

冷却屋顶对北京城市热环境影响的模拟研究^{*}

周晓宇¹ 王咏薇² 孙绩华³ 任侠² 郭良辰² 李立²
ZHOU Xiaoyu¹ WANG Yongwei² SUN Jihua³ REN Xia² GOU Liangchen² LI Li²

1. 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明, 650500
2. 耶鲁-南京信息工程大学大气环境中心, 南京, 210044
3. 云南省气象科学研究所, 昆明, 650034

1. *College of Resources Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China*
2. *Yale-Center for Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*
3. *Yunnan Institute of Meteorology, Kunming 650034, China*

2017-12-07 收稿, 2018-05-17 改回.

周晓宇, 王咏薇, 孙绩华, 任侠, 郭良辰, 李立. 2019. 冷却屋顶对北京城市热环境影响的模拟研究. *气象学报*, 77(1):129-141
Zhou Xiaoyu, Wang Yongwei, Sun Jihua, Ren Xia, Gou Liangchen, Li Li. 2019. A simulation study on the influence of cooling roof on the thermal environment in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(1):129-141

Abstract The study of two types of cooling roofs (high reflectivity roofs and green roofs) has important implications for the mitigation of high temperature in the summer in Beijing. This paper has implemented the Weather Research and Forecasting Model (WRF3.8) coupled with the Single-Layer City Canopy Model (SLUCM) to evaluate the simulation performance of the control case (case1) by this coupled model using meteorological data collected at 158 stations in Beijing. Seven cases with roofs of different albedos (cases2-4) and green roofs with different cover ratios (cases5-8) are conducted for sensitivity studies. The results of the study show that: (1) in the urban area of Beijing, the roof whose albedo is 0.85 (case4) has a better cooling effect than the 100% (case8) green roof, the average temperature in case4 drops by 0.90°C and the cooling in case 8 is 0.46°C; (2) with the albedo increase of 0.1 in the roof, the maximum temperature in Beijing will decrease by 0.27°C. And the increase in the proportion of green roofs will also result in a decrease in temperature. With every 10% increase in the green roof, the maximum temperature will decrease by 0.16°C; (3) the two types of cooling roofs have significant impacts on the urban heat island (UHI). Compared with case1, the maximum UHI in case4 drops by 1.47°C during the daytime from 13:00 BT to 14:00 BT, which is higher than the cooling effect shown in case8; (4) the cooling effect of the cooling roofs can reach 1.2 km height above the city, and the turbulence is also significantly reduced. During 12:00-18:00 BT of the three days, compared with case1, the height of the planetary boundary layer in case4 and case8 on average are reduced by 669 and 430 m, respectively.

Key words High reflective roof, Green roof, Urban heat island mitigation, WRF model

摘要 两种类型冷却屋顶(高反照率屋顶、绿色屋顶)的研究对于北京夏季城市高温的缓解作用具有重要的意义。耦合单层城市冠层模式(SLUCM)与天气研究与预报(WRF3.8)模式,采用北京市及其外围地区158个站点气象资料评估模式对照

^{*} 资助课题:云南省科技惠民计划(2016RA096)、国家自然科学基金项目(41675016)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)、教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)、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)。

作者简介:周晓宇,主要从事大气边界层与大气环境研究。E-mail: 245144672@qq.com

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的研究。E-mail: wyw@nuist.edu.cn

案例(case1)的模拟性能,并选取7组不同反照率屋顶案例(case2—4)和不同覆盖比例的绿色屋顶案例(case5—8)进行敏感性试验。研究表明:(1)在北京城市区域,高反照率为0.85的屋顶(case4)比绿色占比100%的屋顶(case8)具有更好的降温效果,case4的3 d平均降温可达到0.90℃,而case8降温为0.46℃。(2)屋顶反照率每增加0.1,会导致北京城市区域最高气温降低0.27℃;绿色屋顶比例的增大也会导致温度的降低,每增加10%,最高气温降低0.16℃。(3)两种冷却屋顶对城市热岛也存在显著的影响,在13—14时(北京时),case4与case1对比的城市热岛(UHI)降温最大差值为1.47℃,比case8的城市热岛降温更加明显。(4)在城市区域垂直高度上,冷却屋顶的降温作用可达到1.2 km,同时湍流运动存在明显的减弱;在3 d的12—18时,case4、case8与case1对比,边界层高度平均降低了669与430 m。

关键词 高反照率屋顶,绿色屋顶,城市热岛缓解,WRF模式

中图法分类号 P401

1 引言

当前全球城市人口以每年增加3.0%的速率快速增长(Northridge, et al, 2003),已有一半以上的人口生活在城市中(Ching, 2013),预测2030年城市人口的占比将达到60%(United Nations, 2007)。城市面积扩张及人口的增加使下垫面发生巨大的改变,例如建造形式、材料和高密度的人类活动等方面与周围环境有所不同。美国环境保护局(EPA)研究发现,100万以上人口的城市比周围地区的温度高出1—3℃(Wong, et al, 2011)。Manley于1958年提出城市热岛的概念,城市热岛现象的出现对人体健康(Kovats, et al, 2008)、生态环境(Hou, et al, 2013)、水资源存储(Santamouris, 2014)及空气污染(Rowe, 2011)等过程产生严重的影响。近年来在夏季高温热浪作用下,与热相关的死亡率也有升高(Wu, et al, 2014)。同时,在全球气候变暖加剧的背景下,热浪事件将更加频繁,持续时间更长,并存在城市热岛与热浪对城市区域非线性升温的作用(Li, et al, 2013)。

目前科学家致力于研究缓解城市热岛效应和热浪的策略(Rizwan, et al, 2008),其中高反照率屋顶(Li, et al, 2014)和绿色植被屋顶(Saadatian, et al, 2013)是有效的手段。一些研究使用区域气候模式模拟城市地区大规模高反照率屋顶的影响(Millstein, et al, 2011)。然而,以往研究使用的数值模型中城市表面参数比较粗糙。还有一些研究探讨了全球尺度上使用全球气候模型模拟高反照率屋顶的影响(Jacobson, et al, 2012)。由于城市冠层模型中较低的分辨率,不能充分描述城市环境的表面异质性和复杂的物理过程。

在不同气候条件下,绿色屋顶的设置在一定程度上能缓解热压力(Qiu, et al, 2013; Saadatian, et

al, 2013)。目前关于绿色屋顶的研究,主要采用小范围内观测的手段,缺乏考虑整个城市内绿色屋顶的减缓效应(Santamouris, 2014)。此外,在早期模式中引入绿色屋顶方案,并采用理想假设,将绿色屋顶近似看作是高反照率表面或浅水水体(Georgescu, et al, 2014)。Smith等(2011)在芝加哥开展了绿色屋顶研究,在模式中并没有直接加入绿色植被与陆气交换的计算方案,而是假设在整个城市区域屋顶层均匀的增加水分供应,但这不能完全代替绿色屋顶实际的物理过程。

此外,以上两种冷却屋顶的研究大多集中于欧美(Akbari, et al, 2012; Sharma, et al, 2016)的大都市区,关于中国大城市的研究已有一些,例如Sun等(2016)使用WRF-PUCM城市冠层模式探讨了绿色屋顶对北京夏季高温热浪的影响,结果表明,绿色屋顶有助于缓解城市热岛与热浪的升温作用,但没有对比高反照率屋顶的减缓效应。目前,在中国超大城市开展冷却屋顶的研究还相对较少,需要进一步对不同气候背景下城市的热岛缓解手段进行对比和分析,从而得出有效的方案,为国家城市规划部门制定合理的策略提供参考。

本研究使用了WRF3.8/SLUCM单层城市冠层模式,以北京2010年7月4日00时—7日00时(北京时,下同)夏季高温热浪天气为背景进行了模拟。根据不同的地理位置与区域气候差异,文中重点关注高反照率屋顶与绿色屋顶对北京城市区域气象要素的对比研究。

2 研究方法

2.1 WRF模式及绿色屋顶方案

目前WRF3.8/SLUCM单层城市冠层模式中已引入了绿色屋顶的分层计算方案。分层的绿色屋顶与传统的混凝土屋顶相比依次增加了3层,分别

是排水层、生长层、顶部土壤-植被层。这3层均由多孔性材料组成,并用垂直离散化计算体积含水量 θ 。中间层体积含水量 θ 的时空变化特征通过理查兹的扩散形式计算

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D(\theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} K(\theta) \quad (1)$$

式中, t 为时间, z 为中间层厚度, $D(\theta)$ 与 $K(\theta)$ 分别为与体积含水量 θ 相关的水力扩散系数和电导率。多层绿色屋顶的潜热通量通过达西定律进行计算

$$LE_{gr} = LE_{dir} + LE_c + LE_t \quad (2)$$

模式中假设绿色屋顶为均匀的土壤结构。式中, E_{dir} 、 E_c 、 E_t 分别为顶层的直接蒸散、植被冠层中所截留的水分蒸散和植物表面蒸散,这3项详细计算过程可参考Noah陆面模式(Chen, et al, 2001)。在整个绿色屋顶结构中,土壤-植被层和生长层与植被的类型和根部深度有关,种植植被深度的范围在0.05—1 m(Dvorak, et al, 2010)。为简化模式中土壤-植被层与生长层的深度,模拟值设为0.15 m。此外,绿色屋顶排水层的厚度为非常浅薄的水层,因此,其深度并没有被模拟。

2.2 模拟案例设计

根据Wang等(2010)利用60年(1950—2010年)北京热浪年度统计的气温数据统计得出,2010年7月5日达到60年内最高温度41℃。选择2010年7月北京高温热浪中的时段为4—7日,这3 d北京处于高压控制之下,晴朗少云。模拟区域中心为(40.405°N, 116.326°E)。模式使用了3重嵌套(图1a),从外层向内层的格点数分别为100×95、136×121、151×136,分辨率依次为9、3、1 km;最内层包含了北京市区的西北燕山山脉及周围的乡镇区。3重嵌套的垂直层数设置为53层,近地层2000 m以下有21层,最高层为50 hPa。初边值条件为NCEP再分析资料1°×1°的逐6 h输入的数据。图1b展示了模拟区域下垫面土地类型,地形资料使用分辨率为1 km的MODIS(30'')数据,在最内层嵌套区域内主要占比的土地类型分类有城市建筑区、草地、农田、混合林、灌木地,城市建筑区非渗透性表面占比高,会导致城市热岛效应增强。根据王正兴等(2009)研究可知,北京城市区域中建筑物所占比

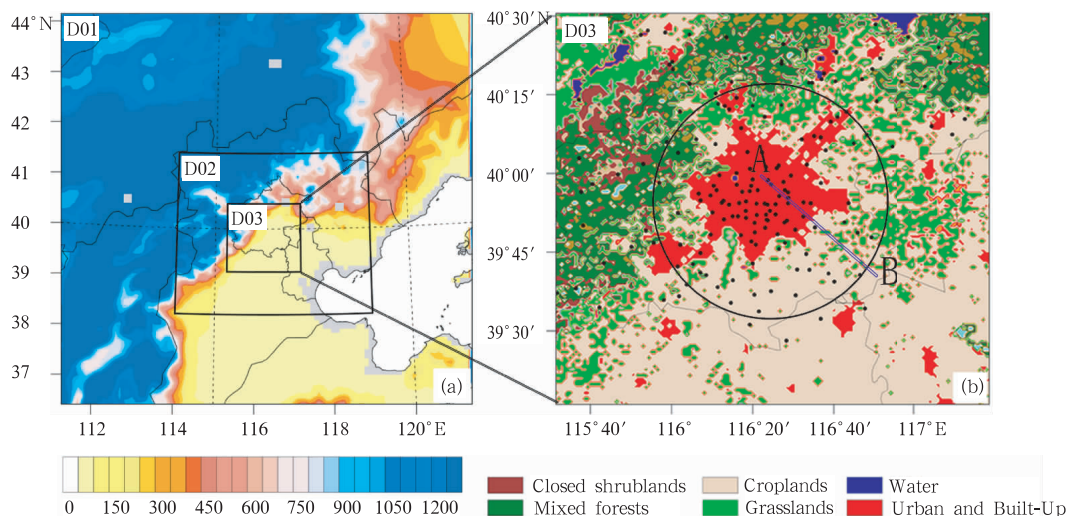


图1 WRF模拟的3重嵌套和D03区域下垫面的土地利用类型

(a. 3个黑色矩形分别表示D01、D02、D03模拟区域及地形高度(单位:m), b. 黑色圆点表示158个观测站点,AB为垂直剖面,黑色圆环(半径:35 km)内为计算城市热岛强度区域)

Fig.1 Triple-nested WRF domain and land use type in the innermost domain (D03)

(a. Model domains denoted by black rectangles as D01, D02, D03 and terrain height (unit: m),

b. Land use type in D03. Black circles indicate 158 observation stations; AB is the position along which the vertical cross section is displayed, and the area inside the black circle (radius: 35 km) denotes the area where the urban heat island intensity is calculated)

例为 0.783(城市区域剩余占比为绿色植被)。

文中共设计了 8 组不同占比的冷却屋顶的理想数值试验方案(表 1)。其中对照案例(case1)将整个北京城市区域屋顶反照率设置为 0.2,用来表示理想情况下城市区域范围内屋顶的反照率大小。高反

照率屋顶的 3 种方案(case2—4)对整个城市地区屋顶的反照率分别设置成 0.4、0.6、0.85。此外,绿色屋顶的 4 个案例(case5—8)是对整个城市屋顶植被覆盖率设置为 20%、50%、80%、100%。其中,剩余占比保持传统屋顶,反照率设为 0.2。

表 1 模拟案例及参数化方案设置

Table 1 Configurations of the numerical study cases and parameterization schemes

	对照案例		高反照率屋顶				不同占比绿色屋顶		
	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	
反照率	0.2	0.4	0.6	0.85	0.2	0.2	0.2	0.2	
绿色屋顶占比(%)	—	—	—	—	20	50	80	100	
WRF 版本	WRF3.8								
中心经纬度	40.405°N, 116.326°E								
三重嵌套	100×95, 136×121, 151×136								
格点间距(km)	第 1 层:9, 第 2 层:3, 第 3 层:1								
垂直分层	53 层								
物理参数化方案	Noah 陆面过程(Chen, et al, 2001), 单层城市冠层(SLUCM), WSM3 微物理方案(Hong, et al, 2004), RRTM 长波辐射方案(Mlawer, et al, 1997), Dudhia 方案(Dudhia, 1989), MYJ 边界层方案(Janjić, 1996)								
建筑物高度	18.3 m(王正兴等, 2009)								
屋顶宽度	10 m								
街道宽度	10 m								
城市建筑占比	0.783(王正兴等, 2009)								
人为热(max)	120 W/m ² (Miao, et al, 2014)								
人为潜热(max)	42 W/m ² (Miao, et al, 2014)								

2.3 观测数据

验证模拟结果所用的观测数据来源于北京城市气象研究所, 217 个观测站点包含了北京城市及周边地区的逐时常规气象要素。根据观测站点所处的下垫面不同, 将观测站点划分为城市(图 1b 中城市下垫面)和乡村(图 1b 中非城市下垫面)两种类型。由于 2010 年 7 月 4—7 日在 217 个观测站点中, 城市与乡村各有 22、36 个站点的观测数据缺测, 缺测量达到 90% 以上。因此, 利用 50 个城市站点及 108 个乡村站点的常规气象资料进行模式模拟结果的评价。

3 模拟结果评估

利用 2010 年 7 月 4—7 日北京城市及乡村地区 158 个观测站点(城市、乡村观测站)的气象资料, 与文中对照案例(case1)模拟的 2 m 近地面气温(T_2)、2 m 相对湿度(RH)和 10 m 风速(V_{10})进行对比分析, 用来验证模式结果。分别对城市、乡村观测站点的整体平均日变化和最小(大)值与 case1 相对应的

格点进行对比(图 2), 可知近地面气温 04 时达到最低值、17 时达到最高值, 在城市与乡村站点的模拟与观测值中, 温度变化的趋势与峰(谷)值出现的时间基本一致, case1 与城市、乡村观测值的相关系数(R)分别为 0.85、0.90, 平均偏差分别为 -0.28 、 -1.56 °C。城市、乡村相对湿度模拟与观测值的相关系数分别为 0.74、0.91, 但 case1 中城市与乡村的 3 d 整体相对湿度明显低于实际观测值。图 2c 中, 在 7 月 4 日 12 时—5 日 06 时, 观测值的相对湿度与 case1 偏差 25% 左右。由于城市区域渗透性表面的占比较少, 整体的植被蒸散作用较弱, 导致城市区域内相对湿度偏低。城市、乡村模拟比观测的 10 m 风速平均值总体偏大, 其相关系数分别为 0.32、0.28。相关系数偏低的原因可能是(1)由于模式格点分辨率的限制, 没有详细考虑冠层内部建筑物的外形特征;(2)冠层内 10 m 风速是由大气模式第 1 层的风速值取对数得出的, 而大气模式的第 1 层高度在建筑物高度之上;(3)单层城市冠层假设建筑物的高度都是相同值, 并没有细致地考虑建筑物的拖曳

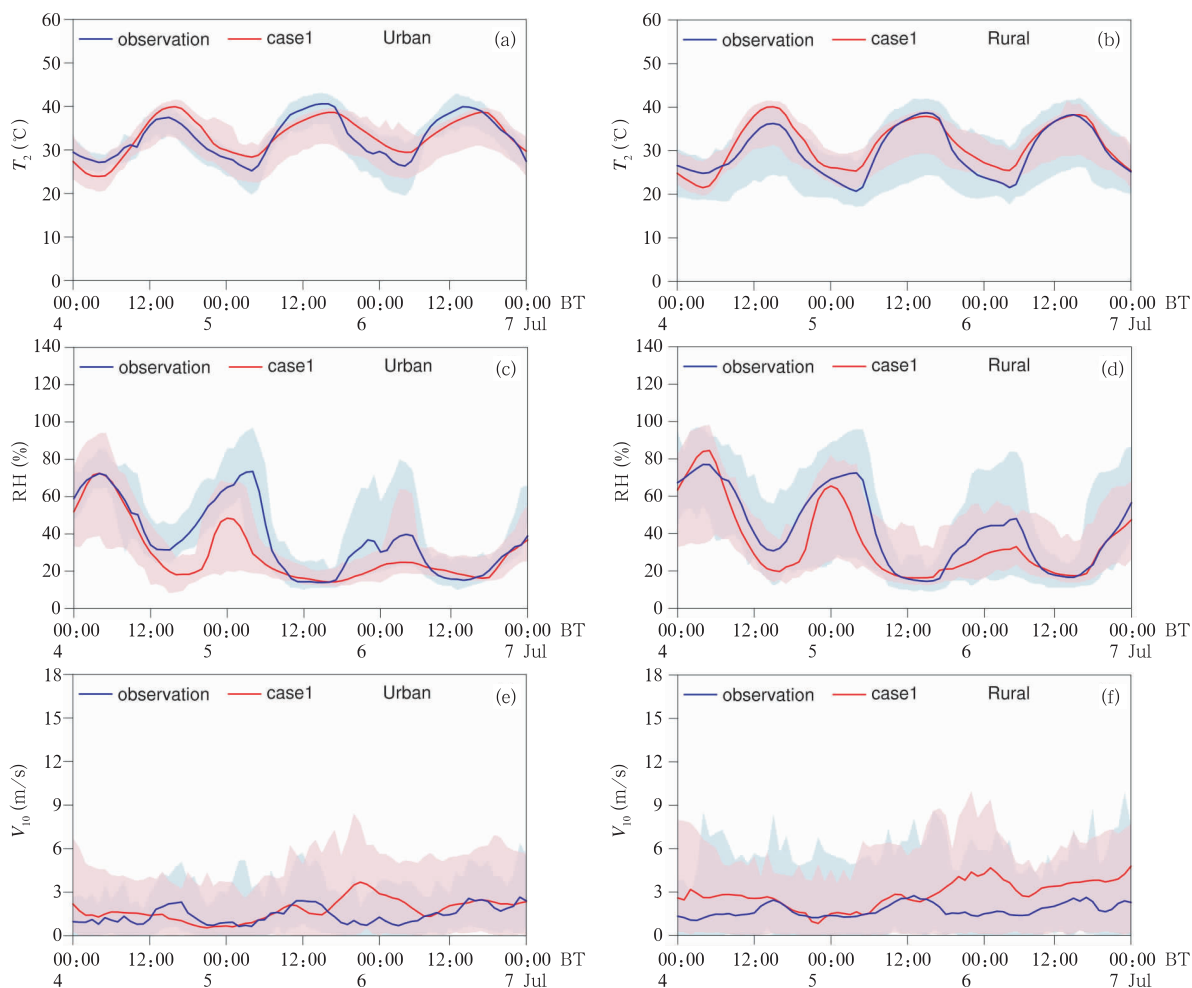


图2 2010年7月4—7日城市(a,c,e)与乡村(b,d,f)中2 m气温 T_2 (a,b)、2 m相对湿度 RH(c,d)和10 m风速 V_{10} (e,f)模拟值(case1)和观测值(observation)3 d逐时的对比(红色实线为 case1 的平均值,蓝色实线为观测的平均值,浅红色(浅蓝色)阴影为3 d逐时最小(大)值区域波动范围)

Fig. 2 Comparison of simulated (case1) and observed hourly 2 m temperature T_2 (a, b), 2 m relative humidity (c, d), and 10 m wind speed V_{10} (e, f) in urban (a, c, e) and rural (b, d, f) areas during the 3 day period 4-7 July, 2010 (The red solid line is the average of case1, the blue solid line is the average of the observations, and the light red (light blue) shading shows the fluctuation range of the hourly minimum (maximum) values during the 3 day period)

作用对气流动能的损耗,从而导致10 m风速值比实际值偏大(伍见军等,2013)。

4 结果分析

4.1 冷却屋顶对近地面城市气象要素的影响

两种冷却屋顶(高反照率、绿色屋顶)对缓解城市热环境有非常明显的作用。本节重点对比分析高反照率为0.85的屋顶(case4)和植被占比100%的

绿色屋顶(case8)与对照案例(case1)3 d平均的差值(图3)。,冷却屋顶对北京城市区域有较为明显的降温作用,其 case4 与 case8 城市区域 T_2 平均降温为0.90与0.46℃。Georgescu等(2014)对美国大都市区域使用冷却屋顶研究表明,夏季高反照率屋顶降温效果大于绿色屋顶,与文中的研究结果一致。此外,这两种方案中比湿 Q_2 都有所增大,case4 与 case8 对整体城市区域内比湿 Q_2 的平均值分别增

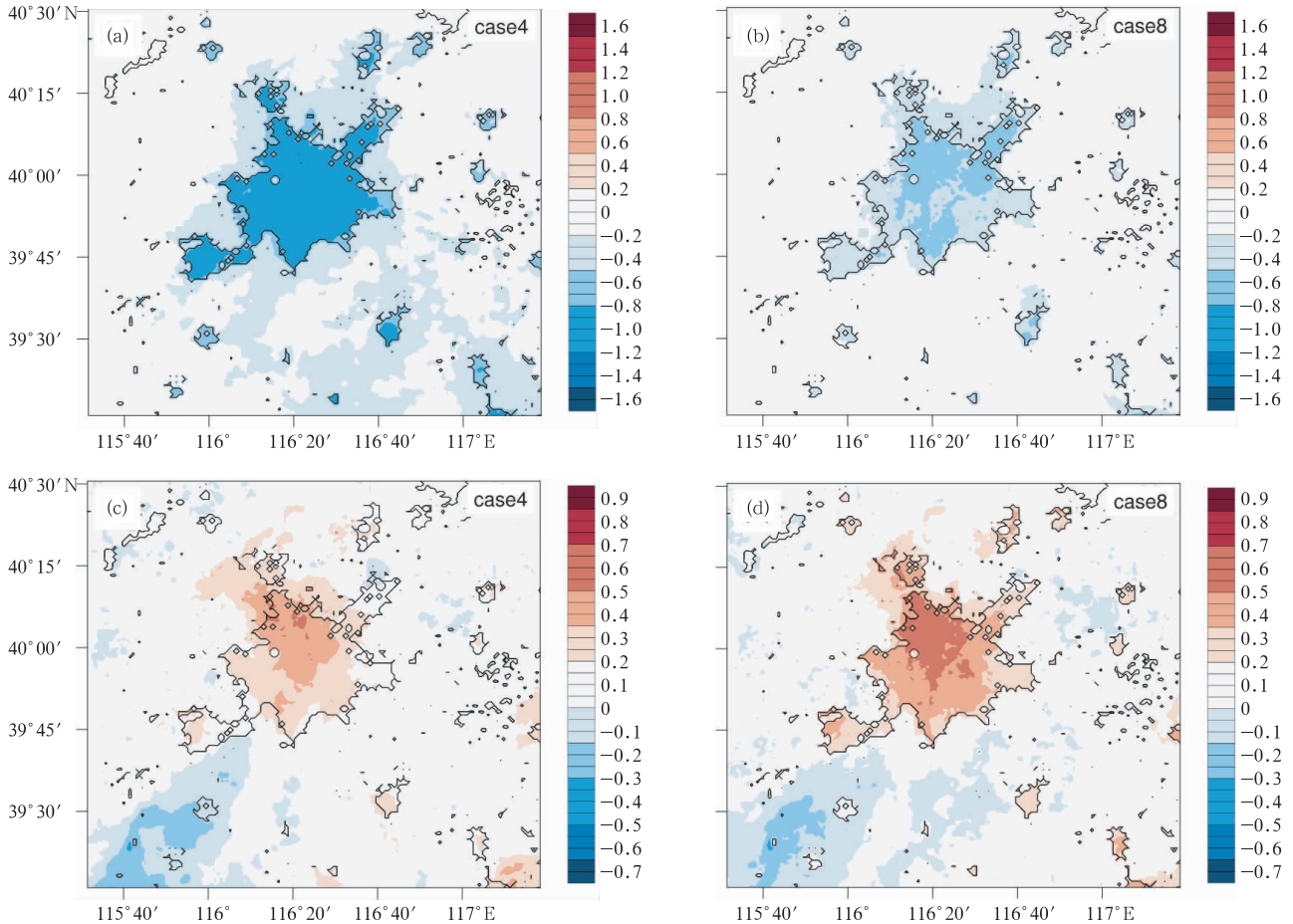


图3 2010年7月4—7日冷却屋顶(case4、case8)与对照案例(case1)中2 m气温 T_2 (°C)、比湿 Q_2 (g/kg) 3 d 平均的差值

(a. $T_2(\text{case4} - \text{case1})$, b. $T_2(\text{case8} - \text{case1})$, c. $Q_2(\text{case4} - \text{case1})$, d. $Q_2(\text{case8} - \text{case1})$)

Fig. 3 Differences in the 3 day average temperature T_2 (°C) and specific humidity Q_2 (g/kg) between results of sensitivity experiments with cooling roof (case 4, case 8) and the control experiment (case1) on 4–7 July 2010

(a. $T_2(\text{case4} - \text{case1})$, b. $T_2(\text{case8} - \text{case1})$, c. $Q_2(\text{case4} - \text{case1})$, d. $Q_2(\text{case8} - \text{case1})$)

加了 0.26 与 0.39 g/kg。其中绿色屋顶比高反照率屋顶比湿增加更为明显,主要原因是绿色屋顶植被层增加了水汽蒸散作用,导致大气中比湿含量升高。

7 种不同比例的冷却屋顶设置对城市能量平衡产生了显著的影响(图 4);图 4a、b 给出了 case1—8 的城市地表感热通量(SH)和潜热通量(LH)的 3 d 逐时平均的日变化。高反照率屋顶(case2—4)使更多的太阳短波辐射被反射出去,从而使到达屋顶的总能量减少,因此,地表面可分配的感热和潜热均相应的减小。随着太阳辐射强度的日变化,对照案例(case1)相比 case2—8 不同案例的感热通量产生明显差异,case2—8 的最大值都出现在 14 时(图 4a)。

其中,屋顶反照率高达 0.85 的 case4 的感热通量减小 145.20 W/m^2 ;同时,case4 的潜热通量也明显减小,14 时,潜热通量最大值减小 23.22 W/m^2 。不同植被占比的绿色屋顶(case5—8),其能量平衡的过程与高反照率屋顶有所不同。屋顶上种植植物可显著增加城市的潜热通量,而感热通量有所降低。在 14 时,植被占比 100% 的绿色屋顶(case8)潜热通量增加了 66.34 W/m^2 ,感热通量降低了 113.58 W/m^2 。对比 case5—8 可见,绿色屋顶的植被总占比越大,屋顶潜热通量的增加越明显,导致感热通量降低。

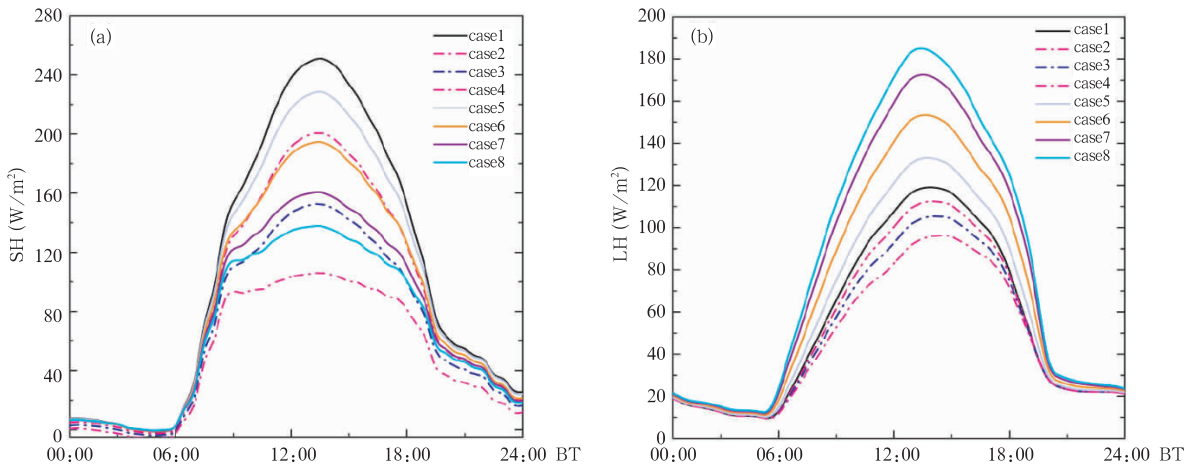


图4 不同冷却屋顶(case2—8)与对照案例(case1)城市地表能量平衡量平均日变化
(a. 感热通量, b. 潜热通量)

Fig. 4 Average diurnal variations of urban energy balance for sensitivity experiments with different cooling roofs (case2—8) and the control case (case1)
(a. Sensible heat flux, b. Latent heat flux)

4.2 不同比例冷却屋顶对城市热环境的影响

图5a、b分别为高反照率屋顶(case2—4)和不同植被占比的绿色屋顶(case5—8)与对照案例(case1)中3 d平均(mean)与最高(max)气温的差值。总体来看,两种冷却屋顶会随着反照率增加、绿色覆盖面的扩大而对2 m近地面气温(T_2)成线性

降温的效果。基于线性降温可知,高反照率屋顶(case2—4)每增加0.1的反照率,其最高气温下降0.27℃、平均气温下降0.10℃;绿色屋顶(case5—8)每增加10%的覆盖面,其最高气温下降0.16℃、平均气温下降0.04℃。高反照率屋顶(case2—4)比绿色屋顶(case5—8)的最高(平均)降温效果更明显。

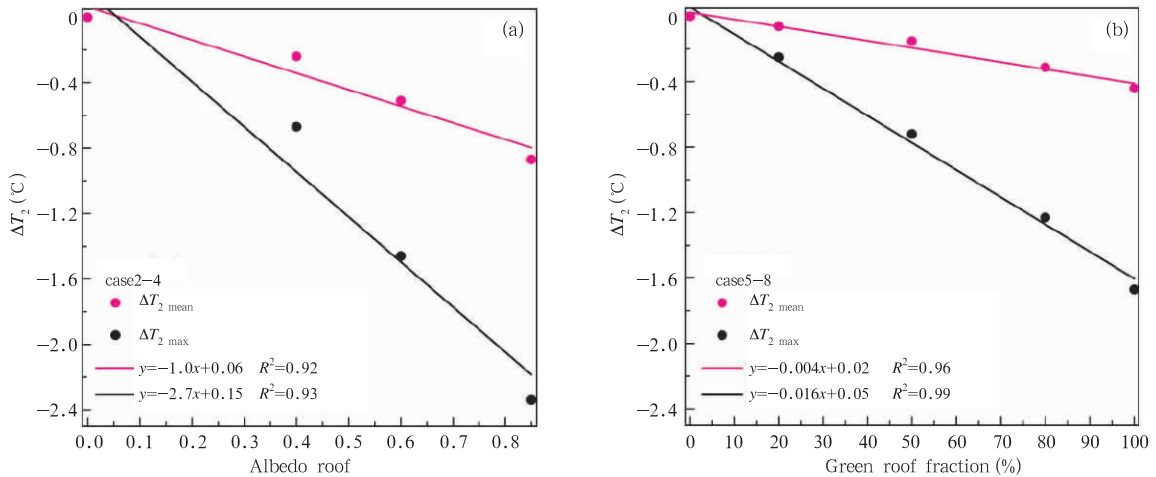


图5 不同占比的冷却屋顶(case2—8)与对照案例(case1)的2 m平均及最高气温的差值
(紫色(黑色)圆点为平均(最高)气温的差值,紫色(黑色)实线为平均(最高)气温的线性拟合, R^2 为决定系数)

Fig. 5 Differences in mean and maximum 2 m air temperatures between results of sensitivity experiments with different ratios of cooling roof (case2—8) and the control case (case1)
(The purple (black) dots show the mean (max) temperature differences, the purple (black) solid lines are for the linear fits of mean (max) temperature, and R^2 in each panel shows the determination coefficient)

高反照率屋顶的设置对不同时刻的气象要素的改变存在差异。表 2 给出了对照案例(case1)与不同高反照率屋顶(case2—4)城市区域内气象要素 3 d 整体(00—24 时)平均和白天(08—19 时)平均、夜间(20 时—次日 07 时)平均的变化。屋顶反照率高达 0.85 的 case4 在白天减少了太阳净辐射的输入,从而近地层表面的感热与潜热通量分别减小了 97.71 与 16.33 W/m²。由于城市表面的非渗透性,从而导致表面能量收支中感热通量远大于潜热通量。此外,case4 中白天近地面 2 m 气温与地表温度(T_s)分别降低了 1.36 与 3.59℃。 T_2 与 T_s 温度的降低将导致城市区域湍流作用的减弱,而近 10 m 地面风速(V_{10})取决于湍流动量的输送,因此,白天的风速减小了 0.30 m/s。在白天过程中,case2—4

案例对城市储存热量的减少,地表及城市建筑向外的长波辐射强度减弱,导致夜间城市温度有所降低。在夜间,2 m 近地面气温与地表温度分别降低了 0.4 与 0.73℃,同时感热通量、潜热通量分别减小了 11.15 与 0.70 W/m²。

表 3 给出了对照案例(case1)与不同植被占比的绿色屋顶(case5—8)中城市区域内气象要素 3 d 整体(00—24 时)平均和白天(08—19 时)平均、夜间(20 时—次日 07 时)平均的变化。在白天时,绿色植被增加了屋顶表面的蒸散作用,植被占比 100% 的绿色屋顶(case8)对城市区域近地层表面潜热通量增加了 52.94 W/m²,感热通量减小 72.84 W/m²。与高反照率为 0.85 的屋顶(case4)对比,case8 感热通量的减少相对较小,因此,case8 白天 2 m 近地面气温与

表 2 case1—4 3 d 平均及白天、夜间平均的城市气象要素变化
Table 2 Meteorological elements averaged over the entire day, over the daytime and over the nighttime for cases1—4

	案例	Q_2 (g/kg)	T_2 (℃)	V_{10} (m/s)	潜热(W/m ²)	感热(W/m ²)	T_s (℃)
全天	case1	8.74	32.82	2.15	54.40	103.60	35.78
	case2	8.80	32.60	2.09	52.26	86.20	35.19
	case3	8.85	32.33	2.03	49.65	67.88	34.50
	case4	9.01	31.95	1.99	46.12	50.56	33.67
白天	case1	8.27	35.74	2.11	92.47	189.84	40.99
	case2	8.36	35.35	1.99	87.80	156.73	39.88
	case3	8.48	34.89	1.88	82.67	122.80	38.65
	case4	8.62	34.38	1.81	76.14	92.13	37.40
夜间	case1	9.24	29.94	2.18	18.41	21.00	30.71
	case2	9.27	29.85	2.16	18.19	17.35	30.53
	case3	9.29	29.77	2.17	17.99	13.91	30.36
	case4	9.43	29.53	2.13	17.71	9.85	29.98

表 3 case5—8 3 d 平均及白天、夜间平均的城市气象要素变化
Table 3 Meteorological elements averaged over the entire day, over the daytime and over the nighttime for cases5—8

	案例	Q_2 (g/kg)	T_2 (℃)	V_{10} (m/s)	潜热(W/m ²)	感热(W/m ²)	T_s (℃)
全天	case5	8.82	32.76	2.13	60.59	97.73	35.61
	case6	8.84	32.67	2.10	69.53	86.00	35.27
	case7	9.01	32.51	2.07	78.02	74.53	34.86
	case8	9.14	32.38	2.05	83.46	66.83	34.55
白天	case5	8.38	25.61	2.07	103.80	177.61	40.59
	case6	8.58	35.43	2.01	120.22	154.93	39.82
	case7	8.81	35.05	1.94	135.63	132.12	39.01
	case8	8.99	34.81	1.91	145.41	117.00	38.41
夜间	case5	9.28	29.95	2.17	19.61	20.92	30.75
	case6	9.12	30.04	2.18	21.47	19.39	30.82
	case7	9.24	30.00	2.18	23.30	18.47	30.79
	case8	9.33	29.97	2.17	24.54	17.77	30.76

地表温度降低幅度偏小,分别降低了 0.93 与 2.58℃。温度的降低导致城市区域内湍流减弱,白天的风速减小了 0.20 m/s,与 case4 风速的减小量相差不大。夜间,由于白天绿色屋顶缓解了城市区域 2 m 近地面气温与地表温度,并且绿色屋顶厚度相对比较厚,则可降低建筑物的热储量。因此,夜间地表的感热通量减小 3.23 W/m²,潜热通量增大 6.13 W/m²。而 case5—8 比 case1 屋顶的比热容偏大,导致夜间近地面气温与地表温度有微弱的增温作用。

4.3 冷却屋顶对城市热岛的影响

根据城市所处的地理位置不同,其城市热岛计算的方法也有所差别。文中城市热岛的计算方法与 Sun 等(2016)一致,其城市热岛效应主要由城市下垫面与郊区农田的差异所导致,因此,城市与郊区 2 m 近地面气温的差值可表示城市热岛强度的大小。如图 1b 所示,半径为 35 km 的黑色圆环为计算城市热岛强度的区域。在半径为 35 km 区域内,红色(Urban and Built-Up)区域代表城区,浅灰色(Cropland)代表郊区。则城市热岛强度可表示为

$$UHI = \bar{T}_{urban} - \bar{T}_{rural} \quad (3)$$

$$\bar{T}_{urban} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad \bar{T}_{rural} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \quad (4)$$

式中, n 与 m 分别代表半径区域城市与郊区的格点总数, T_i 为格点 i 的 2 m 近地面气温, \bar{T}_{urban} 与 \bar{T}_{rural} 分别为城市与郊区的 2 m 近地面平均气温。

图 6 为两种冷却屋顶(case2—8)减缓城市热岛(UHI)效应的 3 d 日变化。高反照率屋顶(case2—4)与不同占比的绿色屋顶(case5—8)整体的城市热岛变化趋势基本一致(图 6a),07—18 时,对照案例(case1)与 case2—8 相比,城市热岛强度有所减弱并出现负值,case2—8 的城市热岛最低负值温度在 12 时前后。21—24 时,城市热岛强度达到最大值 4.46℃。由于白天城市储存的热量,在夜间以长波辐射的方式加热大气。而在白天热岛强度较弱,甚至出现相反的情况成为一个“冷岛”,这与白天城市建筑物的遮挡及城市气溶胶排放对短波辐射的影响有关。

图 6b 为两种冷却屋顶(case2—8)与对照案例(case1)的城市热岛日变化的差值。00—06 时,由于夜间不同占比的绿色屋顶(case5—8)比 case1 的比热容大,其有微弱的升温作用。约在 05 时,随着绿色屋顶占比越大,升温的效果越明显。07 时,case5—8 与 case1 的城市热岛差值达到相同数值,主要因为早上太阳高度角较小,城市区域近地面受建筑物的遮挡作用未被太阳直接照射,而农田区域能接收较多的太阳辐射,导致城市热岛差值几乎为 0。此外,case5—8 与 case1 的城市热岛最大差值出现在 13—14 时,随着绿色屋顶植被占比的增加,城市热岛呈明显的降温效果,植被占比 100% 的绿色屋顶(case8)中,最大的城市热岛差值为 1.10℃。但高反照率屋顶(case2—4)对城市热岛的

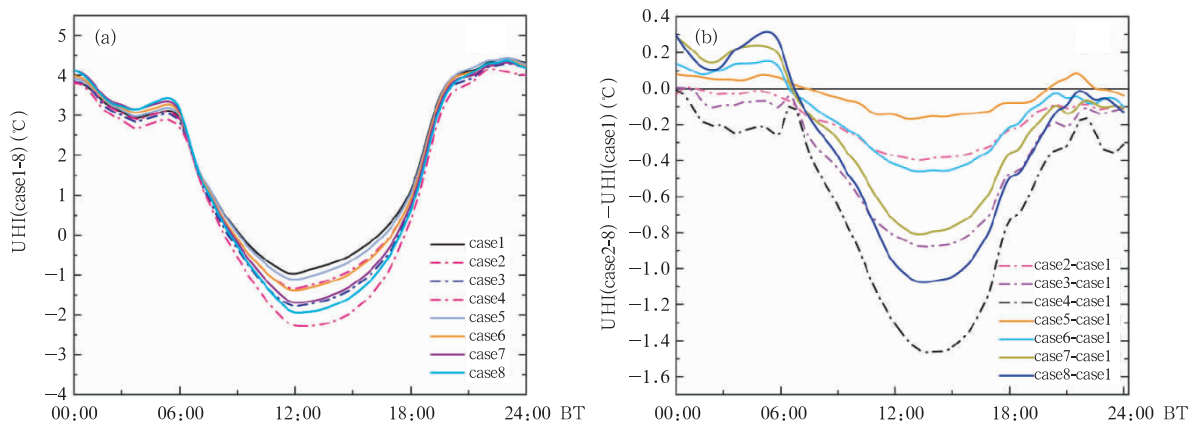


图 6 不同冷却屋顶案例(case2—8)与对照案例(case1)城市热岛(UHI)造成 2 m 气温(°C)的平均日变化
(a. UHI(case1—8)的值, b. UHI(case2—8)与 UHI(case1)的差值)

Fig. 6 Diurnal variations of 2 m temperature T_2 (°C) change induced by the urban heat island (UHI) for cases with different cooling roofs (cases 2-8) and the control case (case 1)
(a. T_2 changes induced by UHI (case 1-8); b. differences in T_2 changes induced by UHI between case 2-8 and case 1)

减缓作用,随反照率的增大,降温效果比绿色屋顶更明显。13—14 时出现城市热岛降温最大值,case4 中城市热岛的最大差值为 1.47℃,比 case8 降温更明显。夜间,由于高反照率屋顶在白天接收太阳辐射减小,降低城市下垫面热存储量,也会有明显的降温效果。

4.4 冷却屋顶对城市边界层结构的影响

图 7 为 2010 年 7 月 4—7 日北京城市区域高反照率为 0.85 的屋顶(case4)和植被占比 100% 的绿色屋顶(case8)与对照案例(case1)中边界层高度及垂直高度上气温 3 d 逐时变化的差值。图 7a、b 中,

case4 与 case8 12—18 时在垂直结构 1.2 km 内降温效果最明显,其中边界层内近地面出现降温最大值分别为 0.71 与 0.66℃。而 case4 与 case1 相比,白天城市区域气温相对降低,城市热储量较少,对夜间也有较明显的降温作用,06 时在垂直高度 0.2 km 以下,降温效果达到 0.10℃。而 case8 在夜间有微弱的增温作用,在 0.2 km 以下,气温平均上升 0.38℃。同时,case4 与 case8 在 3 d 的 12—18 时平均降低边界层高度分别为 669 与 430 m,两者均能促进边界层向稳定的方向发展,但前者比后者更加明显。

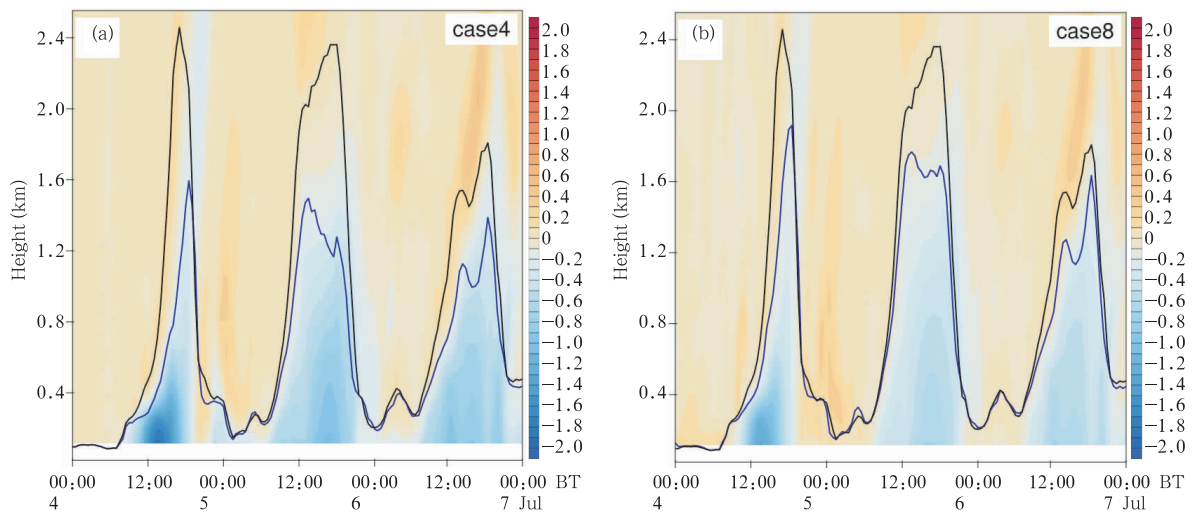


图 7 2010 年 7 月 4—7 日北京城市区域中两种冷却屋顶(a. case4、b. case8)与对照案例(case1)垂直高度上气温(°C)的 3 d 逐时差值(色阶)及边界层的高度(黑色实线为 case1 的边界层高度,蓝色实线为 case8(case4)的边界层高度)

Fig. 7 Time-height cross sections of hourly air temperature differences (°C) between the cases with two types of cooling roof (a. case4, b. case8) and the control case (case1) in the urban area of Beijing during 4–7 July 2010 (The black solid line shows the boundary layer height for case1, and the blue solid line shows the boundary layer height for case8 (case4))

由图 8 可知,白天,两种冷却屋顶能降低边界层的高度,使边界层向稳定的方向发展,从而对湍流交换起抑制作用。对于北京而言,边界层高度降低对城市大气污染物扩散有什么影响呢?为研究两种冷却屋顶使边界层发展更稳定对城市物质扩散的影响,图 8 给出 2010 年 7 月 6 日 08、13、15、17 时,对照案例(case1)与高反照率为 0.85 的屋顶(case4)各要素的垂直变化。由于城市区域有较大的地表空气动力学粗糙度与风切变(Miao, et al, 2009),13、

15、17 时的垂直结构 1.5 km 以下,case4 与 case1 相比城市区域内对流卷动明显减弱。乡村区域在以上 3 个时刻,未有明显的边界层对流卷动的改变。此外,case4 中城市区域的温度有所降低,相对湿度增加的变化不明显。对于 case4 方案的模拟,近地面人为释放的污染物,会在空气中停滞较长时间,给城市居民带来有害的影响。因此,case4 有助于城市热环境的缓解,但不利于城市区域向郊区污染物的扩散。

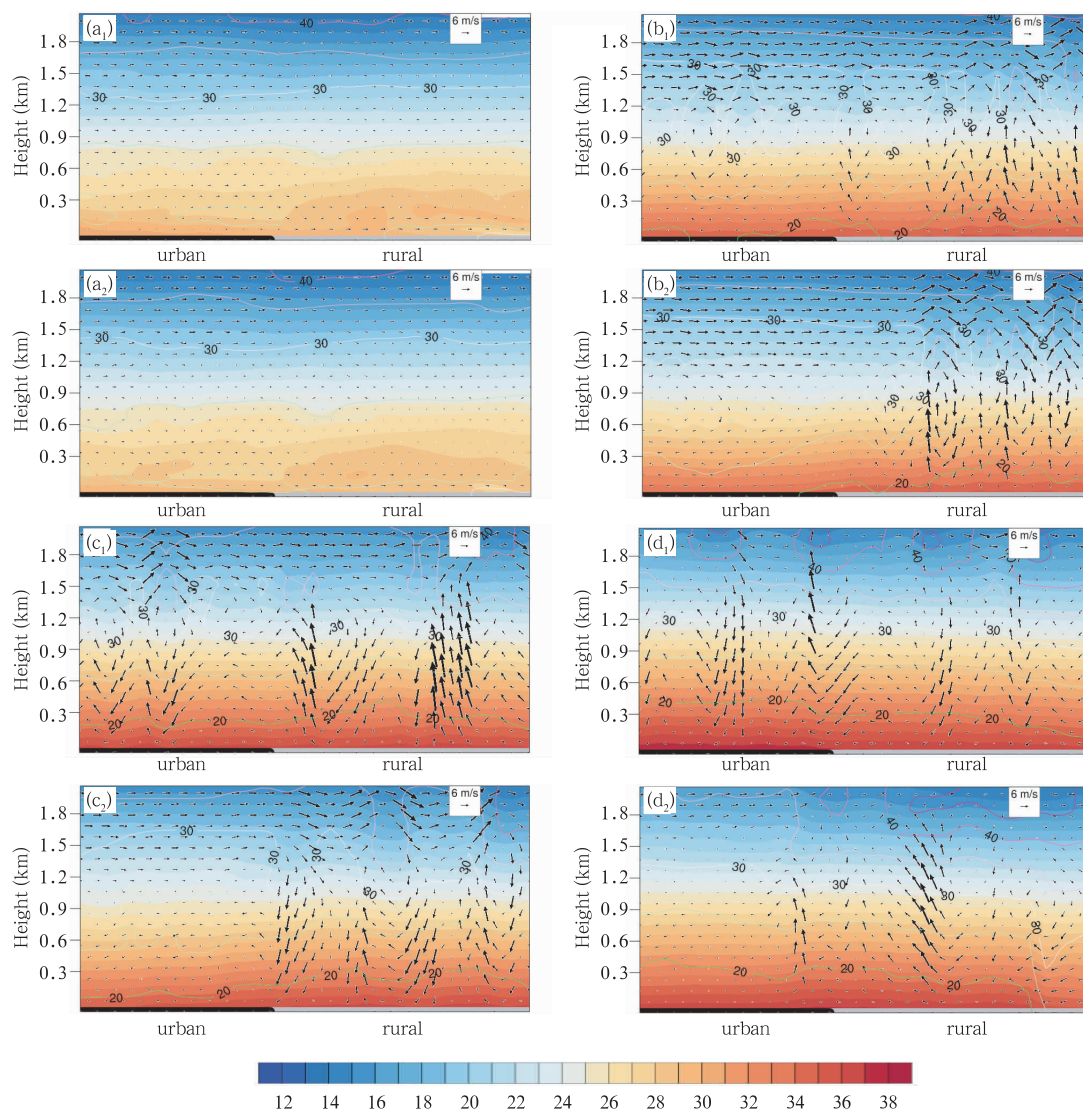


图8 2010年7月6日08时(a)、13时(b)、15时(c)、17时(d)为图1(b)的AB垂直剖面上,高反射率屋顶(case4, a_2-d_2)与对照案例(case1, a_1-d_1)气温(色阶;单位: $^{\circ}\text{C}$)、风场(箭矢;单位: m/s)以及相对湿度(等值线;单位: $\%$)的叠加
(urban与rural分别代表城市和乡村区域)

Fig.8 Vertical cross sections along the line AB (shown in Fig.1) of air temperature (shadings, unit: $^{\circ}\text{C}$) superimposed on wind (vectors, unit: m/s) and relative humidity (contours, unit: $\%$) for the case with high reflectance roof (case4, a_2-d_2) and the control study (case1, a_1-d_1) at 08:00 BT (a), 13:00 BT(b), 15:00 BT(c) and 17:00 BT(d) on 6 July 2010
(urban and rural areas are denoted in the plots)

5 结论

本研究使用了WRF3.8/SLUCM单层城市冠层模式对2010年7月4—7日北京高温热浪天气进行模拟,分别探讨了冷却屋顶(高反射率、绿色屋顶)对城市热岛效应的减缓作用。得到如下初步结论:

(1) 夏季高温下,两种冷却屋顶对近地面城市气象要素存在显著的影响。随着屋顶反射率的逐渐增大,不同高反射率屋顶(case2—4)所分配的感热和潜热都在降低。13时,与对照案例(case1)相比较,感热(潜热)通量最大降幅为 $145.20(23.22)\text{W/m}^2$;绿色屋顶(case5—8)的植被占比越大,潜热通量的增

加越明显,感热通量有所降低。13时,植被占比100%的绿色屋顶(case8)潜热通量增加 66.34 W/m^2 ,感热通量降低 113.58 W/m^2 。同时地表感热、潜热通量的变化对城市区域温度有所影响,其高反照率为0.85的屋顶(case4)对城市区域3d平均降温达到 0.90°C ,case4约为case8降温的两倍。

(2)不同高反照率的屋顶以及不同比例绿色屋顶对城市区域整体降温的效果有差异,随着反照率及绿色植被占比的增加,降温效果随之显著。反照率每增加0.1,城市区域最高温度降温 0.27°C 、平均气温下降 0.10°C 。绿色屋顶每增加10%的覆盖面,最高气温下降 0.16°C ,平均气温下降 0.04°C 。由本文的研究结果可知,北京夏季高反照率屋顶比绿色屋顶最高(平均)降温效果更明显。

(3)两种冷却屋顶对城市区域气温的改变,进而影响了城市热岛的日变化强度,随着屋顶反照率与绿色屋顶占比的提高,对城市热岛强度的影响更加明显。14时,高反照率为0.85的屋顶(case4)、植被占比100%的绿色屋顶(case8)与对照案例(case1)城市热岛的最大差值分别为 1.47 、 1.10°C 。

(4)在3d内12—18时,高反照率屋顶(case4)与绿色屋顶(case8)平均降低边界层高度分别为669与430m。在垂直方向上1.2km内存在明显的降温,湍流运动明显减弱,不利于城市区域污染物的扩散。

由于资料等限制,文中的模拟设计存在很多理想假设,首先城市下垫面的设置为单一的高密度居民区,导致城市热环境的模拟可能存在一定程度的高估,城市和郊区热梯度增大。其次,假设城市区域屋顶100%的覆盖成高反照率薄膜,在实际情况下完成100%的薄膜铺设比例具有很大的局限性。此外,绿色屋顶的设置,在WRF模式中土壤湿度为定值,理想情况下土壤湿度会随着时间变化而降低,使其潜热通量及降温作用减小。

在未来的工作中,冷却屋顶案例的设置需要与实际情况相符,模拟更长时间尺度(例如一年),并在此基础上分析两种冷却屋顶对城市气象要素在不同季节(冬季除外)变化特征的对比,及其在不同背景天气条件下(如暴雨、大风)的综合影响。下一步进行更为符合实际情况的模拟,为国家制定城市规划提供理论支撑。

致谢:衷心感谢北京城市气象研究所为本文提供的数

据支持、南京信息工程大学高性能大型机提供数值计算方面的技术支持。

参考文献

- 王正兴,江玉华,李炬等. 2009. 在北京气象铁塔上测量城市边界层辐射的研究. 高原气象, 28(1): 20-27. Wang Z X, Jiang Y H, Li J, et al. 2009. Study on measurement of urban boundary layer radiation on the meteorological tower in Beijing. Plateau Meteor, 28(1): 20-27
- 伍见军,王咏薇,朱彬等. 2013. 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. 长江流域资源与环境, 22(12): 1627-1634. Wu J J, Wang Y W, Zhu B, et al. 2013. Performance comparison of different urban canopy schemes in WRF model under Chongqing meteorological simulation. Resour Environ Yangtze Basin, 22(12): 1627-1634 (in Chinese)
- Akbari H, Damon Matthews H, Seto D. 2012. The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. Environ Res Lett, 7(2): 024004
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Mon Wea Rev, 129(4): 569-585
- Ching J K S. 2013. A perspective on urban canopy layer modeling for weather, climate and air quality applications. Urban Climate, 3: 13-39
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J Atmos Sci, 46(20): 3077-3107
- Dvorak B, Volder A. 2010. Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. Landsc Urban Plan, 96(4): 197-213
- Georgescu M, Morefield P E, Bierwagen B G, et al. 2014. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. Proc Natl Acad Sci U S A, 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. Mon Wea Rev, 132(1): 103-120
- Hou A Z, Ni G H, Yang H B, et al. 2013. Numerical analysis on the contribution of urbanization to wind stilling: An example over the greater Beijing metropolitan area. J Appl Meteor Climatol, 52(5): 1105-1115
- Jacobson M Z, Ten Hoeve J E. 2012. Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate. J Climate, 25(3): 1028-1044
- Janjić Z I. 1996. The Surface Layer Parameterization in the NCEP Eta Model. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization
- Kovats R S, Hajat S. 2008. Heat stress and public health: A critical review. Ann Rev Pub Health, 29: 41-55

- Li D, Bou-Zeid E. 2013. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves; The impact in cities is larger than the sum of its parts. *J Appl Meteor Climatol*, 52(9): 2051-2064
- Li D, Bou-Zeid E, Oppenheimer M. 2014. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environ Res Lett*, 9(5): 055002
- Miao S G, Chen F, LeMone M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *J Appl Meteor Climatol*, 48(3): 484-501
- Miao S G, Chen F. 2014. Enhanced modeling of latent heat flux from urban surfaces in the Noah/single-layer urban canopy coupled model. *Sci China Earth Sci*, 57(10): 2408-2416
- Millstein D, Menon S. 2011. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment. *Environ Res Lett*, 6(3): 034001
- 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 Geophys Res*, 102(D14): 16663-16682
- Northridge M E, Sclar E. 2003. A joint urban planning and public health framework; Contributions to health impact assessment. *Am J Pub Health*, 93(1): 118-121
- Qiu G Y, Li H Y, Zhang Q T, et al. 2013. Effects of evapotranspiration on mitigation of urban temperature by vegetation and urban agriculture. *J Integr Agric*, 12(8): 1307-1315
- Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *J Environ Sci*, 20(1): 120-128
- Rowe D B. 2011. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environ Pollut*, 159(8-9): 2100-2110
- Saadatian O, Sopian K, Salleh E. 2013. A review of energy aspects of green roofs. *Renew Sust Energy Rev*, 23: 155-168
- 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. *Sol Energy*, 103: 682-703
- 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. *Environ Res Lett*, 11(6): 064004
- Smith K R, Roebber P J. 2011. Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *J Appl Meteor Climatol*, 50(3): 507-522
- Sun T, Grimmond C S B, Ni G H. 2016. How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves?. *J Geophys Res Atmos*, 121(10): 5320-5335
- United Nations. 2007. World urbanization prospects; The 2007 revision.
- Wang X Q, Gong Y B. 2010. The impact of an urban dry island on the summer heat wave and sultry weather in Beijing city. *Chinese Sci Bull*, 55(16): 1657-1661
- Wong E, Akbari H, Bell R, et al. 2011. Reducing urban heat islands; Compendium of strategies. Washington: Environmental Protection Agency
- Wu J Y, Zhou Y, Gao Y, et al. 2014. Estimation and uncertainty analysis of impacts of future heat waves on mortality in the eastern United States. *Environ Health Perspect*, 122(1): 10-16