Richardson L F, 2007. *Weather Prediction by Numerical Process* [M]. New York: Cambridge University Press; 1-236.
- 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 Meteorol*, 161(1): 203-221.
- Shashua-Bar L, Hoffman M E, 2000. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street; an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees[J]. *Energy Build*, 31(3): 221-235.
- Sun T, Bou-Zeid E, Wang Z H, et al, 2013. Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport[J]. *Build Environ*, 60: 211-224.
- Sun T, Grimmond C S E, Ni G H, 2016. How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves? [J]. *J Geophys Res Atmos*, 121(10): 5320-5335.
- United Nations, 2015. *World urbanization prospects; the 2014 revision, population division*[R]. New York: United Nations.
- Zhai W W, Lim T K H, Zhang T, et al, 2017a. The spatial organization of intra-tumour heterogeneity and evolutionary trajectories of metastases in hepatocellular carcinoma[J]. *Nat Commun*, 8: 4565.
- Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al, 2017b. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. *Science*, 355(6329): 1062-1066.