

引用格式:郭良辰,王咏薇,张艳晴.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,2018,18(21):16—23

Guo Liangchen, Wang Yongwei, Zhang Yanqing. Mitigative effect of cool roof on summer high temperature in Nanjing area[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(21): 16—23

冷却屋顶对南京夏季高温天气的缓解作用

郭良辰^{1,2} 王咏薇^{1,2*} 张艳晴¹

(南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室大气环境中心¹,大气物理学院²,南京 210044)

摘要 冷却屋顶的安装预计能在一定程度上缓解城市化所带来热环境的破坏。利用耦合了城市单层冠层方案(UCM)的WRF模式,以南京2010年7月26日~8月5日夏季晴天小风天气为背景,模拟了不同高反照率屋顶和绿色屋顶的安装对城市高温的缓解效应。结果表明:①反照率为0.8的高反照率屋顶和100%的绿色屋顶有相似的降温效果,白天平均降温0.5℃,夜间平均降温0.1~0.2℃,一天中最大降温0.9℃,同时在建筑物密度集中的地区,降温效果更明显;②不同反照率的屋顶和不同比例的绿色屋顶对气象因子的影响效果不同,屋顶反照率和绿色屋顶比例的增加会使温度降低、风速减小、边界层降低,且呈线性变化;③反照率为0.8的高反照率屋顶和100%的绿色屋顶在白天可以降低人体舒适度(分别为0.2左右和0.1左右),提高人体舒适程度。

关键词 高反照率屋顶 绿色屋顶 高温 舒适度

中图法分类号 P49; **文献标志码** B

中国是世界第一人口大国,当前中国正在经历一场巨大的乡村向城市的人口迁移运动。预计到2050年,中国城市化比例达到70%,中国城市人口达到11.6亿^[1]。城市迅速扩张引发的城市热岛、气候变化、生态环境和能源供给^[2]等显著的现象引发了科学家们的广泛关注。城市对气候变化适应的成功与否,关键在于城市如何选择扩张途径和发展方式^[3]。在未来一个世纪内,城市选择不同的发展方式,将会导致全球及局地气候的严重恶化或显著减缓^[4,5]。此外,目前城市高温带来的死亡率的急剧增长,以及相应的健康问题也受到了科学领域高度的重视。

为了使得城市发展与生态环境变化相协调,科学家们着力探索减缓城市热岛的方法。已有的研究表明,采用冷却屋顶,即增加屋顶的太阳短波反射率(反照率)或者在屋顶上种植绿色植物,可以冷却建筑物、减少空调能耗,并降低城市室外的空气温度^[6],从而缓解城市热岛效应,使城市适应生态环境的发展,并在一定程度上缓解气候变化影响提供

了一种有效的方法^[4,7—10]。

高反照率屋顶及绿色屋顶在不同的气候条件下对热岛的缓解效应不同。已有研究表明,与常见的水泥屋顶相比,这两种冷却屋顶都能够有效地降低城市区域最高温度或者平均温度,最高可达3 K^[11,12]。然而不同的冷却屋顶对于热岛减缓的影响受到气候状况(包括太阳辐射强度、环境温度、环境湿度、风速和降水)的影响,其对热岛的缓解能力有所不同。晴好天气条件下,高反照率屋顶对于热岛具有明显的缓解效应^[13],但是在温和和寒冷的气候条件下,绿色屋顶的缓解效应更为明显^[14]。然而在人口最多,城市化发展最快的中国,相关的研究开展较少;且多集中于京津冀地区与珠三角地带,比如Sun等对京津冀地区的模拟表明高反照率屋顶的使用,可以有效抵消由城市扩张带来的城市热岛效应;绿色屋顶的使用可以降低近地面气温,增加相对湿度;相似的结论也出现在以广州为对象的模拟中^[15,16]。但是,现有的这些研究并不能说明中国东部夏季高温高湿的城市建筑物密集区采用何种屋顶能够对高温进行有效缓解。

目前,冷却屋顶的设置能够有效地降低城市气温已经得到广泛的验证^[17—22],其中高反照率屋顶是采用直接反射太阳辐射从而达到降温的方法;而绿色屋顶是将能量的分配倾向为潜热的方向,使得城市蒸发量增大,湿度增加。已有的研究表明,气温适中时,湿度对人体的影响并不显著;而当气温较高或

2018年2月1日收到 国家自然科学基金(41675016)、江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)、教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)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)资助
第一作者简介:郭良辰,男,河南人,硕士研究生。研究方向:大气边界层与大气环境。E-mail: 412430525@qq.com。

*通信作者简介:王咏薇,女,新疆人,博士,副教授。研究方向:大气边界层与大气环境,以及陆面过程参数化方案。E-mail: wwy@nuist.edu.cn。

较低时,湿度波动对人体的热平衡就非常重要^[23]。尤其在温度较高时,湿度的增加会影响人体排汗,加剧人体对热的感觉。同时,风可以使大气热的传导和对流加强,从而加快身体热量散失。一般地说,风力每大一级,体感温度可下降3℃。虽然两种屋顶在一定程度上可以降低城市地区温度,缓解高温天气;但还伴随着比湿的增加和风速减小,这在一定程度上不利于人体的舒适程度。这些冷却屋顶的措施在高温的环境下是否会使人体舒适度增长,从而有效的缓解由高温引发的死亡率及疾病高发的问题?目前已有的研究中,仅Sun等^[15]引入表观温度进行了初步的探讨。

本研究以南京作为中国东部建筑物密集城市的代表,来探讨高反照率冷却屋顶、绿色屋顶对城市高温的缓解作用,从而为缓解中国大城市热岛效应提供理论依据。

1 模式及方法

1.1 模拟区域及方案选择

以2010年7月26日~8月5日,夏季高温天气作为背景天气,运用WRF3.7.1中尺度天气预报模式开展研究^[24]。模拟采用三重嵌套,格点数为100×100、88×88和100×100,网格距为9 km、3 km和1 km。模拟区域的中心经纬度为32.06°N,118.8°E,其中最内层包含南京主城区以及周边郊区,垂直方向分为53层,其中2 km以下有22层。初始和边界资料采用NCEP(national centers for environmental prediction)1°×1°的分析资料。模拟嵌套区域的地形高度分布及最内层下垫面分布如图1所示。图1中放大图为中红色区域为本次研究的南京城市地区,黑色实点代表自动气象站的位置。

模拟过程中参数化方案的选取至关重要。本研究选取Chen等^[25,26]开发的Noah陆面过程,其在较低的边界层中可以较好地提供地表感热、潜热和

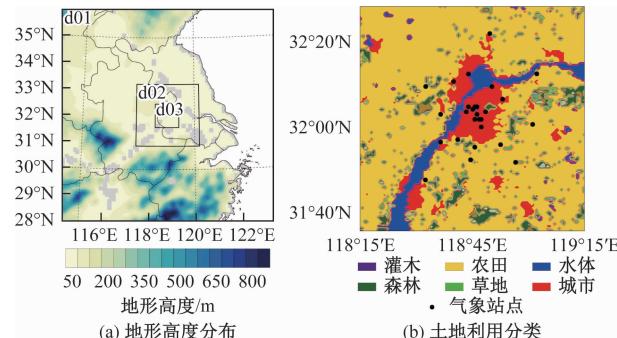


图1 WRF模拟区域的地形高度分布及最内层下垫面分布

Fig. 1 Topographic height distribution and the innermost landuse distribution in WRF simulation area

地表温度等变量;当前Noah陆面参数化方案中有UCM、BEP和BEP+BEM三种城市冠层参数化方案可供选择;其中UCM方案,于2014年由Yang改进,引入了绿色屋顶的计算方案。其他物理参数化方案的选择参考Chen^[27],如下所示:YSU边界层方案^[28],WSM 6-class graupel微物理方案^[29],rrtm长波方案^[30],Dudhia短波方案^[31]以及Monin-Obukhov地表方案^[32],由于研究区域具有高分辨率,所以Grell 3D积云只使用在最外层。

1.2 算例及参数设置

城市冠层参数化方案中建筑物参数的合理设定能够更准确地模拟出气象条件^[33]。算例中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)通过对南京城市中心区域的楼房形态的统计得出。热系数(如热容量、热传导率和比辐射率)根据屋顶、墙面、街道的实际材料确定,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。

为了评估绿色屋顶、高反照率屋顶在夏季高温天气对南京地区温度、相对湿度和风速等气象因素的影响,本研究设计了3组共8个算例,设计方案如表1所示。算例CTRL使用反照率为0.2的传统屋顶,用以模拟真实条件下南京地区气象因素。由于南京属于亚热带季风气候,雨量充沛,因此GR算例中土壤含水量设为0.33 m³/m³,算例GR1~GR4分别为25%、50%、75%和100%占比的绿色屋顶。EPA (environmental protection agency of the United States) Energy Star认为高反照率屋顶在最初的反照率应达到0.65,并且在安装的3年后仍然需达到0.5以上。考虑到目前中国面临严重的空气污染,

表1 模拟算例和城市参数设置

Table 1 Numerical cases and urban parameter's setting

算例名称	传统屋 (CTRL)	绿色屋顶 (GR1-GR4)	高反照率屋顶 (HR1-HR3)
屋顶反照率	0.2	0.2	0.4,0.6,0.8
叶面积指数	—	1.5	—
绿色屋顶占比	—	25%,50%,75%,100%	—
土壤含水/(m ³ ·m ⁻³)	—	0.33	—
楼房高度/m		30	
屋顶宽度/m		10	
街道宽度/m		20	
热容量/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)		1.75 × 10 ⁶	
热传导率		1.5	
墙面反照率		0.2	
街道反照率		0.1	
比辐射率		0.98	

高反照率屋顶会受到大气颗粒物的污染影响以及本身老化,从而降低其表面反照率,因此在算例HR1~HR3中将屋顶反照率分别设置为0.4、0.6和0.8。

1.3 舒适度计算

舒适度指数的计算方法为^[23]

$$SSD = 1.88T - 0.55(1.8T - 26)(1 - U) - 3.2V^{\frac{1}{2}} + 3.2 \quad (1)$$

式(1)中,SSD为舒适度指数,T是气温,U是相对湿度,V是风速。计算所得的SSD值越大,说明天气越酷热,人体感受越不舒服。

2 模式评估

通过2010年7月26日20:00~8月5日20:00模式模拟的2 m气温(℃)、相对湿度和风速(m/s)与自动气象站的观测数据对比可知(如图2):模拟的2 m气温与相对湿度不仅拥有与实际观测数据相同的变化趋势而且模拟结果与实际观测结果偏差较小。其中观测结果与模拟结果的2 m气温差除在个别时刻达到3℃,其余均在2℃以内,相关性为0.95;同样,模拟与观测结果的相对湿度的差值均在0.2以内,相关性为0.88。而10 m风速的模拟效果略差,相关系数为0.65,模拟值偏大。这可能由于SLUCM方案没有详细考虑冠层内建筑物的外形特征,冠层内10 m风速是大气模式第一层的风速值取对数得出的。而大气模式的第一层高度在建筑物高度之上,UCM假设建筑物的高度都是均一的,这样就低估了城市下垫面的动力粗糙度,导致大气模式的风速较大,从而导致10 m风速值比实际值偏大。

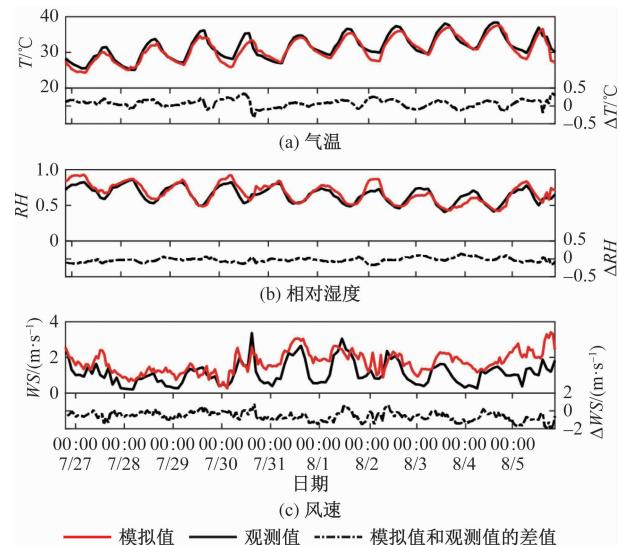


图2 2 m气温、相对湿度和10 m风速模拟值与观测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and observed 2 m temperature, relative humidity and 10 m wind speed

3 结果分析

3.1 冷却屋顶对城市地区高温的缓解作用

冷却屋顶对缓解城市高温天气有重要的作用,着重分析反照率为0.8的高反照率屋顶(HR3)和100%覆盖率的绿色屋顶(GR4)对城市高温的缓解作用。图3为HR3和GR4与控制算例(CTRL)夜间(0:00~7:00)、白天(10:00~18:00)以及最高温度的平均气温差。从图中可以看出,夜间高反照率屋顶和绿色屋顶在降温幅度与降温区域均拥有相似的效果。南京地区夜间的降温效果在0.1~0.2℃,降温效果的地区差异不明显;白天的降温效果多集中在0.3~0.6℃;而在建筑物相对密集的地区降温效果较为显著,比如六合周边地区(图3中黑色圆圈所示)白天降温效果达到了0.6℃以上;江宁周边地区(图3中红色圆圈所示)白天的降温效果在0.4℃以上;并且局部地区降温效果达到0.6℃以上,这说明冷却屋顶的降温效果与建筑物密集程度相关;即在建筑物密集的地区,冷却屋顶的降温效果越明显;一天中的最高气温出现在14:00左右,此时两种屋顶的降温效果及降温范围差异不大,均达到0.6℃以上。

气温的变化是由辐射平衡的变化引起的。屋顶所接收到的净辐射量:

$$R_n = SW_{in}(1 - \alpha) + LW_{in} + LW_{out} \quad (2)$$

式(2)中, SW_{in} 为向下的太阳短波辐射通量, α 为屋顶的反照率, LW_{in} 和 LW_{out} 分别为向下和向上的长波辐射。同时净辐射通量:

$$R_n = SH + LH + G \quad (3)$$

式(3)中, SH 为感热通量, LH 为潜热通量, G 为储存热通量。图4为南京城市地区辐射通量的日变化曲线,从图4(a)可以看出,在使用传统屋顶时,大部分的辐射能量转化成为感热通量用以增加近地表的空气温度。由式(2)可以看出,在使用高反照率屋顶时,由于屋顶反照率 α 的增加,导致接收到的用以对城市地区加热的太阳短波辐射通量降低,因此转化的感热通量也相应降低,最大降低86 W/m²,从而达到降温效果。由于绿色屋顶与传统屋顶拥有相同的反照率,所以接收到的太阳短波辐射与传统屋顶一样,但从图4(b)可以看出,绿色屋顶潜热通量比传统屋顶最大增加96 W/m²,根据能量守恒,用以增加地表以上温度的感热通量相应减少,最大减少91 W/m²,说明绿色屋顶是通过水汽的蒸发降低城市地区气温。

3.2 不同比例的冷却屋顶对高温的影响

当屋顶反照率为0.8和拥有100%绿色屋顶时

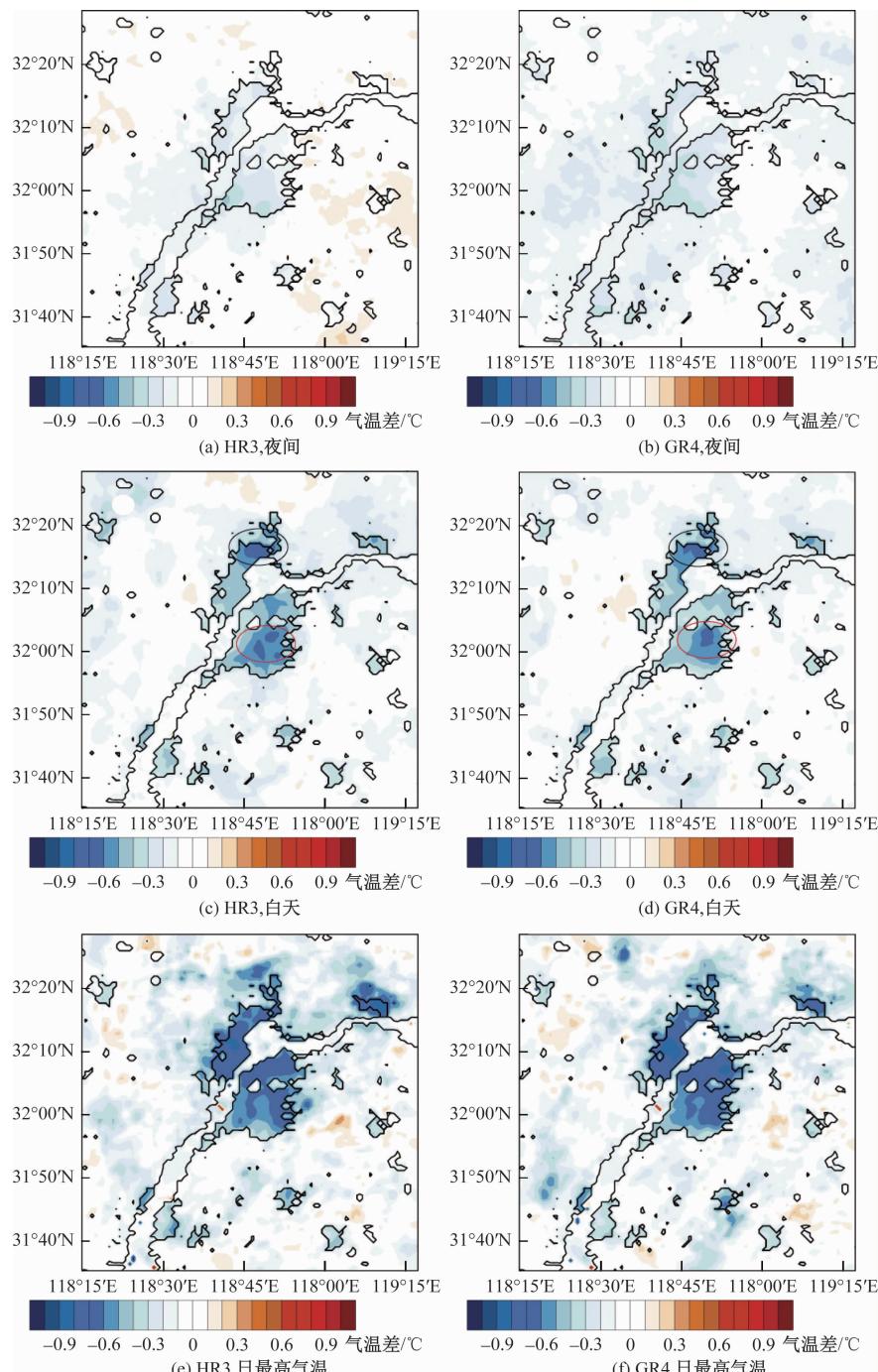


图3 HR3 和 GR4 与控制算例(CTRL)2 m 气温差的平均值

Fig. 3 The average value of 2 m temperature difference between HR3, GR4 and CTRL

对高温缓解有明显的作用。但是实际情况中往往不可能实现100%绿色屋顶;而高反照率屋顶实施虽较为容易,但本身材料容易老化。同时受空气中颗粒物的影响,其反照率会随着时间降低。本部分研究不同屋顶反照率以及绿色屋顶不同比例对城市高温的影响。

从图5可以看出,不同屋顶的反照率和不同比例的绿色屋顶对气象因子的影响有很强的线性关系,这与Li和BouZeid得到的结论相一致^[19]。从图

5(a)可以看出,屋顶反照率每增加0.1,2 m温度最高降低0.11 °C;即便收到空气中颗粒物的堆积,使反照率降低,但0.4反照率的屋顶仍然有0.2 °C的降温效果;而绿色屋顶比例每增加10%,2 m温度最高降低0.064 °C。高反照率屋顶会产生较小的2 m比湿的增加,反照率每增加0.1,比湿增加0.04 g/kg;而绿色屋顶由于其本身水汽的蒸发产生降温效果,所以绿色屋顶所带来比湿增加的效果高于高反照率屋顶,绿色屋顶比例每增加10%,2 m比

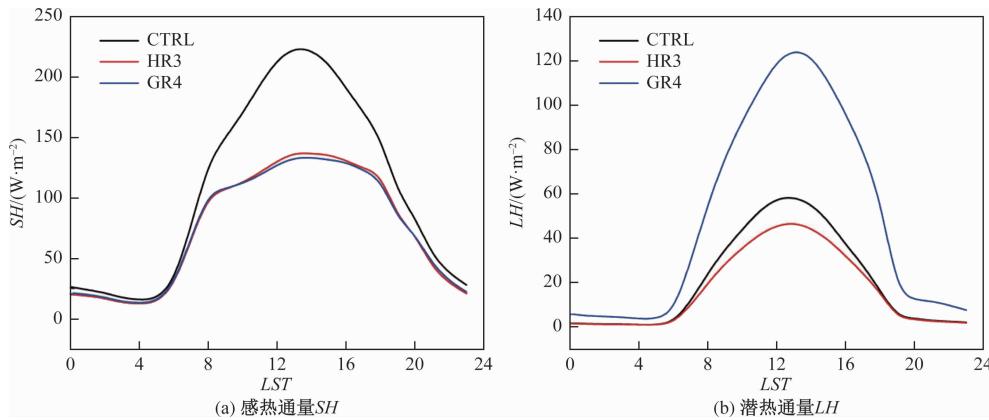


图 4 城市地表能量平衡日变化

Fig. 4 Diurnal variation of urban surface energy balance

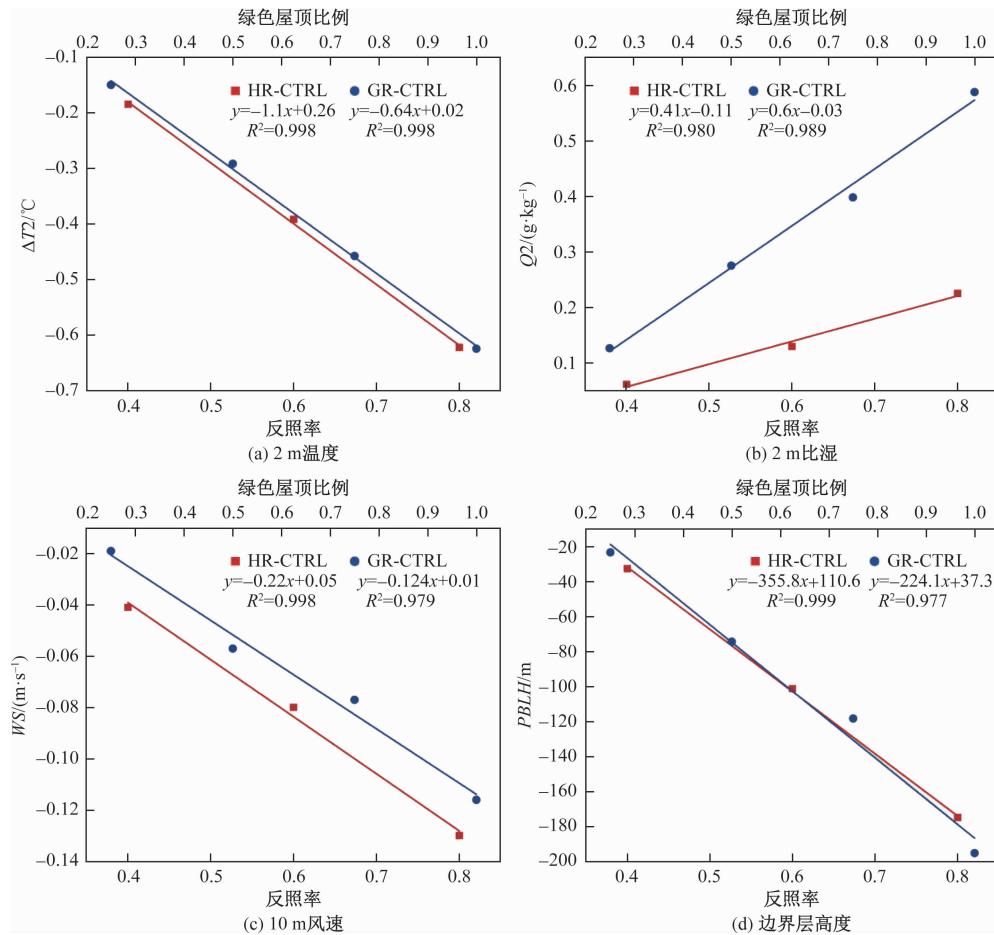


图 5 高反照率屋顶不同反照率和绿色屋顶不同比例对城市地区气象因子影响

Fig. 5 Influence of different albedo and different proportion of green roof on meteorological factors in urban area

湿增加 0.06 g/kg。与此同时,不同屋顶所带来的边界层的降低也有类似的效果,即屋顶反照率每增加 0.1, 边界层高度最大降低 36 m, 而绿色屋顶比例每增加 10%, 边界层高度最大降低 22 m [图 5(d)]。这是由于温度的降低,造成湍流的减小,进而降低边界层高度。风速减小与屋顶反照率和绿色屋顶的比例呈线性关系说明,增加屋顶的反照率和绿色屋顶

的比例在一定程度上会降低城市地区的风速 [图 5(c)]。

3.3 冷却屋顶对人体舒适度的影响

地表能量的变化直接影响近地层气象要素。图 6(a)~图 6(c)为南京城市地区气象要素日变化曲线,从图 6(a)可以看出三种屋顶有相同的温度变化趋势,与传统屋顶相比,使用反照率为 0.8 的高反照

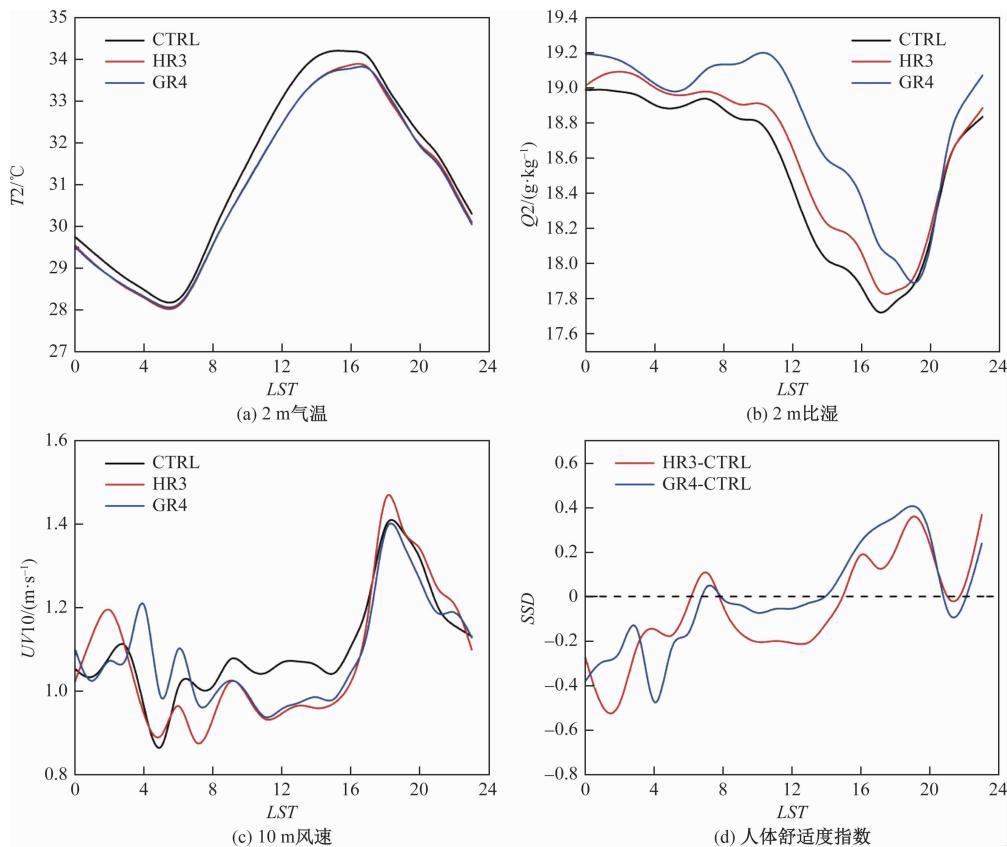


图 6 高反照率屋顶(HR3)和绿色屋顶(GR4)在城市地区气象因子和人体舒适度指数差值日变化曲线

Fig. 6 High albedo roof (HR3) and green roofs (GR4) in urban areas of meteorological factors and human comfort index difference between the diurnal variation

率屋顶和100%的绿色屋顶拥有相同的降温效果,早上7:00开始有明显的降温效果,到中午13:00产生0.6 °C的最大降温。这说明两种屋顶在高温天气中可以有效降低城市地区温度。从图6(b)可以看出使用高反照率屋顶和绿色屋顶均会增加比湿,其中高反照率屋顶日平均增加0.1 g/kg,最大增加0.22 g/kg;而绿色屋顶日平均增加0.27 g/kg,最大增加0.59 g/kg。高反照率屋顶和传统屋顶在比湿上有相同的变化趋势,同时与温度变化呈现负相关,在一天中温度最高时,比湿达到最小值,而绿色屋顶虽然也拥有相似的变化趋势,但它与传统屋顶相比,比湿最大差值发生在早上,最小差值发生在傍晚,同时绿色屋顶比湿最小值出现的时刻滞后于高反照率屋顶和传统屋顶,这是因为绿色屋顶的降温是由其本身水汽的蒸发而产生的,而这一过程的实现是需要时间的。两种屋顶的使用均会降低风速,白天风速的降低尤为明显。

以上结果和3.2节结果均说明高反照率屋顶和绿色屋顶均会降低城市2 m温度;但还会伴随比湿的增加和风速减小。温度、风速和相对湿度同时决定人体舒适程度,然而,南京在夏季处在高温和高湿

的背景下,人体的舒适程度较低,虽然两种屋顶的使用会降低城市地区温度,缓解城市热岛效应,但却有可能加重人体的不舒适程度。图6(d)为两种屋顶与传统屋顶舒适度指数差值的日变化曲线。从图中可以看出虽然两种屋顶在白天可以降低人体舒适度指数,即可以缓解人体的不舒服程度,但两种屋顶缓解人体不舒适程度的效果不同,使用绿色屋顶时人体舒适度指数的降低(0.02 ~ 0.1)小于高反照率屋顶(> 0.2)。下午16:00之后,SSD的差值为正值,这是因为,在16:00之后气温的降低效果不如之前明显,但在高温中对人体热平衡十分敏感的相对湿度和风速的增加和减小却处在一个相对较高的水平上,因此不利于人体舒适程度。

4 结论与展望

本研究利用耦合了单层城市冠层方案(UCM)的WRF模式,评估南京夏季部署高反照率屋顶和绿色屋顶对近地表空气温度的区域影响,主要结论如下:

(1) 部署反照率为0.8的高反照率屋顶和100%的绿色屋顶对南京城市地区有相同的降温效

果,其中白天平均降温(0.5 °C)大于夜间平均降温(0.1 °C),最大的降温效果发生在中午14:00左右,为0.9 °C。同时冷却屋顶的降温效果存在空间异质性,在建筑物较为密集的地区,其降温效果较为明显。

(2)高反照率屋顶和绿色屋顶的安装对城市地表能量平衡有显著影响,高反照率屋顶通过降低接收到的太阳短波辐射来减少加热大气的感热通量,从而降低近地表温度;而绿色屋顶由于水汽的蒸散,使能量进行重新分配,通过增加潜热通量来降低感热通量,从而降低近地表温度。

(3)不同反照率的屋顶和不同比例的绿色屋顶对城市地区气象因子的影响不同,且均呈线性关系。屋顶反照率每增加0.1,2 m温度降低0.11 °C,边界层高度降低36 m,风速降低0.02 m/s,比湿增加0.04 g/kg;绿色屋顶比例每增加10%,2 m温度降低0.064 °C,边界层高度降低22 m,风速降低0.01 m/s,比湿增加0.06 g/kg。

(4)部署反照率为0.8的高反照率屋顶和100%的绿色屋顶在白天可以降低SSD数值,其中高反照率屋顶降低0.2左右,绿色屋顶将低0.1左右,从而在一定程度上缓解人体舒适程度。

安装高反照率屋顶和绿色屋顶可以在一定程度上降低夏季城市地区近地表温度,从而缓解城市高温天气,提高人体舒适程度。但部署冷却屋顶面临着边界层高度的降低,这在一定程度上会减小大气容纳的污染物,同时,风速的降低又不利于这些污染物的扩散,从而会带来污染相关的负面影响。因此,未来的工作将在空气污染方面对冷却屋顶进行评估,从而为缓解城市热岛以及为城市规划的制定提供科学依据。

参 考 文 献

- 1 Division P. World urbanization prospects: the 2014 revision: highlights. New York: United Nations Population Division, 2014
- 2 Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008; 319(5864): 756—760
- 3 Bierwagen B G, Theobald D M, Pyke C R, et al. National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010; 107(49): 20887—20892
- 4 Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophysical Research Letters*, 2010; 37(3): 174—180
- 5 Georgescu M, Morefield P E, Bierwagen B G, et al. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014; 111(8): 2909—2914
- 6 Levinson R, Akbari H. Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: Conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Efficiency*, 2010; 3(1): 53—109
- 7 Akbari H, Menon S, Rosenfeld A. Global cooling: increasing worldwide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*, 2009; 94(3—4): 275—286
- 8 Akbari H, Damon M H, Seto D. The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters*, 2012; 7(2): 24004—24013
- 9 Menon S, Akbari H, Mahanama S, et al. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO₂ offsets. *Environmental Research Letters*, 2010; 5(1): 014005
- 10 Jacobson M Z, Ten Hoeve J E. Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate. *Journal of Climate*, 2012; 25(3): 1028—1044
- 11 Rosenfeld A H, Akbari H, Bretz S, et al. Mitigation of urban heat islands: Materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 1995; 22(3): 255—265
- 12 Taha H. Urban surface modification as a potential ozone air-quality improvement strategy in California: A mesoscale modelling study. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008; 127(2): 219—239
- 13 Takebayashi H, Moriyama M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 2007; 42(8): 2971—2979
- 14 Santamouris M, Gaitani N, Spanou A, et al. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas—design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 2012; 53: 128—136
- 15 Sun T, Grimmond C S E, Ni G H. How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016; 121(10): 5320—5335
- 16 Wang M, Yan X, Liu J, et al. The contribution of urbanization to recent extreme heat events and a potential mitigation strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area. *Theoretical & Applied Climatology*, 2013; 114(3—4): 407—416
- 17 Li X X, Norford L K. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. *Urban Climate*, 2016; 16: 59—74
- 18 Ma H, Shao H, Song J. Modeling the relative roles of the foehn wind and urban expansion in the 2002 Beijing heat wave and possible mitigation by high reflective roofs. *Meteorology & Atmospheric Physics*, 2014; 123(3—4): 105—114
- 19 Li D, Bouzeid E, Oppenheimer M. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 2014; 9(5): 055002
- 20 Sharma A, Conry P, Fernando H J S, et al. Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model. *Environmental Research Letters*, 2016; 11(6): 064004
- 21 Salamanca F, Georgescu M, Mahalov A, et al. Citywide impacts of cool roof and rooftop solar photovoltaic deployment on near-surface air temperature and cooling energy demand. *Boundary-Layer Meteorology*, 2016; (1): 1—19
- 22 Jacobson M Z, Hoeve J E T. Effects of urban surfaces and white

- roofs on global and regional climate. *Journal of Climate*, 2012; 25 (3):1028—1044
- 23 张书余. 城市环境气象预报技术. 北京:气象出版社, 2002: 124—126
Zhang Shuyu. Forecasting technologies of urban environmental meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 124—126
- 24 Kusaka H, Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004; 82(1):67—80
- 25 Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): Model description and evaluation with local - scale measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011; 116 (D12): 1248—1256
- 26 Yang, Z L, Niu G Y, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *J Geophys Res*, 2010;116 (D12),JD015140.
- 27 Chen L, Zhang M, Wang Y. Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions: A case study of Nanjing, China. *Theoretical & Applied Climatology*, 2016; 125(3—4):713—728
- 28 Hong S Y. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 2006; 134(9):2318—2340
- 29 Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 2004;132(1):103—120
- 30 Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres:RRTM, a validated correlated model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 1997; 102(D14): 16663—16682
- 31 Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Science*,1989;46(46):3077—3107
- 32 Paulson C A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, 1987; 9(9):857—861
- 33 王咏薇, 伍见军, 杜钦, 等. 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. *气象学报*, 2013; 71(6): 1130—1145
Wang Yongwei, Wu Jianjun, Du Qin, et al. Numerical study of the Chongqing high-density buildings environment by the WRF with the different urban canopy schemes. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013; 71(6):1130—1145

Mitigative Effect of Cool Roof on Summer High Temperature in Nanjing Area

GUO Liang-chen^{1, 2}, WANG Yong-wei^{1, 2*}, ZHANG Yan-qing¹

(Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC)¹, College of Atmospheric Physics², Nanjing University of University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

[Abstract] The installation of the cooling roof is expected to alleviate the damage caused by the thermal environment of urbanization to some extent. Based on the small wind weather in the summer days from July 26, 2010 to August 5, 2010 in Nanjing, the effect of the installation of different high albedo roofs and green roofs on high urban temperature was simulated. The results show these as follows. ①The high albedo roof with an albedo of 0.8 and the 100% green roof has the same cooling effect, the reduction of daytime average temperature is 0.5 °C , the reduction of night average temperature is 0.2 °C , the maximum temperature in a day 0.9 °C , at the same time, in areas where the building density is high, the cooling effect is more obvious. ②Different roofs with different albedo and green roof with different proportions have different effect on meteorological factors. The increase of roof albedo and green roof ratio will decrease the temperature, decrease the wind speed and decrease the boundary layer linearly with a linear variation. ③The high albedo roof with an albedo of 0.8 and the 100% green roof can lower the SSD values during the day (0.2 and 0.1 respectively) to improve human comfort.

[Key words] high albedo roof green roof high temperature comfort