

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.

屋顶绿化对城市降温效应的模拟分析 ——以南京市为例^{*}

沈滢洁 王成刚 曹 乐 郜海阳 王咏薇

南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

提 要: 利用 WRF 模式耦合单层城市冠层模式, 针对屋顶绿化对城市降温效果进行了模拟, 结果表明: (1) 南京夏季绿化后的屋顶反照率约为 0.15, 较水泥及其他反光材料的反照率略小, 在白天可造成约 0.2℃ 的升温。 (2) 绿化后的屋顶热容量明显增加, 可使白天气温下降 0.33℃; 在夜间, 可使气温升高 0.21℃ 左右。 (3) 在植被阻挡作用及土壤层阻挡作用下, 屋顶的导热率降低。在白天, 净辐射能很难向下层传递, 从而转化为感热加热大气, 造成气温升高。 (4) 土壤湿度的改变使更多净辐射能转化为潜热释放。在白天可使温度降低 1.23℃; 在夜间, 平均降温幅度为 0.44℃。除此之外, 模拟不同季节的统计结果表明, 屋顶绿化降温效果在夏季最为明显, 最大降幅可达 1.22℃, 春季 0.96℃, 秋季 0.75℃, 冬季只有 0.38℃。

关键词: 城市热岛, 屋顶绿化, 城市下垫面, 数值模拟

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.010

A Case Study of Simulated Cooling Effect of Roof Greening in Urban Area of Nanjing

SHEN Yingjie WANG Chenggang CAO Le GAO Haiyang WANG Yongwei

School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: In the present study, the WRF model with the incorporation of a Single Layer Urban Canopy Model is used to investigate the cooling effect of roof greening in Nanjing. Sensitivity tests of albedo, heat capacity, thermal conductivity and humidity are conducted for the time period from 28 to 29 July 2013. The simulation results show that: (1) the albedo of roofs is reduced to approximately 0.15 after greening, which is smaller than the albedo values of the roofs built with cement or other reflective materials. This result may lead to the increase of city temperature by 0.2℃ in daytime. (2) The heat capacity of roofs increases significantly after greening, leading to the decline of temperature by 0.33℃ in daytime while the temperature at night increases by about 0.21℃. (3) Due to the existence of vegetation and soil layer, the thermal conductivity of roofs is weakened. As a result, the net radiation on roofs is more easily converted to sensible heat rather than being transferred downwards, warming the overlying ambient air. (4) The change of soil humidity enhances the release of latent heat from the net radiation on roofs. Therefore, temperatures in daytime and nighttime are reduced by about 1.23℃ and 0.44℃, respectively. In addition, the statistical analysis of the simulation results for different seasons shows that the reduction of temperature by roof greening is the strongest in summer, which can reach 1.22℃. In comparison, the temperature decreases by about 0.96℃ in spring, 0.75℃ in autumn and only 0.38℃ in winter.

^{*} 中国气象局气候变化专项(CCSF201618)、教育部留学回国人员科研启动基金和国家自然科学基金项目(41675016)共同资助
2015年11月28日收稿; 2017年3月31日收修定稿

第一作者: 沈滢洁, 主要从事大气物理与大气环境研究. Email: shen_alice@yahoo.com

通信作者: 王成刚, 主要从事边界层气象学研究. Email: wcg@nuist.edu.cn

Key words: urban heat island, roof greening, city underlying surface, numerical simulation

引言

随着全球城市化进程的不断加快,城市热岛现象日益明显,严重影响了人类健康,同时对城市能源消耗、大气污染扩散以及城市生态系统的维护都带来了许多负面影响(Tran et al, 2006; 朱正伟和王猛, 2009; 邓玉娇等, 2010; 葛伟强等, 2010; 张逢生等, 2011; 杨鹏等, 2013)。因此,如何缓解城市热岛效应成为近年来的研究热点。大量研究表明,城市下垫面性质对热岛效应的影响最为显著(周淑贞和束炯, 1994; 王艳霞等, 2006; 徐祥德和汤绪, 2002; 寿亦萱和张大林, 2012; 王腾蛟等, 2013)。城市下垫面通常是由混凝土和沥青等构成的建筑物和道路组成,相对于自然表面,这些人造地表一般具有较大的反照率、较小的热容量以及很小的蒸发和蒸腾特征,因此能更有效地将入射太阳辐射转换为热量,使城市气温升高。针对这一特征,国内外学者指出,可以通过提高城市绿地覆盖率、增加城区水域面积和改变城市地表属性等方案来缓解这一现象(丁金才等, 2002; 王艳霞等, 2006)。然而在新建及扩建的城市区域,高密度建筑物所占比重较大,可利用的闲置土地极其有限,因此研究人员将目光转向屋顶。屋顶绿化是缓解热岛效应最为有效的方法之一(Santamouris, 2014),该方法不仅可以缓解城市热岛效应,还有贮藏降雨、净化空气和水质以及降低噪声等优点(张逢生等, 2011)。

近年来,有关城市屋顶绿化的研究方法主要有两大类:(1)通过实际观测对比屋顶绿化前后气温的变化。如刘维东等(2012)对成都一屋顶花园中25种屋顶绿化木本植物的降温增湿能力进行测量,结果表明贴梗海棠降温作用最好,可达 1.23°C ;肖拓等(2014)分别对长沙经过绿化和未绿化的屋顶表面温度进行测量,结果表明,绿化后的屋顶表面温度比未绿化的低 $2.8\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。此类研究结果表明,屋顶绿化对局地降温有较明显的效果,但这些研究主要是针对单体建筑的分析讨论,而对屋顶绿化降温原理的讨论较少。(2)通过数值模拟方法对屋顶绿化前后气温的变化开展讨论。如Savio et al(2006)利用MM5模拟对比了纽约地区屋顶绿化前后气温的差异,结果表明屋顶绿化可以使2 m高度的最高气温

降低 $0.37\sim 0.86\text{ K}$,日平均气温降低 $0.3\sim 0.55\text{ K}$; Zinzi and Agnoli(2012)利用建筑能耗模拟软件(Design Builder)对巴塞罗那北部边缘、开罗南部边缘和巴勒莫中部盆地不同类型的屋顶进行模拟,结果表明屋顶绿化后的气温比普通屋顶下的气温低 $17\%\sim 28\%$; Smith and Roebber(2011)利用WRF模式模拟了芝加哥屋顶绿化的降温效果,结果表明屋顶绿化可以使气温降低 1°C 左右。但模式中仅讨论了屋顶绿化前后反照率和湿度差异对气温的影响,而忽略了植被覆盖层的热容量及导热率等因素的影响,因此,需要进一步深入讨论。

南京作为我国典型的大型城市,随着城市规模不断扩大,热岛强度和热岛范围不断增长(杨英宝等, 2007; 闫少锋等, 2011; 樊高峰等, 2015; 谢志清等, 2015; 刘伟东等, 2016),但有关缓解城市热岛的问题讨论较少。本文立足于Smith and Roebber(2011)的研究,针对南京热岛的现状,利用数值模拟的方法就屋顶绿化前后反照率、热容量、导热率和土壤湿度变化对城市热岛效应的影响开展深入讨论。此外,文中还统计分析不同季节条件下屋顶绿化对热岛的降温效果,以便为今后南京城市热岛的缓解提供科学的理论依据。

1 试验方案设计

1.1 区域设置及参数化方案选取

本文选用WRF模式3.4版本耦合单层冠层模式(WRF+UCM)对南京地区四个季节典型晴天条件的气温日变化进行模拟。综合南京23个自动站观测资料,选择天气晴朗、气温较高和风速不大,有利于形成城市热岛的12个例进行模拟,如表1所示。

这次模拟采用 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ NCEP/NCAR全球再分析资料,模拟采用四层嵌套方式,模拟中心点位于南京市中心(32.03°N 、 118.46°E),四层嵌套的格距分别为27、9、3和1 km,网格数分别为 127×127 、 85×85 、 109×109 和 151×151 。模拟区域覆盖了南京城区及周边郊区,图1为南京土地利用类型。物理参数化方案的选取以宋静等(2009)对南京气候的研究为基础,长波辐射采用RRTM方案,短波辐射采用

表 1 模拟时间及天气条件

Table 1 Date and weather condition of simulation

季节	模拟时间/年-月-日	最高气温/°C	最低气温/°C	天气	风向	风力
冬季	2013-1-17	4	-4	晴	东北风—东风	4~5 级转 3~4 级
	2013-1-18	5	-2	晴	东南风	3~4 级
	2013-1-19	9	3	晴转多云	东南风	3~4 级
春季	2013-4-25	26	9	多云	西风—北风	3~4 级
	2013-4-26	30	13	晴	南风	3~4 级
	2013-4-27	30	16	晴	西南风	4~5 级到 3~4 级
夏季	2013-7-28	37	28	多云	西南风	3~4 级
	2013-7-29	36	29	多云	西南风	3~4 级
	2013-7-30	36	29	多云	西南风	3~4 级
秋季	2013-10-25	18	8	晴	北风	4~5 级到 3~4 级
	2013-10-26	19	8	晴	北风—东南风	3~4 级
	2013-10-27	20	10	晴转多云	东南风	3~4 级

Dudhia 方案,近地面层采用 Monin-Obukhov (Janjic)方案,陆面过程采用 Noah 陆面模式,边界层采用 Mellor-Yamada-Janjic 方案。城市冠层模式中一些物理参数的选取基于肖丹等(2011)的工作,并在此基础上,针对南京的实际情况对部分动力和热力学参数进行了调整,使得模拟结果与观测结果尽量相符,如表 2 所示。为减小系统误差,以下模拟结果均取区域平均值后进行分析。

1.2 模式性能检验

为了检验模式对南京地区热岛效应的模拟效果,利用 2013 年 7 月 28 日 20 时至 29 日 20 时南京

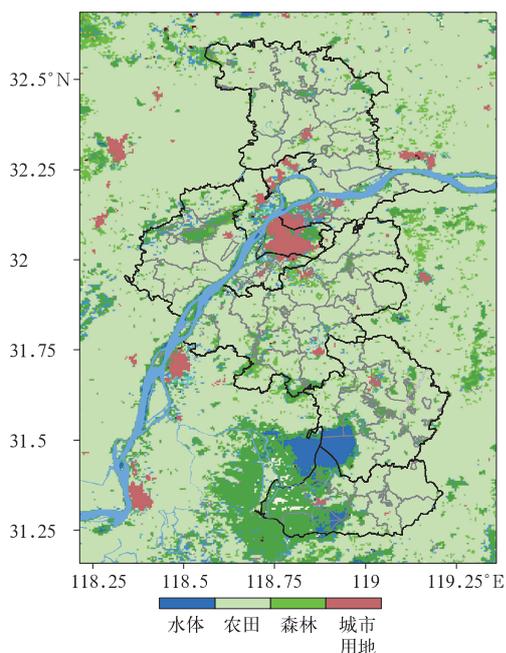


图 1 南京土地利用类型

Fig. 1 Land-use category in Nanjing

表 2 单层城市冠层模式中参数的设置

Table 2 Parameters in UCM model

参数	工商业区	高密度住宅区	低密度住宅区
屋顶、街谷宽度/m	10.0	9.4	8.3
建筑物拖曳系数	0.1	0.1	0.1
人为热/ $W \cdot m^{-2}$	90	50	20
屋顶、墙面、路面导热率/ $J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	0.67	0.67	0.67
屋顶、墙面、路面反射率	0.2	0.2	0.2
屋顶、墙面、路面热容量/ $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	1.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^6

北极阁观测站(城区站点)以及南京信息工程大学气象观测场(郊区站点)的观测数据与模拟结果进行对比检验,图 2a、2b 分别为城区和郊区观测值与模式模拟的 2 m 高度气温的对比结果,由图可见城区模拟结果的气温平均相差 $0.6^{\circ}C$,模拟值与观测值的相关系数和均方根误差分别为 0.98 和 $0.69^{\circ}C$;郊区模拟结果的气温平均相差 $0.8^{\circ}C$,模拟值与观测值的相关系数和均方根误差分别为 0.97 和 $0.98^{\circ}C$ 。不论城区还是郊区,其日变化趋势与观测结果基本一致,表明模式对南京地区热岛的模拟效果较好。

2 屋顶绿化对城市热岛效应影响的模拟分析

气温的变化受地表能量平衡的影响最大,在城市区域能量平衡方程如式(1)所示。

$$R_n = H + LE + G + \Delta Q_s + \Delta Q_a \quad (1)$$

式中, R_n 为净辐射通量, H 为感热通量(单位: $W \cdot m^{-2}$), LE 为潜热通量(单位: $W \cdot m^{-2}$), G 为地

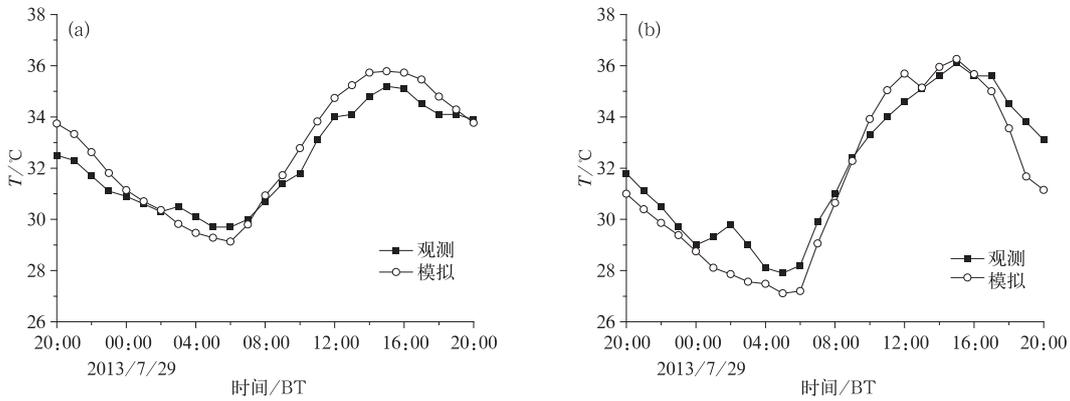


图 2 城市站点(a)和郊区站点(b)2 m 高度处气温的观测值与模拟值的对比结果

Fig. 2 Comparison between the result of observed and simulated air temperature at 2 m height (a) urban area, (b) rural area

表向下的热通量(单位: $W \cdot m^{-2}$), ΔQ_s 为地表的热储存量(单位: $W \cdot m^{-2}$), ΔQ_a 为该区域的人为热(单位: $W \cdot m^{-2}$)。

屋顶绿化前后对城市地表能量平衡的影响主要体现在几个方面(图 3): (1)反照率的减小。相对于颜色较浅的屋顶,绿色植被可使屋顶反照率减小,从而在一定程度上增加 R_n 的获取。(2)热容量的增加。在“植被+土壤+屋顶”的共同作用下,下垫面对热量的储存能力明显增强,即 ΔQ_s 会有所增加。(3)导热率的降低。在叶片和土壤的阻挡作用下, G 减小。(4)蒸腾、蒸发作用的增加。植物叶面的蒸腾作用,土壤水分的蒸发作用都可以将水分以气态的形式散发到大气中,同时带走大量热量,即 LE 明显增加。再加上 ΔQ_a 不变的条件下,屋顶绿化后的 H

通常会减小,故此,气温值也会降低。但这四个影响因素对城市热岛的贡献率不同,需要进一步讨论。因此,下文分别针对这四个因素的影响效果进行了敏感性试验。模拟时段选为 2013 年 7 月 28 日 20 时至 30 日 08 时。由于受到屋顶承重能力的限制,相较于种植灌木、乔木等绿化方式,种植草地更具可行性,因此本文主要针对草地对这四个因素的影响展开讨论。

2.1 屋顶反照率变化对降温效果的影响

反照率是指反射的太阳辐射通量与入射值的比。现阶段,建筑物屋顶材质多为沥青、混凝土、水泥及一些反光材质。不同材质的反照率有较大差异,根据南京本地的实际调查及前人的研究结果(Oke, 1978; Wong et al, 2003; Lazzarin et al, 2005),本文选取了三种不同材质屋顶进行对比研究。其中,屋顶种植绿色植被后反照率 $\alpha_1 = 0.15$, 水泥材质屋顶 $\alpha_2 = 0.2$, 反光材料屋顶 $\alpha_3 = 0.4$ 。

图 4 给出了三种不同反照率条件下 2 m 高度处气温的模拟结果。由图 4a 可见,三种模拟结果在趋势上有很好的 consistency,只是在量值上有细小差异。总体来看,白天差异略大,夜间较小。通过图 4b 中温差的日变化分布图,可以更加清晰地看到,当反照率分别为 0.15 与 0.2 时,气温差异($\Delta T_{\alpha_2 - \alpha_1}$)全天都在 0 值附近振荡,日平均差值仅为 $-0.06^\circ C$,最大差值出现在白天,只有 $-0.21^\circ C$ 。这一现象表明,屋顶绿化后,反照率虽然略有降低,但由此导致的气温升高现象并不明显。而对比反照率分别为 0.15 与 0.4 时的模拟结果可以发现,随着反照率的增大对降温也越明显,而且还有显著的日变化特征。由

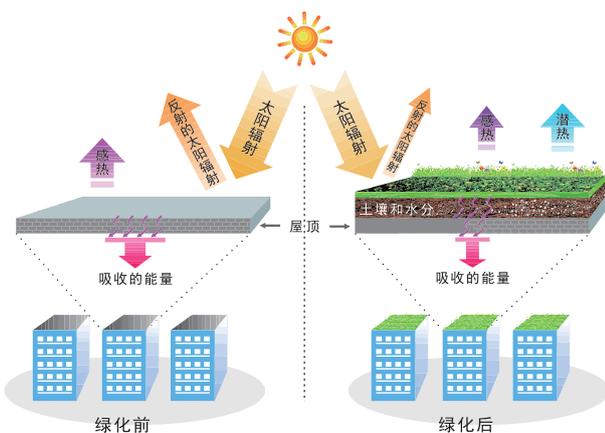


图 3 屋顶绿化前后城市地表能量平衡变化示意图 (略去人为热)

Fig. 3 Schematic diagram of surface energy budget in urban area before and after greening the roof (Anthropogenic heat is omitted)

图 4b 中 $\Delta T_{a_3-a_1}$ 的日变化分布可见,日平均差值为 -0.25°C ,最大差值出现在白天,可达 -0.6°C ,降温效果明显。同时可以看出降温效果主要集中在白天,而在夜间并不明显,这主要是由于反照率只与白天的短波辐射有关,而不涉及夜间的长波,因此反照率对夜间气温的影响可以忽略不计。

2.2 屋顶热容量变化对降温效果的影响

热容量是指一个物体的温度升高(或降低) 1°C 时所需要吸收(或放出)的热量。草地、耕地和林地等植被下垫面的热容量比沥青、水泥等的热容量大。

根据南京本地的实际调查及前人的研究结果(Oke, 1978; Wong et al, 2003; Lazzarin et al, 2005),本文选取了三种不同材质屋顶进行对比研究。其中,水泥材料屋顶热容量 $c_1=1.0\times 10^6\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$,铺满干燥土壤的屋顶热容量 $c_2=2.0\times 10^6\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$,铺满潮湿土壤的屋顶热容量 $c_3=3.1\times 10^6\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

图 5 给出了三种不同热容量条件下 2 m 高度处气温的模拟结果。由图 5a 可见,三种模拟结果在趋势上有很好的 consistency,只是在量值上略有差异。总体来看,白天与夜间的温度差异相差不大。通过

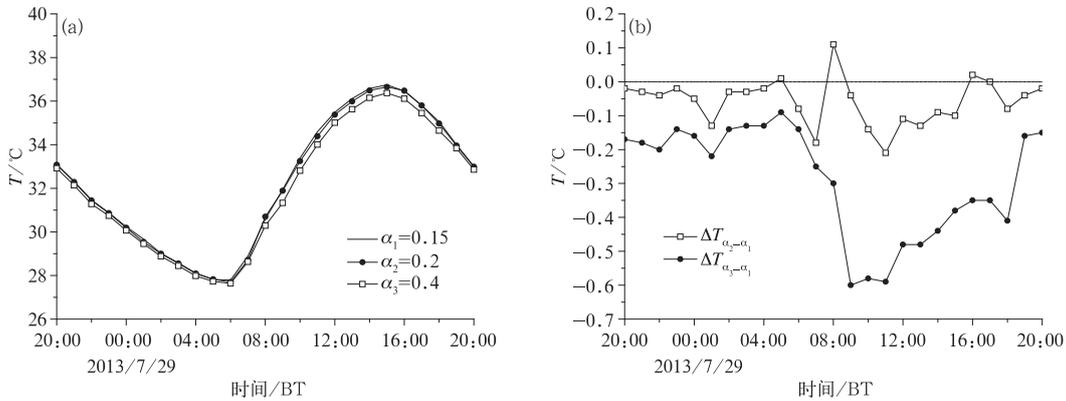


图 4 (a)不同反照率条件下 2 m 高度气温模拟结果的日变化分布和(b)温差的日变化分布 ($\Delta T_{a_2-a_1}$ 为反照率为 0.2 与 0.15 时的气温差值, $\Delta T_{a_3-a_1}$ 为反照率为 0.4 与 0.15 时的气温差值)

Fig. 4 (a) Daily variation of simulated temperature distribution at 2 m height on different albedo; (b) daily variation of $\Delta T_{a_2-a_1}$ and $\Delta T_{a_3-a_1}$ ($\Delta T_{a_2-a_1}$ and $\Delta T_{a_3-a_1}$ are the differences of the temperature when albedos are 0.2 and 0.15, and the difference of the temperature when albedo is 0.4 and 0.15, respectively)

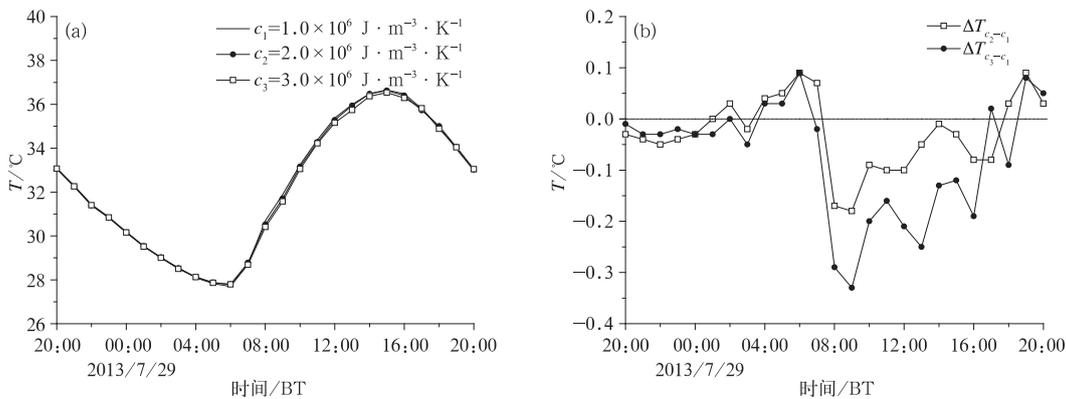


图 5 同图 4, 但为不同热容量条件下 ($\Delta T_{c_2-c_1}$ 为热容量为 2.0×10^6 与 $1.0\times 10^6\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ 时的气温差值, $\Delta T_{c_3-c_1}$ 为热容量为 3.1×10^6 与 $1.0\times 10^6\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ 时的气温差值)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but on different heat capacity ($\Delta T_{c_2-c_1}$ and $\Delta T_{c_3-c_1}$ are the differences of the temperature when heat capacities are 2.0×10^6 and $1.0\times 10^6\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$, 3.1×10^6 and $1.0\times 10^6\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$, respectively)

图 5b 中温差的日变化分布图,可以更加清晰地看到,当热容量分别为 1.0×10^6 与 $2.0 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,气温差异 ($\Delta T_{c_2-c_1}$) 白天为负,最大差异达 -0.18°C ;夜间为正,最大差异达 0.17°C 。这一现象表明,屋顶绿化后,热容量增大,在白天导致气温降低,而在夜间则导致气温升高。对比热容量分别为 1.0×10^6 与 $3.1 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ 时的模拟结果也可以发现,随着热容量的增大白天降温越明显,夜间升温也越明显。由图 5b 中 $\Delta T_{c_3-c_1}$ 的日变化分布可见, $\Delta T_{c_3-c_1}$ 在白天气温的最大差值可达 -0.33°C ,而在夜间气温的最大差值可达 0.21°C 。这主要是因为白天绿化后的屋顶能够储存更多的净辐射能,而不将其释放大气中,对周围空气的加热作用也较小;夜间在没有净辐射的作用下,屋顶储热缓慢释放,从而使气温有所升高。

2.3 屋顶导热率变化对降温效果的影响

导热率描述了一个物体直接传导能量的能力。草地、耕地和林地等植被下垫面的导热率比沥青、水泥等的导热率小。根据南京本地的实际调查及前人的研究结果 (Oke, 1978; Wong et al, 2003; Lazzarin et al, 2005), 本文选取了三种不同材质屋顶进行对比研究。其中,铺满泥炭土的屋顶导热率 $k_1 = 0.67 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 种植绿色植被的屋顶导热率 $k_2 = 1.58 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 水泥材质的屋顶导热率 $k_3 = 2.3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

图 6 给出了三种不同导热率条件下 2 m 高度处

气温的模拟结果。由图 6a 可见,三种模拟结果在趋势上较为一致,只是在量值上有细小差异。总体来看,白天和夜间的温度差异差不多。通过图 6b 中温差的日变化分布图,可以更加清晰地看到,当导热率分别为 0.67 与 $1.58 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,气温差异 ($\Delta T_{k_2-k_1}$) 在白天为负,最大可达 -0.33°C ;夜间为正,最大差异达 0.4°C 。这一现象表明,屋顶绿化后,导热率略有减小,在白天导致气温升高,而在夜间则导致气温降低。对比导热率分别为 0.67 与 $2.3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时的模拟结果也可以发现,随着导热率的减小白天升温越明显,夜间降温也越明显。由图 6b 中 $\Delta T_{k_3-k_1}$ 的日变化分布可见,在白天气温的最大差值可达 -0.39°C ,在夜间气温的最大差值可达 0.54°C 。这主要是因为绿化后的屋顶导热率较小,白天净辐射能很难向下传递,从而转化为感热加热大气,使周围空气温度迅速升高;太阳落山后屋顶表层迅速辐射冷却,而深层温度较高,热量改由深层向表层传输,同样很难向上传递,导致屋顶表面气温快速下降。

2.4 屋顶土壤湿度变化对降温效果的影响

屋顶种植植物后,土壤湿度和植被蒸腾增湿作用都会使屋顶周围空气的湿度增加。根据南京本地的实际调查以及前人的研究结果 (Oke, 1978; Wong et al, 2003; Lazzarin et al, 2005), 本文选取了三种不同材质屋顶进行对比研究。其中,干燥条件下水泥材质屋顶表面的湿度为 $\omega_1 = 0$, 潮湿条件下水泥

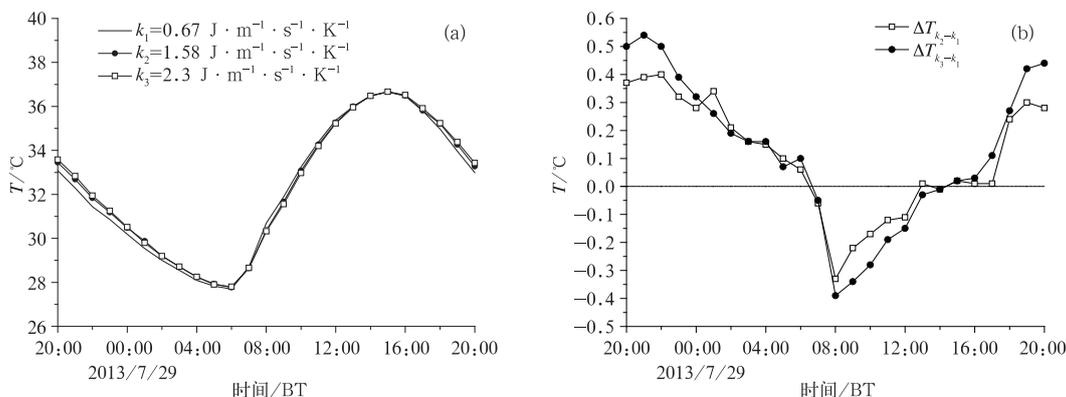


图 6 同图 4, 但为不同导热率条件下 ($\Delta T_{k_2-k_1}$ 为导热率为 1.58 与 $0.67 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时的气温差值, $\Delta T_{k_3-k_1}$ 为导热率为 2.3 与 $0.67 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时的气温差值)

Fig. 6 Same as Fig. 4, but on different thermal conductivity ($\Delta T_{k_2-k_1}$ and $\Delta T_{k_3-k_1}$ are the differences of the temperature when thermal conductivities are 1.58 and $0.67 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 2.3 and $0.67 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, respectively)

材质屋顶表面的湿度为 $w_2 = 0.3$, 绿化后屋顶土壤湿度为 $w_3 = 0.7$ (郭庆荣和张秉刚, 1995; 李笑吟等, 2006a; 2006b)。

图 7 给出了三种不同土壤湿度条件下 2 m 高度处气温的模拟结果。由图 7a 可见, 三种模拟结果在趋势上同样有很好的 consistency, 只是在量值上有所差异。总体来看, 白天差异较大, 夜间较小。通过图 7b 中温差的日变化分布图, 可以更加清晰地看到, 当土壤湿度分别为 0 与 0.3 时, 气温差异 ($\Delta T_{w_2-w_1}$) 全天为负, 日平均差值为 -0.48°C , 最大差值出现在白天, 可达 -0.92°C 。这一现象表明, 屋顶绿化后, 土壤湿度增大, 导致全天气温明显降低。对比土壤湿度分别为 0 与 0.7 时的模拟结果可以发现, 随着土壤湿度的增大降温越明显, 并有显著的日变化特征。由图 7b 中 $\Delta T_{w_3-w_1}$ 的日变化分布可见, 日平均差值为 -0.61°C , 最大差值出现在白天, 可达 -1.23°C , 降温效果明显。这主要是因为屋顶绿化后, 土壤湿度增加, 白天, 土壤中水分的蒸发使大量净辐射能转化为潜热释放, 周围空气温度迅速下降; 而夜间水分蒸发量减少, 转化的净辐射能也减少, 因而降温效果也较白天有所减弱。

2.5 多因素共同作用对降温效果的影响

通过上述敏感性试验可以看出, 反照率、热容量、导热率和湿度对气温的影响有正有负, 影响程度有大有小, 因此屋顶绿化对气温的最终影响, 需要综合考虑四个因素的叠加作用。然而, 这四个物理量在不同取值条件下, 有多种组合方式, 可分别代表不

同的绿化状态。根据前人工作及南京本地的实测结果 (Oke, 1978; Wong et al, 2003; Lazzarin et al, 2005), 分别对屋顶绿化前后的特征参量进行了选取, 如表 3 所示。其中, 反照率比屋顶绿化前降低了 25%, 热容量增长了近 2 倍, 导热率降低了近 30%, 土壤相对湿度维持在 70%。

在此基础上, 本文对 2013 年夏季 7 月 28 日 20 时至 30 日 08 时的个例进行了模拟, 其结果如图 8 所示。由图 8a 可见, 在整个模拟时段, 屋顶绿化后的气温都比未绿化时低, 其中绿化后的日平均气温为 30.78°C , 未绿化时的日平均气温为 31.46°C 。在图 8b 中, 通过两者的差值可以更加清晰看出, 屋顶绿化在白天的降温效果较为明显, 气温最大降幅可达 1.22°C ; 在夜间, 降温效果略差, 但平均降温幅度仍有 0.58°C 。

为了进一步对比多因素的共同作用, 图 9 给出了 7 月 29 日 02:00 和 14:00, 南京地区 2 m 高度处的温度场在屋顶绿化前后的分布情况。由图 9a 可见, 在夜间, 屋顶未绿化时, 30°C 以上的高温区主要集中在沿江高密度的居住区及城市中心区, 其高温中心可达 31°C 。对比图 9b, 在屋顶绿化后, 图中

表 3 屋顶绿化前后各参量的取值

Table 3 Parameters before and after greening the roof

	屋顶绿化前	屋顶绿化后
反照率	0.2	0.15
热容量/ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	1.0×10^6	3.1×10^6
导热率/ $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	2.3	1.58
土壤湿度	0	0.7

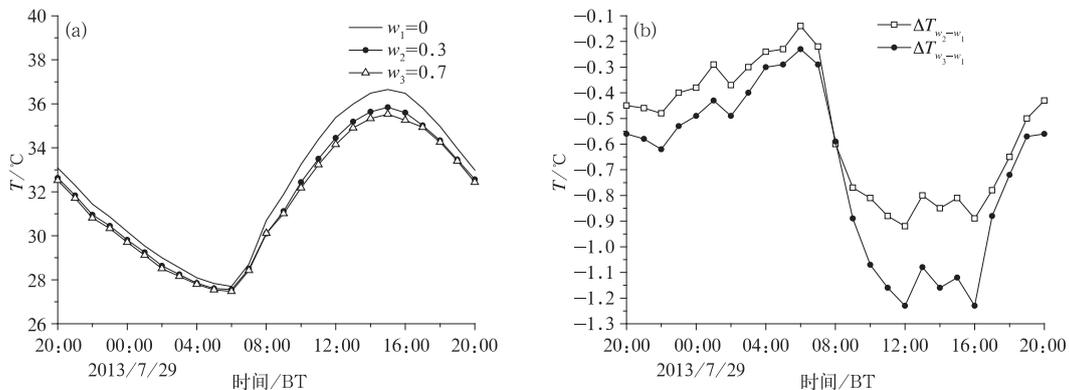


图 7 同图 4, 但为不同土壤湿度条件下 ($\Delta T_{w_2-w_1}$ 为土壤湿度为 0.3 与 0 时的气温差值, $\Delta T_{w_3-w_1}$ 为土壤湿度为 0.7 与 0 时的气温差值)

Fig. 7 Same as Fig. 4, but on different soil moisture ($\Delta T_{w_2-w_1}$ and $\Delta T_{w_3-w_1}$ are the differences of the temperature when soil moistures are 0.3 and 0, 0.7 and 0, respectively)

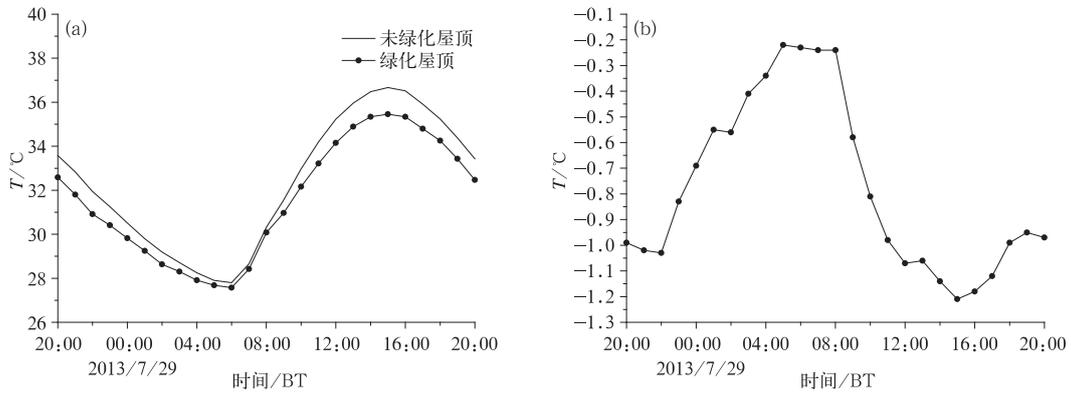


图 8 多因素共同作用下对降温效果的影响, (a)绿化前后 2 m 高度处和 (b)气温差值的日变化分布
 Fig. 8 Cooling effect of multiple factors, (a) daily variation of temperature distribution at 2 m height before and after greening the roof, (b) daily variation of the deviations of temperature after and before greening the roof at 2 m height

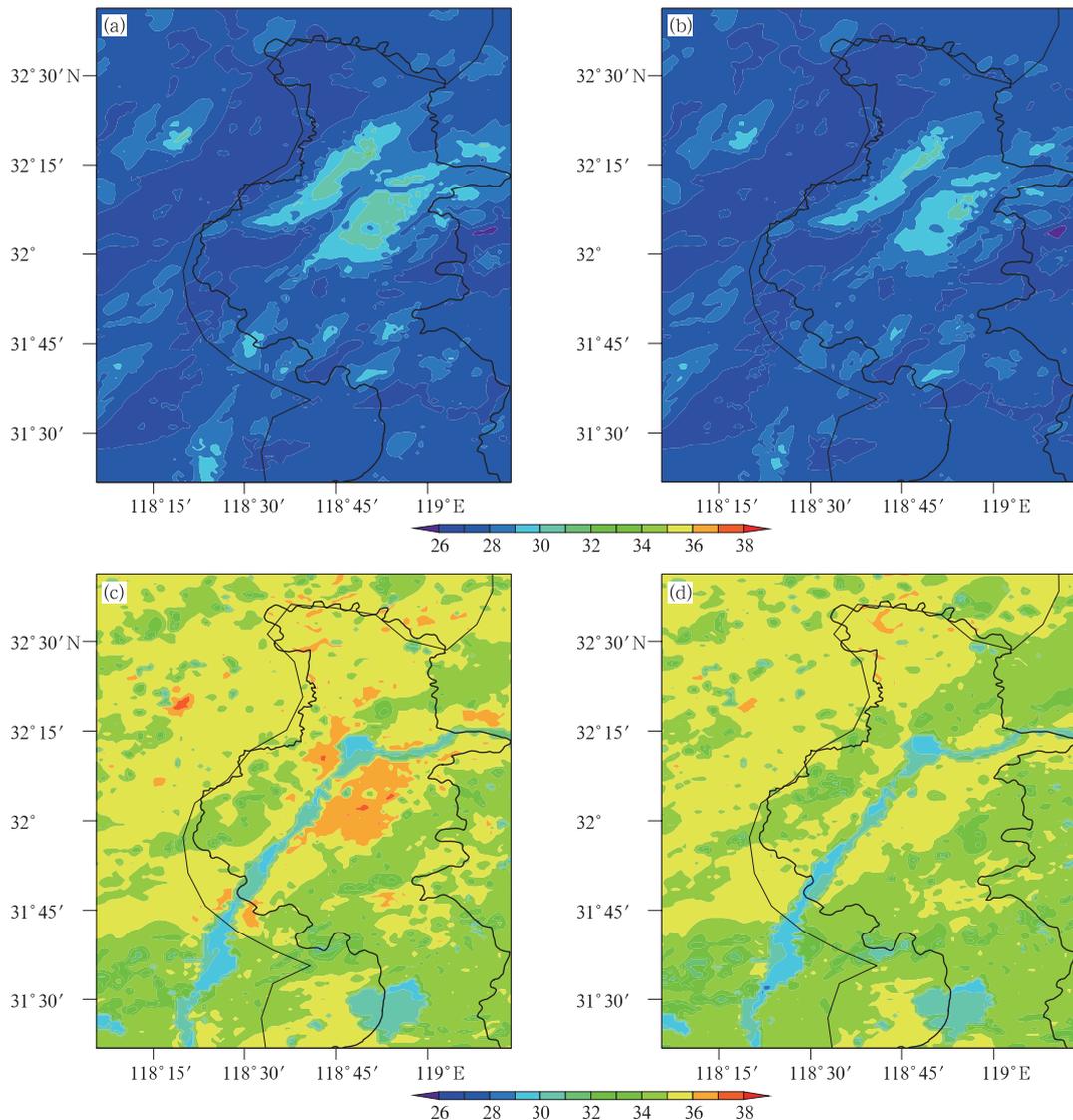


图 9 2013 年 7 月 29 日 (a, b) 夜间 (02:00) 与 (c, d) 白天 (14:00) 南京地区绿化前 (a, c) 及绿化后 (b, d) 2 m 高度上的气温分布
 Fig. 9 Distribution of temperature at 02:00 BT (a, b) and 14:00 BT (c, d) 29 July 2013 in Nanjing before greening the roof (a, c) and after greening the roof (b, d)

30℃以上的高温区几乎消失,区域平均降温可达 1.0℃左右。对比图 9c、9d 可知,在白天,屋顶绿化作用更为明显。在图 9c 中有多个 36℃以上的高温中心,而且范围较广;而在图 9d 中,这些高温中心面积大幅减小,甚至消失,区域平均降温幅度可达 2℃。此外,从图 9 中还可以发现,在屋顶绿化之后,城市热岛中心已不十分明显,与周边环境融为一体,意味着屋顶绿化对城市热岛的缓解作用较为显著。

此外,本文还对其他个例进行了模拟,由于篇幅限制,仅给出了统计结果,如表 4 所示。从不同季节的统计结果来看,夏季的降温效果最为明显,最大降幅可达 1.22℃,春季最大降温可达 0.96℃,秋季最大降温可达 0.75℃,而在冬季则降温效果略差,其白天的降温幅度在 0.38℃,夜间为 0.07℃,平均降温幅度仅为 0.23℃。这主要是由冬季植被枯萎、土壤含水量减少和绿化作用减弱所致。

表 4 四季屋顶绿化的降温效果(单位:℃)

Table 4 Cooling effect of roof greening in spring, summer, autumn and winter (unit: ℃)

	夜间	白天	平均降温
春季	0.89	0.96	0.93
夏季	1.03	1.22	1.13
秋季	0.61	0.75	0.68
冬季	0.07	0.38	0.23

3 结论与讨论

本文利用 WRF 模式耦合单层城市冠层模式,以南京为研究对象,模拟屋顶绿化前后,反照率、热容量、导热率和湿度这四个物理量对热岛效应的影响,以及不同季节条件下,屋顶绿化对南京城市热岛的减缓效应。得出以下结果:

(1) 屋顶种植绿色植被后,其反照率通常在 0.15 左右,较水泥材质的屋顶 0.2,反光材料屋顶 0.4,该值略有减小。故此,在白天可以造成约 0.21℃的升温;而在夜间,由于反照率均为 0 值,对气温的影响忽略不计。

(2) 屋顶绿化之后,在“植被、土壤层和水泥层”的共同作用下,屋顶的热容量明显增加。在白天,绿化后的屋顶能够储存更多的净辐射能,而不是将其释放到大气中,故此,可使白天气温有 0.33℃的下降。在夜间,在没有净辐射的作用下,屋顶储热缓慢释放,可使气温升高 0.21℃左右。

(3) 屋顶绿化之后,在植被阻挡作用及土壤层阻挡作用下,屋顶的导热率显著降低。故此,在白天,净辐射能很难向下层传递,从而转化为感热加热大气,可使气温升高 0.12℃左右。在夜间,深层地温同样很难向上传递,导致地表气温快速下降,最大降幅可达 0.16℃。

(4) 屋顶绿化之后,在土壤水分的蒸发及植被蒸腾的共同作用下,城市环境湿度显著增加。这也意味着,将有更多净辐射能转化为潜热释放。故此,在白天楼顶湿度较大的情况下,降温幅度可达 1.23℃。在夜间,平均降温幅度也有 0.44℃。

(5) 综合考虑四个因素的共同影响,屋顶绿化对城市有明显的降温作用,且白天的降温效果比夜间明显。从不同季节的统计结果来看,夏季的降温效果最为明显,最大降幅可达 1.22℃,春季降温可达 0.96℃,秋季降温可达 0.75℃;而在冬季由于植被枯萎,绿化效果不明显,降温幅度也减小,降温可达 0.38℃。

屋顶绿化影响气温的过程比较复杂,涉及很多能量传输机制。在此,本文通过反照率、热容量、导热率和湿度四方面,研究了屋顶绿化对城市气温的影响,结果表明,屋顶绿化可以有效缓解城市热岛,降低城市气温。但文中没有考虑植被的呼吸作用、植物叶片截留降水的作用以及植物群落形成局地环流等作用对城市的降温效应(周淑贞和束炯,1994;王艳霞等,2006;文远高和连之伟,2003),如果加上这几方面的影响,相信屋顶绿化的降温作用会更加明显。同时,屋顶绿化除了可以缓解城市热岛,还有净化空气,减少温室气体排放,减轻大气污染的作用。因此,可以考虑在南京这样城市,将屋顶绿化进行探索性的推广。虽然由于成本和政府规划等的种种限制,屋顶绿化不能全面开展,但是屋顶绿化对单个建筑周围小气候的降温作用也是非常明显的(刘维东等,2012;肖拓等,2014;Savio et al,2006)。因此,即使只对部分建筑的屋顶进行绿化,也是有利于降低城市局部气温,缓解城市热岛的。

参考文献

- 邓玉娇,匡耀求,黄锋,2010. 基于 Landsat/TM 资料研究广州城市热岛现象[J]. 气象,36(1):26-30.
- 丁金才,周红妹,叶其欣,2002. 从上海市热岛演变看城市绿化的重要意义[J]. 气象,28(2):22-24.
- 樊高峰,朱蓉,张小伟,等,2015. 影响杭州城市高温因子的数值模拟研究[J]. 高原气象,34(1):137-144.

- 葛伟强,周红妹,杨何群,2010.基于MODIS数据的近8年长三角城市群热岛特征及演变分析[J].气象,36(11):77-81.
- 郭庆荣,张秉刚,1995.土壤水分有效性研究综述[J].热带亚热带土壤科学,(2):119-124.
- 李笑吟,毕华兴,张建军,等,2006b.晋西黄土区土壤水分有效性研究[J].水土保持研究,13(5):205-208.
- 李笑吟,毕华兴,张志,等,2006a.晋西黄土区土壤水分有效性分析的克立格法[J].土壤学报,43(6):1004-1010.
- 刘维东,陈其兵,王甲,2012.成都市二十五种屋顶绿化木本植物的降温增湿能力研究[J].北方园艺,(9):75-77.
- 刘伟东,尤焕苓,孙丹,2016.1971—2010年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析[J].气象,42(5):598-606.
- 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.
- 宋静,汤剑平,孙鉴宁,2009.南京地区城市冠层效应的模拟试验研究[J].南京大学学报:自然科学版,45(6):779-789.
- 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[J].气象学报,71(6):1115-1129.
- 王艳霞,董建文,王衍桢,等,2006.城市绿地与城市热岛效应关系探讨[J].亚热带植物科学,34(4):55-59.
- 文远高,连之伟,2003.居住区绿化的降温效应与建筑节能[J].住宅科技,(6):46-48.
- 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.
- 肖拓,曹佩琴,魏甲斌,等,2014.屋顶绿化降温效果研究[J].中国园艺文摘,(5):76-77.
- 谢志清,杜银,曾燕,等,2015.上海城市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.
- 徐祥德,汤绪,2002.城市化环境气象学引论[M].北京:气象出版社:62-80.
- 闫少锋,张金池,张波,等,2011.2008年南京市热岛效应演变特征及其对城市居民生活影响[J].气象与环境学报,27(1):14-20.
- 杨鹏,陈静,侯晓玮,等,2013.基于多源数据的城市热岛效应研究——以石家庄地区为例[J].气象,39(10):1304-1313.
- 杨英宝,苏伟忠,江南,等,2007.南京市热岛效应变化时空特征及其与土地利用变化的关系[J].地理研究,26(5):877-886.
- 张逢生,王雁,闫世明,等,2011.浅析城市“热岛效应”的危害及治理措施[J].科技情报开发与经济,21(32):147-149.
- 周淑贞,束炯,1994.城市气候学[M].北京:气象出版社:585-606.
- 朱正伟,王猛,2009.城市热岛效应的危害及对策[J].北京:污染防治技术,(2):94-96.
- Lazzarin R M, Castellotti F, Busato F, 2005. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof[J]. *Energ Buildings*,37(12):1260-1267.
- Oke T R, 1978. *Boundary Layer Climates*[M]. 2nd ed. Abingdon: Taylor & Francis Group:17.
- 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.
- Savio P, Rosenzweig C, Solecki W, et al, 2006. Mitigating new york city's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces[J]. *Nasa Sti/recon Tec Report A89*:63-66.
- Smith K R, Roebber P J, 2011. Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in chicago, Illinois[J]. *J Appl Meteor Climatol*,50(3):507-522.
- Tran H, Daisuke U, Shiro O, et al, 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities[J]. *Int J App Ear Obs Geoinform*,8(1):34-48.
- Wong N H, Cheong D K W, Yan H, et al, 2003. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in singapore[J]. *Energ Buildings*,35(4):353-364.
- Zinzi M, Agnoli S, 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region[J]. *Energ Buildings*,55(6):66-76.