

南京地区太阳能屋顶缓解夏季高温的模拟研究^{*}

张艳晴^{1,2} 刘寿东^{1,2} 王咏薇^{1,2,3} 郭良辰^{1,2,3} 王 豫^{1,2} 马美娟²
ZHANG Yanqing^{1,2} LIU Shoudong^{1,2} WANG Yongwei^{1,2,3} GUO Liangchen^{1,2,3} WANG Yu^{1,2} MA Meijuan²

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, 南京, 210044
2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京, 210044
3. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044
1. *Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*
2. *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*
3. *College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2017-12-18 收稿, 2018-06-29 改回.

张艳晴, 刘寿东, 王咏薇, 郭良辰, 王豫, 马美娟. 2019. 南京地区太阳能屋顶缓解夏季高温的模拟研究. 气象学报, 77(2): 358-370

Zhang Yanqing, Liu Shoudong, Wang Yongwei, Guo Liangchen, Wang Yu, Ma Meijuan. 2019. Simulation studies for the mitigation of summer urban heat island by rooftop solar photovoltaic deployment in Nanjing area. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(2): 358-370

Abstract The installation of rooftop solar photovoltaic is expected to relieve the energy crisis and urban thermal damage caused by urbanization to some extent. The non-hydrostatic version of the Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with the single layer urban canopy model (UCM) is utilized to simulate the mitigating effect of rooftop solar photovoltaic with various power efficiencies under sunny and breezy weather condition from 27 July to 5 August 2010. The results indicate that: (1) the installation of rooftop solar photovoltaic can reduce the amount of energy needed to import into the city since it can generate energy for local use. This leads to cooling in the urban area since the energy generated by the solar panels can be used locally, which would otherwise heat the urban surface and radiate energy into the atmosphere. The cooling effect becomes more significant with increasing solar panel efficiency, and the daytime cooling effect is stronger than that in the nighttime. The maximum 2 m air temperature can be decreased by 0.4–1.3 and 0.2–0.5 °C in the daytime and nighttime, respectively; (2) the installation of rooftop solar photovoltaic can reduce the planetary boundary layer (PBL) temperature, and the cooling effect is significant below 400 and 200 m in the daytime and nighttime, respectively. The maximum decrease in the PBL temperature during the daytime occurs around noon, and the decreases can be up to 0.1–0.8 and 0.1–0.5 °C in the daytime and nighttime, respectively; (3) the power generation capacity is 18.1×10^9 kW · h within 9 d with the power generation efficiency of 40%.

Key words Rooftop solar photovoltaic, WRF model, Nanjing, Summer high temperature

摘 要 太阳能屋顶的安装预计能在一定程度上缓解城市化带来的能源危机及对城市热环境的破坏。利用耦合了城市单层

^{*} 资助课题: 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(PC-SIRT)、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: 张艳晴, 主要从事大气边界层与大气环境研究。E-mail: 1094806786@qq.com

通信作者: 王咏薇, 主要从事大气边界层与大气环境研究。E-mail: wyw@nuist.edu.cn

冠层方案(UCM)的 WRF 模式,以南京 2010 年 7 月 27 日至 8 月 5 日夏季晴天微风天气为背景,模拟了不同发电效率的太阳能屋顶的安装对城市高温的缓解效应。结果表明:(1)太阳能屋顶可以通过削弱到达城市表面的太阳辐射使城市 2 m 高气温降低,随着发电效率的提高,降温效果更明显,且白天降温效果明显优于夜间;白天 2 m 高气温最大降低 0.4—1.3℃,夜间降低 0.2—0.5℃。(2)太阳能屋顶可使边界层内气温降低,白天在边界层 400 m 以下降温显著,夜间在边界层高度 200 m 以下降温显著;白天边界层内最大降温出现在中午前后,降温 0.1—0.8℃,夜间边界层内最大降温 0.5℃。(3)发电效率为 40%时,模拟期间的发电量为 $18.1 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

关键词 太阳能屋顶, WRF 模式, 南京, 夏季高温

中图法分类号 P435

1 引言

城市仅占全球土地面积的 2%,然而所消耗的能源占到全世界能源消耗的 60%—85%(OMalley, et al, 2014)。当前,各国的城市化发展速度仍然在加快,预计到 2050 年城市人口将达到全球人口的 70%(United Nations, 2014)。而中国作为世界上成长最快的经济体,城市化发展更为迅速,城市化率由 1978 年的 17.9% 上升到 2007 年的 44.9%(Northam, 1975)。一方面,城市化进程的加快使能源危机进一步恶化,Wei 等(2003)指出中国城市化每提高 1%,能源消耗总量将增加 1%。另一方面,城市化进程的加快使局地气候产生极大的变化,使城郊温差更大,产生热岛效应(Oke, 1982)。随着城市热岛效应的加剧,夏季城市中交通工具和建筑的制冷耗能增加,能源消耗加剧。而能源消耗的增加加大了温室气体的排放量,进一步加剧了室外热环境的恶化,由此形成了恶性循环。此外,一些研究表明,城市热岛效应会直接危害城市居民的健康(Li, et al, 2015a; Xu, et al, 2012),甚至在高温热浪期间很有可能造成高的死亡率(Ma, et al, 2015),并且对近地表温度、风速以及能量平衡均有显著的影响(李晓莉等, 2005; 江晓燕等, 2007; 周荣卫等, 2008)。

近年来,科学家们针对缓解城市热岛效应的措施开展了一系列的研究,结果表明大规模冷却屋顶的安装是降低城市温度的有效手段(Akbari, et al, 2009; Menon, et al, 2010; Oleson, et al, 2010; Salamanca, et al, 2012; Scherba, et al, 2011; 周晓宇等, 2019)。高反照率屋顶由于增大了反照率,与普通屋顶相比接收的短波辐射更少,从而使表面温度降低。绿色植被屋顶通过将能量向潜热转移,减少释放到空气中的感热来降低城市温度。一些学者利用引入了太阳能板辐射效应的模型来评估太阳能屋顶对城市生态环境的影响,指出安装太阳能屋顶既

可以通过发电对能源消耗产生直接影响,也能够通过减少化石燃料的燃烧对周围环境产生间接影响。Masson 等(2014)用离线城市冠层模型研究指出,太阳能屋顶可以使法国巴黎城区地表气温降低 0.2℃。Salamanca 等(2016)将太阳能板的参数化方案与 WRF 的多层城市冠层模式相结合,研究了亚利桑那州太阳能屋顶的安装对近地表空气温度的影响,结果表明太阳能屋顶可以使夏季近地表气温降低 0.8℃,冷却能耗降低 11%—14%。Hu 等(2015)使用 CLM4 模型模拟了安装太阳能板对全球气候的影响,指出太阳能板使城市气温降低的主要原因是直接吸收短波辐射用于发电,从而削弱了到达城市地表的辐射。不同屋顶冷却材料比较,传统的树脂涂层如丙烯酸涂层等高反照率材料由于积尘度增加,严重降低了“冷却”的性能(Chukwuka, et al, 2014)。近年来,由于环境污染越来越严重,使用高反照率涂层需要定期清洁,成本较高,退化之后效果不佳(Kurtz, 2012)。而太阳能屋顶反照率较低,颜色较暗,污染物对太阳能板的影响很小,太阳能板退化周期较长,适合长期安装(Rephaeli, et al, 2009; Bermel, et al, 2010; Susca, et al, 2011)。

目前,中国城市化发展速度是全球最快的,太阳能屋顶安装预计能够在一定程度上缓解城市化带来的能源危机及对城市热环境的破坏。但当前中国针对太阳能屋顶对城市热环境影响的研究还未开展。因此,本研究以南京为例,利用耦合了单层城市冠层模式(UCM)的 WRF 模式,探讨不同发电效率的太阳能屋顶对夏季高温的缓解效应,以及为城市规划和能源供给方案的制定提供有效的数据支持。

2 模式及方法

2.1 WRF 模式及方案选择

WRF 是由美国环境预报中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)以及多个大学等联合研发

的一种中尺度天气预报模型。其使用范围广,从小尺度到全球尺度都可以有广泛的应用;同时,不仅可以用于业务预报,还可以用于大气数值模拟研究等多个领域。

当前,有3种城市冠层方案在WRF中供选择:UCM、BEP和BEP+BEM。同时,这3种方案需要与Niu等(2011)和Yang等(2011)开发的Naoh陆面方案相匹配,其在较低的边界层中可以较好地提供地表感热、潜热等变量。本次模拟中的城市冠层方案选择UCM(Kusaka, et al, 2001),不仅是因为其有效降低了计算的复杂程度,而且还考虑了城市的几何特征,建筑物对长波和短波的反射作用以及对辐射的遮挡等,改进了模式对城市动力学和热力学效应的描述,更重要的是引入人为热源,这对城区的热岛特征有更强的模拟能力(王腾蛟等, 2013; 蒙伟光等, 2010)。其他物理参数化方案包括:RRTM长波辐射方案(Mlawer, et al, 1997)、Dudhia短波

辐射方案(Dudhia, 1989)、YSU边界层方案(Mellor, et al, 1982)、WSM6微物理方案(Hong, et al, 2004)和莫宁-奥布霍夫地表方案(Paulson, 1987)等,由于内层研究区具有较高的分辨率,积云参数化方案Grell 3D只在最外层使用。

2.2 算例及城市参数设置

模拟时间为2010年7月25日00时(北京时,下同)至8月5日00时,南京正处“三伏天”,选取7月27日00时至8月5日00时的模拟结果进行分析。采用三重嵌套(55×55 、 61×61 和 88×88),网格分辨率分别为9、3和1 km,中心为(32.06°N , 118.8°E)(图1a)。土地利用使用MODIS产品数据,其将土地类型分为17类,包括南京在内的最内层土地利用如图1b所示。初始和边界条件使用NCEP提供的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的每6 h更新一次的再分析资料。垂直方向分为53层,2 km以下有22层。

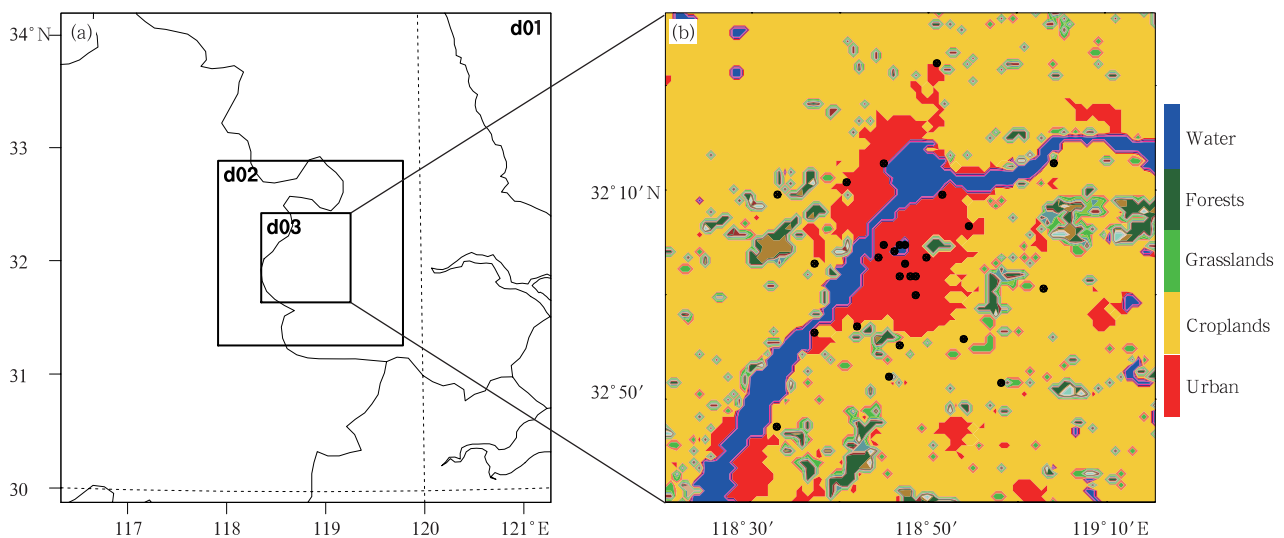


图1 WRF模拟区域以及最内层下垫面分布

(图b中的黑点为自动气象站的位置)

Fig. 1 WRF simulation area and land use in the innermost domain

(black spots in (b) are the locations of automatic weather stations)

城市参数的设定会影响城市地区辐射,进而影响能量平衡,从而对局地气候产生影响。算例中建筑物相关参数的设置(屋顶宽度、街道宽度、楼房高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、比辐射率和热传导率)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的城市地区(具体见表1)。

为了评估不同发电效率的太阳能屋顶对南京夏季高温的缓解作用,根据太阳能板发电效率,设置了5组算例:CTRL为对照算例,即不加太阳能板的普通屋顶,其屋顶反照率为0.2;PV20、PV30、PV40

表 1 模拟算例和城市参数设置
Table 1 Numerical cases and urban parameters

算例名称	CTRL	PV20	PV30	PV40	PV60
城市冠层参数化方案	UCM(Kusaka, et al, 2001)				
模拟时间	2010 年 7 月 27 日—8 月 5 日				
模拟地点	南京(32.06°N, 118.8°E)				
初始和边界条件	NCEP FNL 1°×1°				
嵌套	三层(55×55, 61×61, 88×88)				
水平分辨率(km)	9, 3, 1				
垂直分层	53				
太阳能板发电效率	0	20%	30%	40%	60%
屋顶反照率	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
路面/屋顶/墙面发射率	0.98				
路面/屋顶/墙面热传导率(J/(m·s·K))	1.75×10 ⁶				
路面/屋顶/墙面热容(J/(m ³ ·K))	1.5				
人为热源(W/m ²)	90(Chen, et al, 2016)				

和 PV60 为不同发电效率(20%、30%、40% 和 60%)的太阳能板,太阳能板的反照率为 0.1。

2.3 太阳能屋顶辐射过程的参数化方案

通过在 WRF 模式的 UCM 方案中修改屋顶安装太阳能板后的太阳辐射计算方法,并假设城区所有建筑物屋顶 100%覆盖太阳能板,来分析太阳能屋顶对城市气温的影响。目前,传统的太阳能板(PV)正在快速发展。太阳能板的发电效率从小于 20%(PV)到超过 40%(TPV 和 CSP),预计未来几年会达到 60%(Green, et al, 2016; Lewis, 2007)。因此,本项研究探讨 20%、30%、40% 和 60%(PV20、PV30、PV40 和 PV60)4 种不同发电效率的太阳能屋顶安装对城市的降温效应。同时在模式中添加太阳能板吸收太阳能的计算方案,以 30%的效率为例,由于太阳能板吸收太阳短波辐射,引起本身温度升高,从而增加其向上的长波辐射,因此文中将太阳能板增加的长波辐射折合到吸收的短波辐射当中,综合考虑,将太阳能板的反照率设置为 0.1。其余部分(90%)被太阳能板吸收,吸收的 30%被太阳能板转换成电能,另外的 70%通过太阳能板传输并被下面的表面吸收。因此,模拟的太阳能板的有效效率为 27%(30%×90%)(Ma, et al, 2017)。

此外,采用 Voyant 等(2009)的方法估算太阳能屋顶发电量

$$E_{pv} = \eta_{pv} \times I \times S \tag{1}$$

式中, E_{pv} 为太阳能板的发电量, η_{pv} 为太阳能板的发电效率, I 为太阳辐射量, S 为太阳能板的面积。根据 WRF 模式中的建筑物参数估算南京市建筑物面

积约为城市总面积的 30.83%,从而计算出太阳能屋顶发电量。

3 模式评估

选取 2010 年 7 月 27 日—8 月 5 日 28 个自动气象站逐时 2 m 高气温、2 m 高相对湿度和 10 m 高风速,对模式输出的对照算例进行评估,并将气象站点按照其所在区域下垫面类型分为城市站点(14 个)和郊区站点(14 个)2 类分别进行评估。

城市站点和郊区站点近地表气象参数模拟值和观测值的比较见表 2,同时为了更直观地看出不同下垫面 WRF 模式模拟气象要素的能力,随机选取了能够代表城市、水体、草地和农田下垫面的 8 个站点。从表中可以看出,28 个气象站的平均偏差(MBE)为-0.8℃,均方根误差(RMSE)为 2.12℃,相关系数(R)为 0.88,表明模式的模拟结果较观测低。图 2 给出了城市站点和郊区站点 2 m 高气温、2 m 高相对湿度和 10 m 高风速观测值和模拟值的对比。由图 2a 和 2b 可以看出,2 m 高气温在城市和郊区站点模拟结果和观测值的变化趋势吻合, R 分别为 0.86 和 0.9(表 2),即模式可以模拟出气温的日变化;07—11 时与 15—18 时模拟结果与观测结果匹配得较好,但模拟结果中城市站点和郊区站点最高气温与观测结果相比均较低;城市站点中最低气温与观测结果匹配较好,而非城市站点与观测结果相比较低。城市站点与郊区站点的平均偏差分别为-0.3 和-1.2℃,模拟结果略低于观测。说明在一定程度上,模型可以较准确模拟城市 2 m 高气

温。

对于 2 m 高相对湿度,同样可以模拟出较好的日变化(图 2c—d),城市和郊区相关系数分别为 0.7 和 0.73,平均偏差均为 0.1。模拟结果整体高于观

测结果,对最高和最低 2 m 高相对湿度模拟不足,这是由于模型模拟的 2 m 高气温低于观测结果,而温度较低的大气所容纳的水汽较少,即在相同水汽的情况下,相对湿度将会偏高。

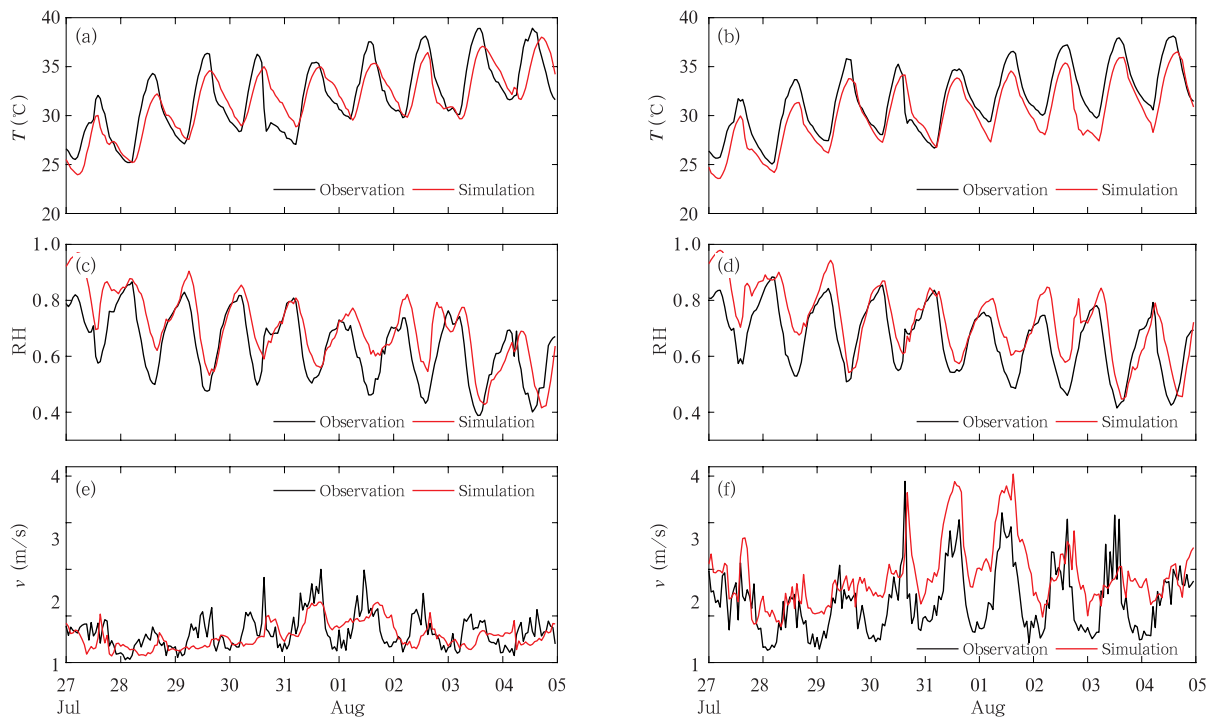


图 2 2 m 高气温、2 m 高相对湿度和 10 m 高风速模拟值与观测值对比

(a、c 和 e 为城市站点, b、d 和 f 为郊区站点)

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

(a, c and e are urban stations, b, d and f are rural stations)

表 2 近地表气象参数模拟值和观测值的比较

Table 2 Comparisons of simulated and observed near-surface meteorological fields

台站		$T_{2\text{ m}}$			$RH_{2\text{ m}}$			$V_{10\text{ m}}$		
		MBE(℃)	R	RMSE(℃)	MBE	R	RMSE	MBE(m/s)	R	RMSE(m/s)
城市	M3545	-1.6	0.92	2.1	0.1	0.77	0.1	-0.1	0.49	1.24
	M3546	0.1	0.78	2.3	0.0	0.72	0.1	-0.7	0.41	1.26
	M3548	-1.9	0.92	2.4	0.1	0.78	0.1	-0.2	0.47	1.37
	M3550	-0.8	0.86	2.2	0.1	0.76	0.2	-0.48	0.70	0.19
	平均*	-0.3	0.86	2.1	0.1	0.70	0.1	-0.2	0.47	0.93
郊区	58237	-0.9	0.93	1.6	0.0	0.65	0.1	0.6	0.54	1.41
	58340	-0.7	0.91	1.6	0.1	0.82	0.1	0.1	0.36	1.79
	M3557	-2.0	0.92	2.5	0.1	0.77	0.1	0.4	0.45	1.79
	M3560	-1.1	0.91	1.8	0.0	0.77	0.1	0.5	0.41	1.81
	平均*	-1.2	0.90	2.1	0.1	0.73	0.1	0.5	0.40	1.49
所有站平均**		-0.8	0.88	2.1	0.1	0.72	0.1	0.1	0.43	1.24

注: * 是指 14 个城市站点和 14 个郊区站点的平均值; ** 是指 28 个站点。

与 2 m 高气温和 2 m 高相对湿度相比,模型虽然不能准确地模拟出 10 m 高风速的数值,但可以较为准确地模拟出变化趋势,同时对风速最大、最小值出现时间吻合较好(图 2e—f)。从表 2 可以看出,城市站点和非城市站点 10 m 高风速的相关系数分别为 0.47 和 0.4,平均偏差分别为 -0.2 和 0.5 m/s,即城市站点风速模拟偏小,非城市站点风速模拟结果偏大。这可能是由于 UCM 方案将城市地区看做一个整体,没有详细考虑冠层内部建筑物的几何学特征,同时冠层内 10 m 高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,这样就高估了城市下垫面的动力粗糙度,导致城市大气模型与观测结果相比风速较小。

4 结果与讨论

4.1 太阳能屋顶对 2 m 高气温的影响

太阳能屋顶的安装对 2 m 高气温有较明显的影响。不同发电效率的太阳能屋顶与对照算例 2010 年 7 月 27 日—8 月 5 日白天(07—19 时)和夜间(20 时—次日 06 时)2 m 高气温差的平均值如图 3 所示。从图中可以看出,太阳能屋顶对 2 m 高气温的降温效果随着发电效率的提高而更加显著,而且白天降温效果明显优于夜间。对于 PV20 方案,白天可以使 2 m 高气温平均降低 $0.2\sim 0.4$ $^{\circ}\text{C}$,而夜间降温也在 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 左右,约为白天降温效果的 $1/2$ 。对于最大发电效率的太阳能屋顶 PV60 白天降温最大为 1.3 $^{\circ}\text{C}$,夜间降温 $0.3\sim 0.5$ $^{\circ}\text{C}$ 。

气温的变化是由城市地表能量平衡变化引起的。为了更好地说明城市地表能量的相关变化,图 4 给出了整个城市地区不同算例城市地表能量的日变化曲线。虽然太阳能屋顶相对于传统屋顶反照率降低,但由于其能将入射的短波辐射转换成电能,导致用于加热城市地区的短波辐射降低,即不同发电效率的太阳能屋顶相对于对照算例在白天净辐射(RN)均减少(图 4d)。同时白天感热通量(SH)和潜热通量(LH)随着太阳能屋顶发电效率的提高而降低(图 4a—b)。图 4c 显示,白天,整个城市地区地面热通量(G)增大,而夜间稍有减小。根据以上的结果可以得出,白天太阳能屋顶的安装使 2 m 高气温降低是由于净辐射的减少,从而使城市地区直接加热大气的感热通量和相变引起的潜热通量减

小;到了夜间,由于城市地表热通量减少使得地面储存的热量减少,可释放加热气温的热量减少,温度降低。

太阳能屋顶的安装对不同时刻 2 m 高气温的影响也不同。表 3 为太阳能屋顶的安装对 24 h 平均以及中午(14 时)2 m 高气温(T_2)、城市热通量和地表温度(T_{sk})的影响。可以看出,夏季太阳能屋顶的安装可以使全天 2 m 高气温降低 $0.4\sim 0.8$ $^{\circ}\text{C}$,中午 2 m 高气温降低 $0.6\sim 1.3$ $^{\circ}\text{C}$ 。对于 PV60 方案,中午 2 m 高气温降低 1.3 $^{\circ}\text{C}$,地表温度降低 3.7 $^{\circ}\text{C}$ 。同时感热通量减少 68.38 W/m^2 ,潜热通量减少了 9.04 W/m^2 ;净辐射减少 82.43 W/m^2 ,而热储存量增加了 6.96 W/m^2 ,进一步说明白天气温的变化主要是由于太阳能屋顶的安装导致的净辐射、感热通量和潜热通量的减小。

4.2 太阳能屋顶对边界层内气温的影响

图 5 为 2010 年 7 月 27 日—8 月 5 日南京整个城市地区边界层内太阳能屋顶与对照算例的边界层高度及气温差值廓线的日变化曲线。可以看出,太阳能屋顶在边界层内的降温效果随着发电效率的提高而增大。对于 PV20、PV30 和 PV40 方案,白天太阳能屋顶的安装使边界层内气温降低 $0.1\sim 0.5$ $^{\circ}\text{C}$,最大降温出现在中午前后,此时太阳辐射最强;而在夜间,太阳能屋顶的安装使边界层内气温降低约 0.1 $^{\circ}\text{C}$ (图 5a—c)。而对于最大发电效率 PV60,白天降温 $0.3\sim 0.8$ $^{\circ}\text{C}$,夜间降温 $0.1\sim 0.4$ $^{\circ}\text{C}$ (图 5d)。白天,城市降温效果在边界层高度 400 m 以下较为明显,而夜间为 200 m 以下。此外,城市高温的缓解不仅改变了近地表气象条件,而且还可以改变局部边界层结构(Sharma, et al, 2016)。太阳能屋顶的安装可以使城市地区边界层高度降低,对于 PV60 方案,白天边界层高度最大降低约 400 m;对于 PV30 和 PV40 方案,边界层高度最大降低约 330 m;而 PV20 方案太阳能屋顶对边界层高度的影响略弱,最大降低约 230 m。边界层高度降低的原因可能是太阳能屋顶的安装使近地表气温降低,削弱了湍流输送,减弱了空气的垂直运动。

4.3 太阳能屋顶的发电量

与其他缓解城市高温的措施不同,太阳能屋顶可以额外发电供住宅、商业和工业使用。图 6 给出了 2010 年 7 月 27 日—8 月 5 日不同效率的太阳能屋顶吸收的太阳能。由图可见,太阳能屋顶吸收的

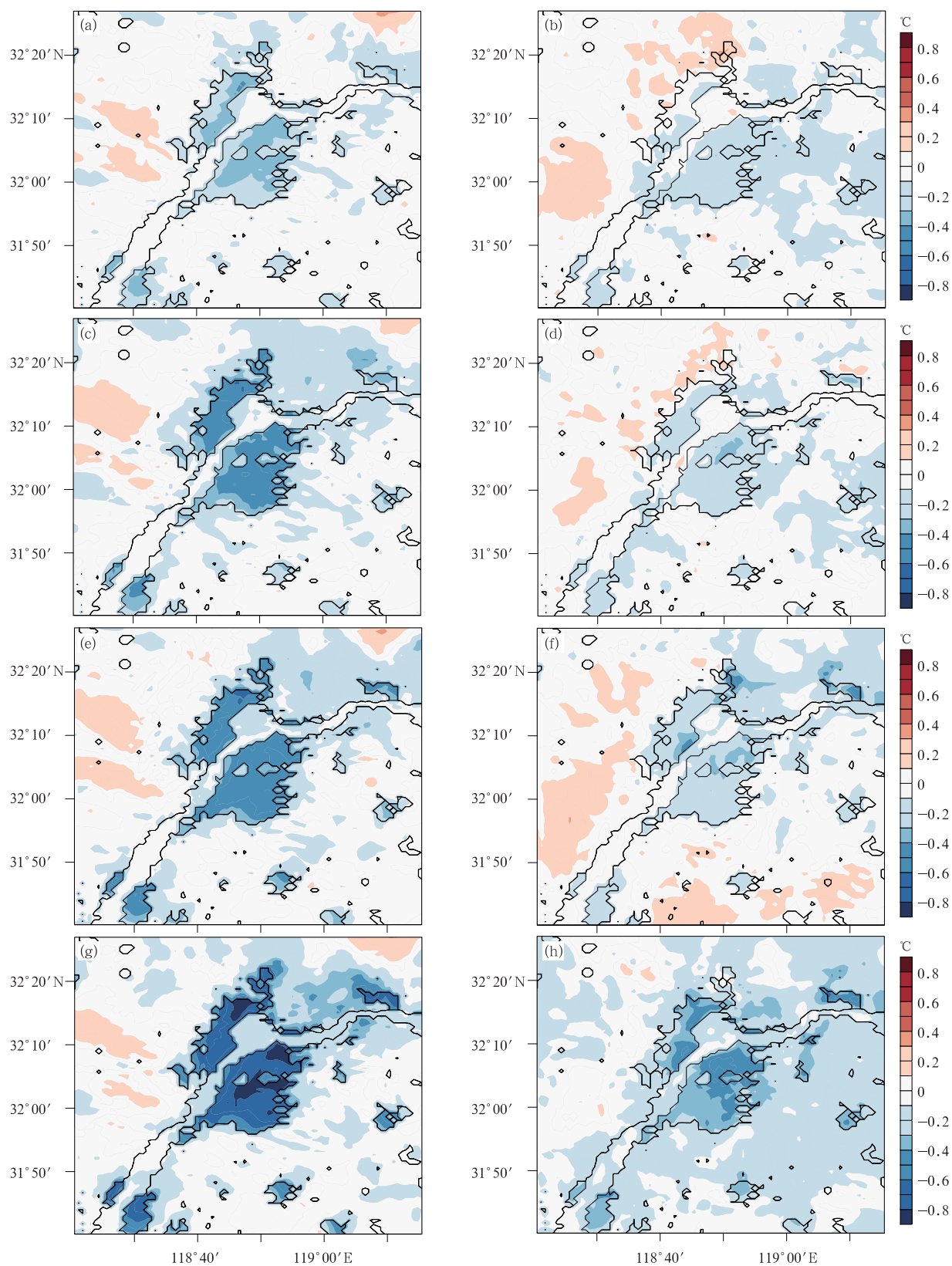


图3 太阳能屋顶在07—19时(a、c、e和g)和20时—次日06时(b、d、f和h)降温模拟结果
(a、b. PV20-CTRL, c、d. PV30-CTRL, e、f. PV40-CTRL, g、h. PV60-CTRL)
Fig. 3 Simulations of the cooling effect of solar panel roof during 07:00–19:00 BT (a, c, e, g)
and 20:00–06:00 BT (b, d, f, h)
(a, b. PV20-CTRL; c, d. PV30-CTRL; e, f. PV40-CTRL; g, h. PV60-CTRL)

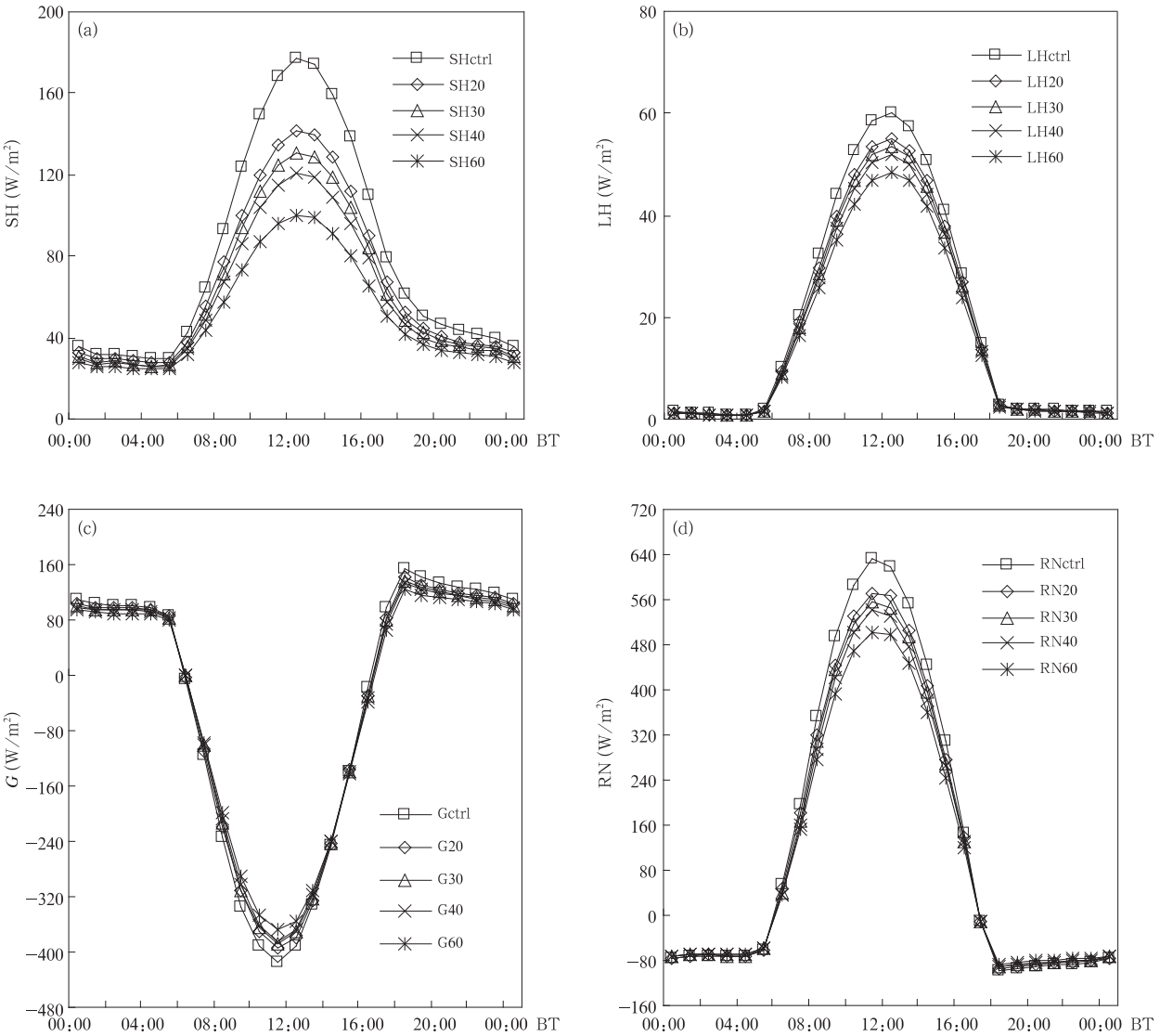


图 4 城市地表能量平衡日变化

(a. 感热通量, b. 潜热通量, c. 地表热通量, d. 净辐射)

Fig. 4 Diurnal variations of urban surface energy balance;

(a. sensible heat flux, b. latent heat flux, c. ground heat flux, d. net radiation)

表 3 24 h 平均以及中午(14 时)城市气象要素变化

Table 3 Changes in meteorological elements in the urban area at the noon time (14:00 BT) and 24 h averages

算例		$T_2(^{\circ}\text{C})$	SH (W/m^2)	LH (W/m^2)	RN (W/m^2)	G (W/m^2)	$T_{\text{SK}}(^{\circ}\text{C})$
24 h 平均	PV20-CTRL	-0.4	-13.30	-1.63	-14.37	-0.15	-0.6
	PV30-CTRL	-0.5	-17.49	-2.12	-18.94	-0.11	-1.3
	PV40-CTRL	-0.5	-21.33	-2.61	-23.02	-0.24	-1.8
	PV60-CTRL	-0.8	-29.01	-3.68	-31.67	-0.03	-2.6
中午(14 时)	PV20-CTRL	-0.6	-30.48	-3.88	-37.36	3.80	-1.3
	PV30-CTRL	-0.8	-40.30	-5.08	-47.72	3.42	-2.0
	PV40-CTRL	-1.0	-49.84	-6.40	-60.96	6.03	-2.8
	PV60-CTRL	-1.3	-68.38	-9.04	-82.43	6.96	-3.7

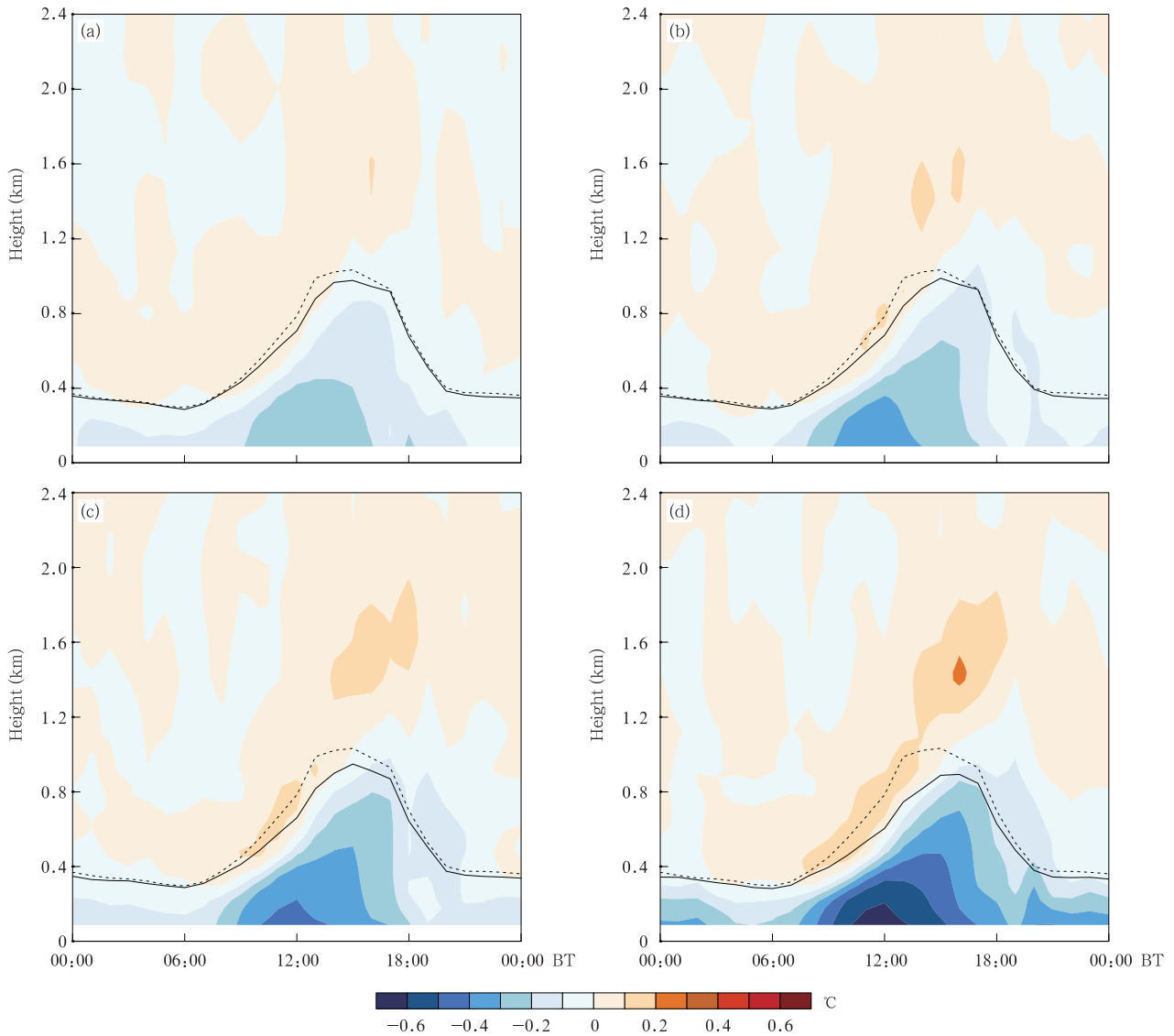


图5 南京城区 CTRL(虚线)与PV(实线)算例模拟的边界层高度及气温差值廓线(色阶)的平均日变化
(a. PV20, b. PV30, c. PV40, d. PV60)

Fig. 5 Variations of area-averaged PBL height (solid line: PV, dotted: CTRL) from experiments with and without solar panel, and profiles of area-averaged temperature difference between experiments with and without solar panel
(a. PV20, b. PV30, c. PV40, d. PV60)

太阳能随发电效率的提高而增大,对于 20%效率的太阳能屋顶,9 d 内吸收的太阳能为 20—25 W/m²;而最大发电效率(60%)太阳能屋顶可以吸收太阳能 60 W/m² 左右。

为了验证在理想化试验中的太阳能屋顶是否能够产生足够的电量来满足南京城市居民的需求。图 7 给出了 2010 年 7 月 27 日—8 月 5 日不同发电效率

太阳能屋顶的发电量(1 TW · h = 10⁹ kW · h)。图 7 显示,PV20 在 9 d 内的发电量为 8.7 × 10⁹ kW · h, PV40 发电量为 18.1 × 10⁹ kW · h,而 PV60 发电量为 26 × 10⁹ kW · h。根据南京市统计局等(2011)的统计,模拟期间全社会用电量为 17.9 × 10⁹ kW · h。以上结果仅仅能说明,2010 年 7 月 27 日—8 月 5 日太阳能屋顶的发电量足够满足同期的用电需求。

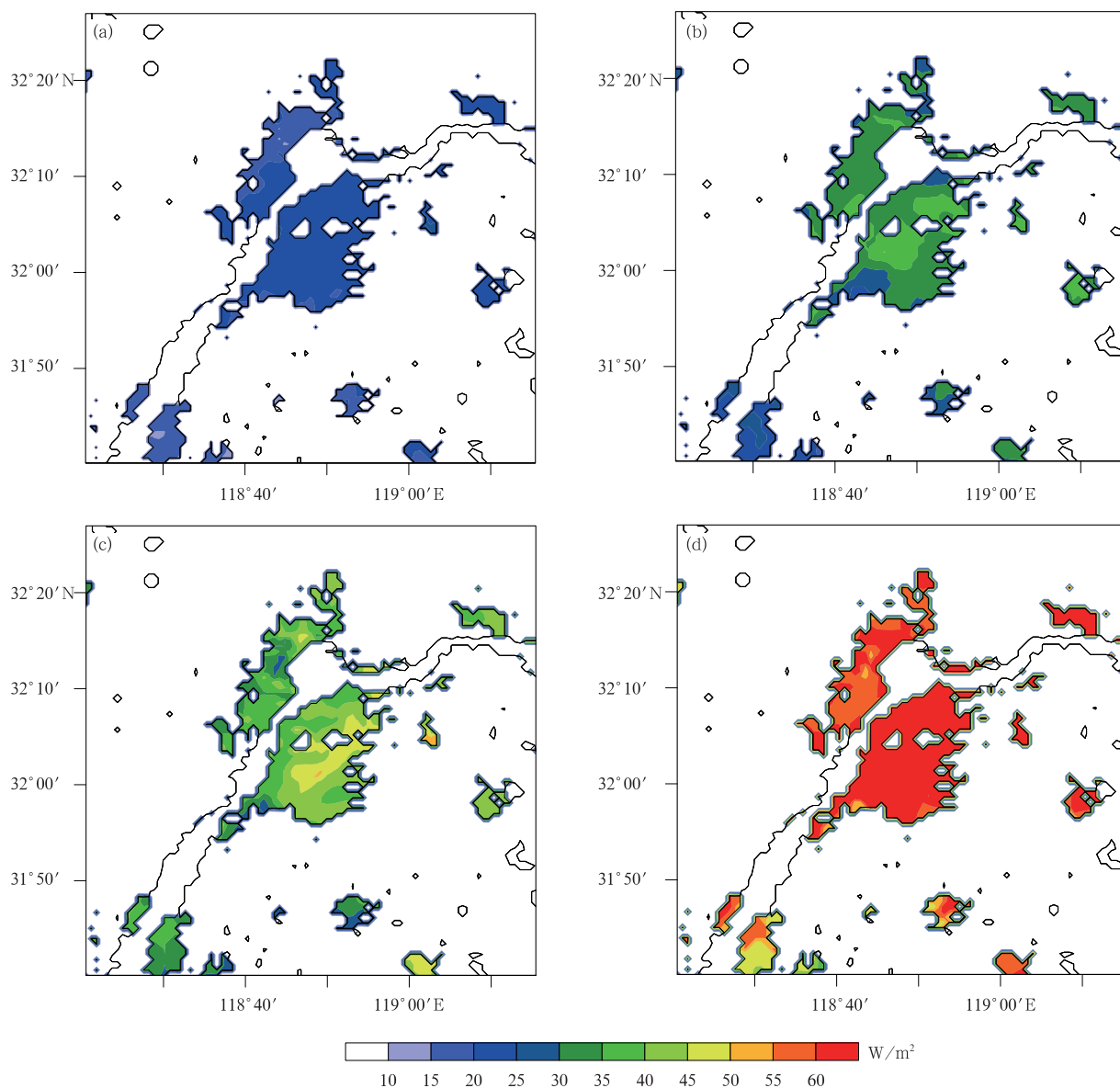


图6 2010年7月27日—8月5日太阳能屋顶吸收的太阳能

(a. PV20, b. PV30, c. PV40, d. PV60)

Fig. 6 Solar energy harvested in individual experiments during 27 July–5 August 2010

(a. PV20, b. PV30, c. PV40, d. PV60)

然而,本研究假设100%覆盖太阳能屋顶,实际情况下,这个覆盖率最多为40%。因此实际发电量将会比上述少约60%(Riahi, et al, 2015)。

5 结论与讨论

利用耦合了单层城市冠层方案(UCM)的WRF模式研究南京夏季大范围安装太阳能屋顶对近地表气温的区域影响。假设建筑物屋顶上100%覆盖太阳能板,而太阳能屋顶的安装有很大的局限性,这一

假设只能作为评估太阳能屋顶对城市热环境影响的参考。与以往缓解夏季高温的策略(高反射率屋顶和绿色屋顶)不同,额外分析了太阳能屋顶产生的能量以及发电量。太阳能屋顶吸收太阳短波辐射用于发电,改变了屋顶表面的辐射平衡,从而改变了城市地表能量平衡。白天由于净辐射的减少,导致使城市地区直接加热大气的感热通量和相变引起的潜热通量减小,从而使2 m 高气温降低0.4—1.3℃。由于夜间没有太阳光,一般会认为太阳能屋顶对2 m

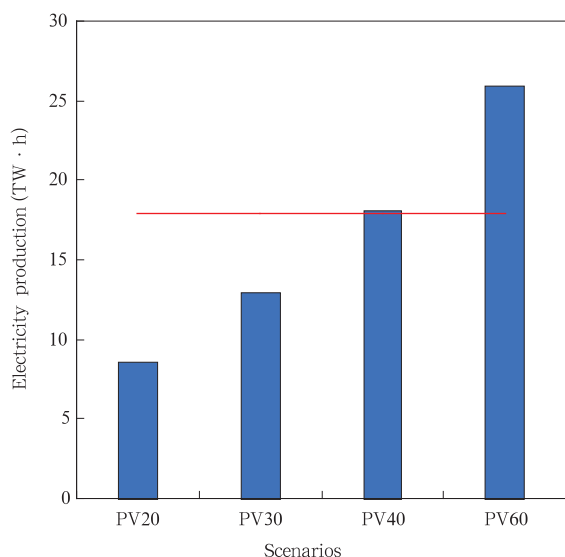


图7 2010年7月27日—8月5日
太阳能屋顶的发电量
(红色实线为期间全社会用电总量)
Fig. 7 Amounts of energy produced for
individual solar panel installation scenarios
during 27 July–5 August 2010
(the red solid line is total electricity consumption)

高气温没有影响,但由于夜间城市地表热通量减少使得地面储存的热量减少,可释放加热气体的热量减小,夜间2 m 高气温降低了0.2—0.5℃。这与Masson等(2014)研究的巴黎地区以及Li等(2015b)模拟的高分辨率的加利福尼亚州的结果相似,即太阳能屋顶在白天和夜间均能使2 m 高气温降低。且随着发电效率的提高,降温效果更加明显,中午(14时)2 m 高气温降低0.6—1.3℃。

太阳能屋顶的安装不仅对近地表气温产生影响,还对边界层内气温有一定的影响。白天边界层内最大降温出现在中午前后,降温0.1—0.8℃,夜间边界层内最大降温约0.5℃。白天在边界层400 m 以下、夜间在边界层高度200 m 以下降温显著。Zhang等(2009)、周晓宇等(2019)研究的高反射率屋顶和绿色屋顶也给出了相似的结论,即与近地表温度降低相比,边界层顶部的温度降低相对较弱。此外,太阳能屋顶的安装使边界层高度显著降低,最大降低约400 m。

太阳能屋顶最直接的好处是发电供用户使用,减少对化石燃料的依赖从而缓解全球变暖。在2010年7月27日—8月5日,太阳能屋顶吸收的

太阳能为20—60 W/m²;发电效率40%时,发电量为 18.1×10^9 kW·h,可以满足模拟期间模拟区社会用电需求。Ma等(2017)模拟了悉尼地区太阳能屋顶的安装,指出太阳能屋顶的安装能够抵消模拟区社会用电量,进一步佐证了以上结果。

在WRF模式中添加太阳能屋顶辐射过程的计算方法时,没有考虑屋顶和太阳能板的热交换,只用了一个简单的方法计算太阳能板吸收的太阳能。在未来的研究中,需要在WRF模式中采用与实际情况相符的太阳能屋顶辐射参数化方案,更好地为城市规划和能源供应方案的制定提供科学依据。

参考文献

- 江晓燕, 张朝林, 高华等. 2007. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响: 个例分析. 气象学报, 65(2): 301-307. Jiang X Y, Zhang C L, Gao H, et al. 2007. Impacts of urban albedo change on urban heat island in Beijing: A case study. Acta Meteor Sinica, 65(2): 301-307 (in Chinese)
- 李晓莉, 毕宝贵, 李泽椿. 2005. 北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究. 气象学报, 63(6): 889-902. Li X L, Bi B G, Li Z C. 2005. Simulation study of formation mechanism of winter urban boundary layer structure over Beijing area. Acta Meteor Sinica, 63(6): 889-902 (in Chinese)
- 蒙伟光, 张艳霞, 李江南等. 2010. WRF/UCM在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用. 热带气象学报, 26(3): 273-282. Meng W G, Zhang Y X, Li J N, et al. 2010. Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou city. J Trop Meteor, 26(3): 273-282 (in Chinese)
- 南京市统计局, 国家统计局南京调查队. 2011. 南京统计年鉴. 北京: 中国统计出版社. Nanjing Bureau of Statistics, Nanjing Survey Team of the National Bureau of Statistics. 2011. Statistical Yearbook of Nanjing. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- 王腾蛟, 张镭, 张博凯等. 2013. 城市下垫面对河谷城市兰州冬季热岛效应及边界层结构的影响. 气象学报, 71(6): 1115-1129. Wang T J, Zhang L, Zhang B K, et al. 2013. The impacts of urban underlying surface on the winter urban heat island effect and the boundary layer structure over the valley city Lanzhou. Acta Meteor Sinica, 71(6): 1115-1129 (in Chinese)
- 周荣卫, 蒋维楣, 何晓凤. 2008. 城市冠层结构热力效应对城市热岛形成及强度影响的模拟研究. 地球物理学报, 51(3): 715-726. Zhou R W, Jiang W M, He X F. 2008. Numerical simulation of the impacts of the thermal effects of urban canopy structure on the formation and the intensity of the urban heat island. Chin J Geophys, 51(3): 715-726 (in Chinese)
- 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. 气象学报, 77(1): 129-141. Zhou X Y, Wang Y W, Sun J H, et al. 2019. A simulation study on the influence of cooling roof on the thermal environment in Beijing. *Acta Meteor Sinica*, 77(1): 129-141 (in Chinese)
- Akbari H, Menon S, Rosenfeld A. 2009. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*, 94(3-4): 275-286
- Bermel P, Ghebrehbrhan M, Chan W, et al. 2010. Design and global optimization of high-efficiency thermophotovoltaic systems. *Opt Express*, 18(S3): A314-A334
- 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. *Theor Appl Climatol*, 125(3-4): 713-728
- Chukwuka C, Folly K A. 2014. Overview of concentrated photovoltaic (CPV) cells. *J Power Energy Eng*, 2(11): 51343
- 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
- Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. 2016. Solar cell efficiency tables (version 47). *Prog Photovol*, 24(1): 3-11
- 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
- Hu A X, Levis S, Meehl G A, et al. 2016. Impact of solar panels on global climate. *Nat Climate Change*, 6(3): 290-294
- Kurtz S. 2012. Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry (revision). Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 737-741
- 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. *Bound Layer Meteor*, 101(3): 329-358
- Lewis N S. 2007. Toward cost-effective solar energy use. *Science*, 315(5813): 798-801
- Li D, Sun T, Liu M F, et al. 2015a. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves. *Environ Res Lett*, 10(5): 054009
- Li J, Georgescu M, Hyde P, et al. 2015b. Regional-scale transport of air pollutants: impacts of southern California emissions on Phoenix ground-level ozone concentrations. *Atmos Chem Phys Dis*, 15(6): 8361-8401
- Ma S, Goldstein M, Pitman A J, et al. 2017. Pricing the urban cooling benefits of solar panel deployment in Sydney, Australia. *Sci Rep*, 7(1): 43938
- Ma W J, Zeng W L, Zhou M G, et al. 2015. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: An analysis from 66 communities. *Environ Int*, 75: 103-109
- Masson V, Bonhomme M, Salagnac J L, et al. 2014. Solar Panels reduce both global warming and urban heat island. *Front Environ Sci*, 2: 14
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a Turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev Geophys*, 20(4): 851-875
- Menon S, Akbari H, Mahanama S, et al. 2010. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO₂ offsets. *Environ Res Lett*, 5(1): 014005
- 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
- Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J Geophys Res*, 116(D12): D12109
- Northam R M. 1975. *Urban Geography*. New York: John Wiley & Sons, 369-342
- Oke T R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quart J Roy Meteor Soc*, 108(455): 1-24
- Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. 2010. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophys Res Lett*, 37(3): L03701
- O'Malley C, Piroozfarb P A E, Farr E R P, et al. 2014. An investigation into minimizing urban heat island (UHI) effects: A UK perspective. *Energy Procedia*, 62: 72-80
- Paulson C A. 1970. The Mathematical Representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J Appl Meteor*, 9(6): 857-861
- Rephaeli E, Fan S H. 2009. Absorber and emitter for solar thermophotovoltaic systems to achieve efficiency exceeding the Shockley-Queisser limit. *Opt Express*, 17(17): 15145-15159
- Riahi K, Kriegler E, Johnson N, et al. 2015. Locked into Copenhagen pledges-implications of short-term emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals. *Technol Forecasting Soc Change*, 90: 8-23
- Salamanca F, Tonse S, Menon S, et al. 2012. Top-of-atmosphere radiative cooling with white roofs: Experimental verification and model-based evaluation. *Environ Res Lett*, 7(4): 044007
- 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. *Bound Layer Meteor*, 161(1): 203-221
- Scherba A, Sailor D J, Rosenstiel T N, et al. 2011. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Build Environ*, 46(12): 2542-2551
- Sharma A, Conry P, Fernando H J S, et al. 2016. Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metro-

- politan area: Evaluation with a regional climate model. *Environ Res Lett*, 11(6): 064004
- Susca T, Gaffin S R, Dell'Osso G R. 2011. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environ Pollut*, 159(8-9): 2119-2126
- United Nations. 2014. World urbanization prospects: The 2014 revision. <http://esa.un.org/unpd/wup/FinalReport/WUP2014-Report.pdf>
- Voyant C, Muselli M, Paoli C, et al. 2009. Predictability of PV power grid performance on insular sites without weather stations: use of artificial neural networks//Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg: 4141-4144
- Wei B R, Yagita H, Inaba A, et al. 2003. Urbanization impact on energy demand and CO₂ emission in China. *J Chongqing Univ-Eng Ei*, 2(S1): 46-50
- Xu Z W, Etzel R A, Su H, et al. 2012. Impact of ambient temperature on children's health: A systematic review. *Environ Res*, 117: 120-131
- Yang Z L, Niu G Y, Mitchell K E, et al. 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *J Geophys Res*, 116(D12): D12110
- Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. *J Geophys Res*, 114(D2): D02116