张蕾, 王咏薇, 赵小艳, 等. 2018. 城市街区形态及冷却屋顶对冠层内辐射热通量的影响 [J]. 气候与环境研究, 23 (5): 563-573. Zhang Lei, Wang Yongwei, Zhao Xiaoyan, et al. 2018. A preliminary analysis of the influence of block morphology and cool roof on the radiation heat flux in urban canopy [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (5): 563-573, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17076.

城市街区形态及冷却屋顶对冠层内辐射热 通量的影响

张蕾^{1,2} 王咏薇^{1,2,3} 赵小艳¹ 于超² 郭良辰^{1,2} 胡凝¹

1 南京信息工程大学大气环境中心,南京 210044

2 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044

3 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029

摘 要 在当前中国城市化进程愈演愈烈的情形下,城市热岛冷却效应的研究对于确立城市生态环境可持续化发展的正确途径等有重要意义。采用离线城市冠层模型分析了城市冠层中街区形态和屋顶材料的变化对辐射热量、表面温度及冠层内气温的影响。研究发现:建筑物高度、宽度以及街道宽度等参数的改变对冠层各表面温度的影响较大,当街道宽度增加3m时,地面温度升高约3.5K。但是街道宽度增加,多重反射导致的辐射截陷效应减弱,墙面上更多的热量释放出去,各墙面温度降低约1.5K;冠层气温先增加,日出后降低约0.4K。屋顶材料的改变对辐射及热通量和表面温度也有较大影响,与灰色水泥屋顶相比,采用高反照率白色涂料冷却屋顶后,屋顶净辐射热量损失约380Wm⁻²,屋顶表面温度降低约10K。冠层内街区形态和屋顶材料对城市辐射热环境产生直接的影响。

关键词 城市冠层模型 能量收支 街区形态 冷却屋顶
文章编号 1006-9585 (2018) 05-0563-11
中图分类号 P404
文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17076

A Preliminary Analysis of the Influence of Block Morphology and Cool Roof on the Radiation Heat Flux in Urban Canopy

ZHANG Lei^{1,2}, WANG Yongwei^{1,2,3}, ZHAO Xiaoyan¹, YU Chao², GUO Liangchen^{1,2}, and HU Ning¹

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

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

3 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract With the rapid urbanization in China, the study of the cooling effect of urban heat island is of great significance to promote the sustainable development of urban ecological environment. In this paper, the influence of

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41675016), Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (Grant PAPD), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant PCSIRT), State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant LAPC-KF-2017-09)

收稿日期 2017-05-22; 网络预出版日期 2017-12-11

作者简介 张蕾,女,1994年出生,硕士研究生,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方面的研究。E-mail: leiz_nuist@163.com 通讯作者 王咏薇, E-mail: wyw@nuist.edu.cn

通讯作者 主咏微, E-mail: wyw@nuist.edu.cn

资助项目 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

block morphology and roof materials on radiant heat and surface temperature are analyzed by using an offline urban canopy model. The results show that the height and the width of the building and the width of the street have great influences on the surface temperature of the urban canopy. When the street width is increased by 3 m, the ground temperature would rise about 3.5 K. However, if the street width increases, the radiation cutoff effect caused by the multiple reflections would be weakened. Thereby, the wall will release more energy, which can lower its temperature by 1.5 K. The canopy temperature increases first, and then decreases by about 0.4 K after sunrise. The change in roof materials also has great impacts on radiation, heat flux and surface temperature. Compared with the gray cement roof, the cooling roof with high- albedo white paint can reduce the net radiation by about 380 W m⁻² and the roof surface temperature would reduce by about 10 K. The block morphology and the roof material have a direct impact on the urban radiant heat environment.

Keywords Urban canopy model, Energy budget, Block morphology, Cool roof

1 引言

城市化对热环境影响的研究是热点的科学问题(Zhao et al., 2014; Cao et al., 2016)。一些研究学者运用天气研究和预报模型(Weather Research and Forecasting Model, WRF)模拟城市化对区域气候变化的影响(Kusaka et al., 2004; 王咏薇等, 2016, 2017);另外有些学者采用遥感的手段与数值模式相结合分析城市热岛的空间分布与土地利用类型、植被覆盖关系、人为热关系以及城市热岛效应的演变(Voogt and Oke, 2003;赵小艳等, 2009)。运用显式分辨建筑物的模型,例如计算流体力学模型

(Computational Fluid Dynamics, CFD)、离线冠层 模型(蒋德海等, 2010)等可以更加清晰的模拟城 市街区风、热气候环境分布(Martilli and Santiago, 2007)。此外,采用定点及流动观测的方法能够直 观的显示城市区域热环境特征(董韶伟, 2007; 刘 寿东等, 2014)。

数值模拟能够再现不同城市格局条件下的热环境特征,目前是一种广为使用的手段(Kusaka et al., 2012)。城市冠层模式运用于建筑物不可分辨尺度的数值模式中,搭建了建筑物特征与局地热力动力环境影响的桥梁。当前不同的学者基于不同的考虑搭建了单层(Masson, 2000; Kusaka et al., 2001)、多层(王咏薇和蒋维楣, 2009; Martilli et al., 2002)以及考虑室内外能量交换的冠层模型(Salamanca et al., 2010)。但是冠层方案中参数众多,参数的设置对于模拟结果有显著的影响(Krayenhoff et al., 2014),采用离线城市冠层模型进行建筑物街区形态及屋顶材料对城市热辐射特征影响的研究,能够更好的理解冠层内建筑物几何

结构对于能量及辐射热量分配的影响及机理

(Takebayashi and Moriyama, 2007).

随着城市化加剧,城市热岛现象越发剧烈,城 市高温热浪事件频发,并对人类的健康存在很大的 威胁。近些年,城市规划以及冷屋顶的降温效应是 广泛关注的科学问题(Miller et al., 2017; Zhai et al., 2017)。为了缓解城市热岛效应,科学家们开展了 一系列研究,研究结果表明冷却屋顶的设计,包括 提高城市表面的反照率(Akbari et al., 1992; Millstein and Menon, 2011),能够有效的平衡城市 地表能量中多余的热量(Akbari et al., 2005; Santamouris et al., 2012)。通过采用凉爽的屋顶, 研究区域内每年增加向外辐射 0.16±0.03 W m⁻², 且夏季的下午,城市区域的温度降低 0.11~0.53 ℃ (Millstein and Menon, 2011)。然而在城市化进程 剧烈的中国,缓解城市热岛效应方面开展的研究相 对较少,基于离线冠层模型,设计不同的屋顶材料 及路面材料进行城市辐射热环境的研究,能够为规 划方案中城市生态环境建设提供一定的思路。

本文基于已有的城市冠层模型,运用南京楼顶 的辐射及通量观测数据,分别对冬季和夏季晴天条 件下的模式模拟效果做出评估;并通过改变城市冠 层模式中的建筑物参数(如建筑物形态参数、反照 率等),讨论城市街区形态及建筑材料对模式的敏 感性,探索屋顶材料对城市冠层的影响,以期对缓 解城市热效应的措施提供理论支持。

2 数据与模型

2.1 观测数据

本文所用模拟验证数据取自在南京进行的边 界层试验观测数据。该观测试验于 2005 年夏季(7 月 17~31 日)和 2006 年冬季(2 月 21 日至 3 月 5 日)进行,观测点位于南京白下路市委党校教学楼 顶(楼高 21 m)(32.04°N,118.78°E),观测仪器架 设于 20 m×10 m的灰白色水泥楼顶。观测点周围 街道纵横,建筑物密集度较高,是典型的居民区和 商业区,人为下垫面面积大于总面积的 90%,自然 下垫面(如植被等)较少,可作为城市下垫面的典 型代表(王咏薇,2007)。观测点参见图 1。该试验 的详细介绍及观测数据分析参见王成刚等(2007)。

2.2 城市冠层模型

本文所用城市冠层模式是 2007 年由王咏薇 (2007)建立,该模型中城市冠层形态参照 Kanda (2005)中图1所示。在模式中,街道和建筑物由 无限延伸的具有正方形水平截面和均匀表面性质 的规则阵列表示,其中建筑物宽度、街渠宽度、建 筑物高度分别设为B、D、H。定义主轴线平行于街 道,且从上往下按顺时针方向测得,它与北一南方 向之间的夹角为ω,太阳高度角为α,从街道轴线 方向测得的太阳方位角为β。参见图 1b 所示,南京 白下路的街道轴线与南北方向夹角为 20°,本文在 模拟过程中设定 @=20°。该模型计算了建筑物街区 内东、西、南、北墙面、屋顶及地面的能量平衡和 表面温度,考虑了建筑物之间对于太阳短波辐射的 阴影遮蔽,墙面、地面、天空之间的可视因子,以 及各个面之间的多重反射效应对长、短波辐射的影 响。最后通过面积加权得到冠层内总的向上的辐射 和湍流通量。冠层内气温的计算参照 Masson(2000) 的方法:

$$T_{\rm can} = \frac{\frac{T_{\rm f}}{r_{\rm f}} + \frac{2h}{w} \frac{T_{\rm w}}{r_{\rm w}} + \frac{T_{\rm a}}{r_{\rm top}} + \frac{H_{\rm traffic}}{c_p \rho_{\rm a} \left(1 - a_{\rm bld}\right)}}{\frac{1}{r_{\rm f}} + \frac{2h}{w} \frac{1}{r_{\rm w}} + \frac{1}{r_{\rm top}}}, \quad (1)$$

其中, T_{can} 表示冠层内气温, r表示表面的阻抗, 它 是表征湍流交换能力的参数 (Mascart et al., 1995), 下标 f、w、top 分别表示地面、墙壁及冠层顶; h/w为峡谷纵横比, a_{bld} 为建筑物占冠层面积的比例, 本 文 对 气 温 的 计 算 考 虑 了 交 通 产 生 的 热 通 量 ($H_{traffic}$); T_{f} 、 T_{w} 、 T_{a} 分别为地面温度、墙面温度 及冠层顶的气温, ρ_{a} 表示大气密度; 定压比热 C_{p} 为 常数, 文中取 1004.67 J kg⁻¹ K⁻¹。

在观测点周围,除个别建筑物比较突出外,大 多数建筑物高度较为一致。我们假设模型中所有建 筑物宽度 *B* 为 12 m,楼与楼之间的间距 *D* 均假设 为 12 m,楼高 *H* 为 21 m (Kanda M et al., 2005; 王咏薇, 2007),其余相关参数设定参见(王咏薇, 2007; 王咏薇和蒋维楣, 2009)。

2.3 本文模拟算例

本文首先运用南京城市地区夏季(CASE1)和 冬季(CASE2)算例来检验模式的模拟性能;并以 CASE1作为参照算例,设计了敏感性算例 CASE3 至 CASE9,研究建筑物宽度(CASE3、CASE4)、 街道宽度(CASE5、CASE6)、建筑物高度(CASE7、 CASE8)及屋顶材料(CASE9)对冠层内各面温度 及通量的影响。具体算例参数设置如表1所示,冠 层内各表面的基本物理参数如表2。

表1 本研究中算例设置及参数说明

Table 1 Examples and parameters setting in this study

		参数设置			
		建筑物宽	街渠宽度	建筑物高	屋顶反
算例名称	模拟时间	度 <i>B</i> /m	D/m	度 <i>H</i> /m	照率 α
CASE1	2005-07-17	12	12	21	0.2
CASE2	2006-03-01	12	12	21	0.2
CASE3	2005-07-17	9	12	21	0.2
CASE4	2005-07-17	15	12	21	0.2
CASE5	2005-07-17	12	9	21	0.2
CASE6	2005-07-17	12	15	21	0.2
CASE7	2005-07-17	12	12	18	0.2
CASE8	2005-07-17	12	12	24	0.2
CASE9	2005-07-17	12	12	21	0.7

表 2 冠层内各表面的基本物理参数

Table 2	Basic physical	parameters of the	e canopy surface
---------	----------------	-------------------	------------------

		热容量/	热传导系数/
表面分层/m	反照率	$J m^{-3} K^{-1}$	$J m s^{-1} K^{-1}$
0~0.1	0.2	2.01×10^{6}	2.28
0.1~0.2	-	1.74×10^{6}	1.00
0~0.13	0.3	2.01×10^{6}	1.00
0.13~0.17	-	0.20×10^{6}	0.23
0.17~0.2	-	2.01×10^{6}	1.00
0~0.13	0.2	2.01×10^{6}	1.00
0.13~0.17	-	0.20×10^{6}	0.23
0.17~0.2	-	2.01×10^{6}	1.00
	表面分层/m 0~0.1 0.1~0.2 0~0.13 0.13~0.17 0.17~0.2 0~0.13 0.13~0.17 0.17~0.2	表面分层/m 反照率 0~0.1 0.2 0.1~0.2 - 0~0.13 0.3 0.13~0.17 - 0.17~0.2 - 0~0.13 0.2 0.13~0.17 - 0.13~0.17 - 0.13~0.2 -	热容量/ 表面分层/m 反照率 J m ⁻³ K ⁻¹ 0~0.1 0.2 2.01×10 ⁶ 0.1~0.2 - 1.74×10 ⁶ 0~0.13 0.3 2.01×10 ⁶ 0.13~0.17 - 0.20×10 ⁶ 0.17~0.2 - 2.01×10 ⁶ 0.13~0.17 - 0.20×10 ⁶ 0.13~0.17 - 2.01×10 ⁶ 0~0.13 0.2 2.01×10 ⁶ 0.13~0.17 - 0.20×10 ⁶ 0.13~0.17 - 0.20×10 ⁶ 0.17~0.2 - 2.01×10 ⁶

注: -表示无该属性

3 城市冠层模型模拟效果的验证

3.1 模型验证

首先采用夏季观测数据对 2005 年 7 月 17 日的 模拟结果进行验证。图 2a、2b 为 7 月 17 日每十分 钟一次的屋顶净短波和净长波辐射通量,由图可知模 拟与观测所得净长短波辐射通量的结果一致性较高, 观测与模拟之间的最大差异不超过 50 W m⁻²,从而 屋顶净辐射的模拟值与观测值也较为吻合(图 2c),



图 2 CASE1, 夏季楼顶通量模拟与观测对比: (a) 净短波辐射; (b) 净长波辐射; (c) 净辐射; (d) 感热通量 Fig. 2 Comparison of simulations and observations of fluxes on the roof in the summer in example CASE1: (a) Net shortwave radiation flux; (b) net longwave radiation flux; (c) net radiation flux; (d) sensible heat flux

正午时分模拟值较观测值偏高,原因可能是正午湍 流较强,且实际大气中存在气溶胶颗粒的漫射散射 等辐射传输过程(盛裴轩等,2003)。感热是指由 于温度变化而引起的大气与下垫面之间发生的湍 流形式的热交换,图2d即为7月17日楼顶感热通 量的模拟与观测对比,图中模拟与观测变化趋势较 为吻合,白天感热通量最大值约为250Wm⁻²,夜 间感热通量较小,但均为正值,说明夏季城市冠层 是全天加热大气的。而感热通量峰值出现时间较净 辐射有一定的滞后,主要原因是夏季晴天条件下净 辐射值较大,加热屋顶使之升温的过程较剧烈。

如图 3a 所示,冠层内 6 个表面温度日变化总体特征都是先增大后减小的。白天,随着太阳短波辐射不断增强,楼顶温度开始迅速增加到最大,之后又随短波辐射减弱,温度急剧减小;对墙面而言,东墙与南墙从早晨开始接收太阳辐射,故使其温度



图 3 CASE1, 夏季冠层内(a) 各表面温度和(b) 气温日变化

Fig. 3 Diurnal variations of temperature within the urban canopy in the summer in example CASE1: (a) Surface temperature; (b) air temperature

先增加,中午之后,东墙接收到的辐射减少,而南 墙接收到的太阳短波辐射越来越多,温度增加较 快,随太阳降落,南墙温度开始逐渐减小;西墙在 午后开始接收到太阳辐射,温度开始增加,日落后 又降低;北墙由于一直没有接收到直接太阳辐射, 它所受到的辐射是建筑物之间有辐射"陷阱效 应",即存在短波和长波辐射的多重反射,从而使 其温度增加,但日变化趋势较小;地面由于有建筑 物的遮挡,温度升高较楼顶慢,变化趋势相对较缓, 在短波辐射减小后,由于地面还会受到长波辐射的 多重反射,从而使它的夜间温度不至于降低得太 快。图 3b 为冠层内气温的模拟与观测对比,图中 模拟值与观测值吻合度较高,平均偏差约为 0.3 K。

3.2 冬季算例模拟效果分析

2006年3月1日屋顶净短波和净长波辐射通量 模拟和观测的对比如图4a和4b所示。图中模拟与 观测所得净长短波辐射通量的结果一致性较高,故 模拟的屋顶净辐射与观测值较为吻合(图4c)。图 4d为3月1日楼顶感热的模拟与观测对比,图中的 模拟与观测变化趋势相近,模拟的白天感热通量最 大值约为120Wm⁻²,比观测值高约20Wm⁻²,相 差较小。由于模式没有考虑城市对雨、雪等的储存, 所以在积雪融化前(15:00),表面反照率的取值在 此算例中与实际情况相比是偏小的,使得模拟的感 热通量较大且与观测相比有一定的滞后。 各表面温度日变化特征如图 5a 所示。与夏季 算例类似,各表面温度日变化总体趋势都是先增大 后减小的。各个面的变化特征与夏季算例基本一 致,这里不再详细阐述。图 5b 为冠层气温模拟与 观测对比,可见模拟值有一定的高估,平均偏差达 到约 1.5 K。引起这种差异的主要原因是,实际城 市表面存在雨、雪的储存,使得表面反照率和热容 的取值在此算例中是偏小的,从而导致模拟的气温 总体偏大。

4 街区形态及建筑材料对城市地表 辐射及热通量的影响

为了研究冠层内建筑物参数和屋顶材料的变 化对城市表面热通量的影响,本文选择了表1中表 征建筑物形态的参数,以及建筑物屋顶材料的反照 率参数,通过设置算例 CASE3 至 CASE9,进行了 建筑物形态参数及材料参数的敏感性初步分析。

4.1 建筑物形态参数变化的影响

4.1.1 建筑物宽度变化的影响

图 6 为建筑物宽度对冠层计算方案中关键计算 量的影响。由图 6a 可以看到,当增加冠层内建筑 物的宽度时,地面净辐射减小约 25 W m⁻²、4 个墙 面净辐射增大约 7 W m⁻²。各表面温度和感热通量 的变化(图 6b、6c)与净辐射的变化趋势相同。地



图 4 CASE2, 冬季楼顶通量模拟与观测对比: (a) 净短波辐射; (b) 净长波辐射; (c) 净辐射; (d) 感热通量 Fig. 4 Comparison of simulations and observations of fluxes on the roof in the winter in CASE2: (a) Net shortwave radiation flux; (b) net longwave radiation flux; (c) net radiation flux; (d) sensible heat flux



图 5 CASE2, 冬季冠层内(a) 各表面温度和(b) 气温日变化

Fig. 5 Diurnal variations of temperature within the urban canopy in the winter in CASE2: (a) Surface temperature; (b) air temperature

面温度减小,与参照算例相比,最大相差近1K,故 地面感热通量也减小,最大相差约15Wm⁻²;4个 墙面温度增加,且东墙和南墙增加较多,最大增加 了 0.45 K 左右,从而墙面感热通量最大增加了约 5 W m⁻²; 而屋顶温度几乎没有发生变化。建筑物宽 度增加时, 地面受到建筑物的遮蔽增大, 即地面阴 影部分面积增大(图 6d), 从而使得地面温度减小。 墙面接收到太阳辐射的时间和面积相应增大, 导致



图 6 CASE4,建筑物宽度增加引起的冠层方案中关键量的日变化差:(a)净辐射;(b)表面温度;(c)感热通量;(d)地面阴影部分面积;(e) 冠层内气温

Fig. 6 Differenced in diurnal variations of key variables in urban canopy due to building width increase in CASE4: (a) Net radiation flux; (b) surface temperature; (c) sensible heat flux; (d) shaded area of the ground; (e) air temperature within the canopy

其温度增加。楼顶所接收到的辐射不变,故温度几 乎不发生变化。图 6e 为建筑物宽度增大时冠层内 气温的变化。由图可知,冠层气温变化基本为正值, 增温最大可达到 0.5 K。由于建筑物宽度增加,使 得建筑物之间的多重反射有一定增强,墙面温度增 大,加热大气,从而使冠层温度增加。

当建筑物宽度减小时(CASE3),冠层内表面 温度变化与增大建筑物宽度时相反(图略),冠层 表面温度对建筑物宽度的敏感性随参数值增加而 增大。

4.1.2 街道宽度变化的影响

图 7 为街道宽度对冠层计算方案中关键计算量 的影响。由图 7a 可以看到,当增大街道宽度时, 地面净辐射增大约 100 W m⁻²、各墙面净辐射增大 约 30 W m⁻²。各表面温度和感热通量变化趋势(图 7b、7c)与净辐射的变化大致相同,地面温度和感 热通量增加,与参照算例相比,温度相差可达 3.5 K, 感热通量相差可达 55 W m⁻²;4 个墙面温度和感热 通量减小,且东墙和南墙减小较多,温度最大相差 1.5 K, 感热通量最大相差 25 W m⁻²; 屋顶温度几乎 不发生变化。原因在于, 地面受到的太阳直接辐射 面积增大, 从而使地面温度升高; 建筑物之间的间 隔增大使墙面之间的多次反射效应相对减弱, 导致 其温度降低; 而楼顶接收到的辐射不变, 故温度几 乎不发生变化。图 7e 为街道宽度增大时冠层气温 的变化。由于地面增温, 日出之前地面加热大气使 气温升高; 日出之后建筑物之间存在对长短波辐射 的多重反射, 街道宽度增大时, 多重反射效应有所 减弱, 使冠层气温降低, 最大降低约 0.4 ℃。

当街道宽度减小时(CASE5),冠层内各表面 温度变化与增大街道宽度时相反(图略),冠层表 面温度对建筑物宽度的敏感性随参数值增加而增 大。由以上分析可知,街道宽度对模式的敏感性较 大。

4.1.3 建筑物高度变化的影响

图 8 为建筑物高度对冠层计算方案中关键量的 影响。由图 8a 可以看到,当增大冠层内建筑物的 高度时,地面净辐射降低约 50 W m⁻²,各墙面净辐



图 7 CASE6, 街道宽度增加引起的冠层参数的日变化差: (a) 净辐射; (b) 表面温度; (c) 感热通量; (d) 地面阴影部分面积; (e) 冠层内气温 Fig. 7 Differences in diurnal variations of key variables in urban canopy due to building width increase in CASE6: (a) Net radiation flux; (b) surface temperature; (c) sensible heat flux; (d) shaded area of the ground; (e) air temperature within the canopy



图 8 CASE8, 建筑物高度变化引起的冠层参数的日变化差: (a) 净辐射; (b) 表面温度; (c) 感热通量; (d) 地面阴影部分面积; (e) 冠层内气温 Fig. 8 Differences in diurnal variations of key variables in urban canopy due to building width increase in CASE8: (a) Net radiation flux; (b) surface temperature; (c) sensible heat flux; (d) shaded area of the ground; (e) air temperature within the canopy

射增大约 15 W m⁻²。各表面温度和感热通量的变化 (图 8b、8c)与净辐射变化密切相关,地面温度和 感热通量降低,与参照算例相比,温度最大相差约 1.5 K,感热通量最大相差约 25 W m^{-2} ;4个墙面温 度和感热通量升高,温度变化约 0.5 K,感热通量 变化约 10 W m^{-2} ;屋顶温度几乎不发生改变。发生 这种变化的原因与增加建筑物宽度的原因大致相 同,这里不再详细阐述。图 8e 为建筑物高度增加 时冠层气温的变化。正午之前气温的变化基本为负 值,主要原因是建筑物高度增加使冠层内阴影面积

(图 8d)增大,从而冠层气温降低;由于建筑物高度增加,且正午之后各墙面之间多重反射效应增强,从而冠层气温升高。

当建筑物高度减小时(CASE7),冠层内表面 温度和反照率变化与增大建筑物高度时相反(图 略),冠层表面温度对建筑物宽度的敏感性随参数 值增加而增大。

4.2 屋顶材料的敏感性试验

地球表面能获得多少太阳辐射能,在很大程度 上依赖于地表反照率,气象学上通常关心的是某一 区域的平均反照率,其区域尺度可达几公里甚至上 百公里。这种区域(尤其是在大陆上)往往可由许 多不同种类的下垫面拼组而成,各种下垫面都有各 自的反照率特性(盛裴轩等, 2003)。

建筑物屋顶反照率的改变显著的影响了辐射 增热作用(Prado and Ferreira, 2005),表面涂料的 颜色对反照率有很大的影响(Yu et al., 2008),接 下来研究屋顶为白色涂料时反照率对模式的敏感 性,其中白色涂料的反照率约为 0.7。

图 9 为屋顶反照率对冠层计算方案中关键计算 量的影响。图 9a、9b、9c 分别为短波净辐射、屋顶 温度、以及长波净辐射的变化,较大的反照率导致 屋顶更多的向上短波辐射,更少的短波净辐射。当 短波净辐射显著降低时,模式模拟的表面温度将会 降低,并限制了向上的长波辐射,从而增加长波净 辐射。当屋顶反照率由 0.2 增大到 0.7 时,短波净 辐射最大降低了约 380 W m⁻²,屋顶温度降低约 10 K,长波净辐射最大增加了约 80 W m⁻²,即短波净 辐射的减小比长波净辐射的增加更显著。图 9d 为 感热通量的变化,感热通量是指由于温度变化而引 起的大气与下垫面之间发生的湍流形式的热交换, 所以感热通量的变化趋势与温度的变化一致,感热 通量减小约 200 W m⁻²。

屋顶材料的反照率越大,则以上各量的变化也 就越大,可以看出模式对建筑材料高度敏感。另外, 反照率越大的材料越有利于温度的降低,更符合当



图 9 CASE9, 屋顶为白色涂料时部分输出参数的变化: (a) 短波净辐射; (b) 屋顶温度; (c) 长波净辐射; (d) 感热通量 Fig. 9 Changes in some of the output fields when the roof is white in CASE9: (a) Net shortwave radiation flux; (b) roof temperature; (c) longwave net radiation flux; (d) sensible heat flux

今为缓解城市热岛效应而提出的"冷屋顶"的要求。

5 结论

本文采用南京城市区域的辐射观测及通量观 测数据评估已有的城市冠层模型,并做了相关的敏 感性试验,分析城市冠层模型中建筑物形态及屋顶 材料对辐射及通量等输出结果的影响。主要结论如 下:

(1)通过与城市冠层内建筑物楼顶的辐射及通 量观测数据对比发现,城市冠层模式能够较为准确 地模拟实际冠层中表面能量收支平衡的特点,且能 够合理计算出到达楼顶的长短波辐射以及冠层表 面的感热通量,能将模拟与观测的平均偏差控制在 20 W m⁻² 以内,冠层内不同表面温度的日变化特征 符合实际,总体来说模式具有较好的模拟性能。

(2)通过对模式进行敏感性试验,发现建筑物 宽度、街道宽度以及建筑物高度等形态参数对表面 辐射及热通量影响显著。对于相同程度的变化 (Δ=3m),街道宽度对各表面温度的敏感度最大 (地面温度升高约4K,各墙面温度降低约1.5K), 且随着形态参数变化量的减小,敏感度也减弱。

(3) 冠层内气温对于建筑物形态参数也有较高 的敏感性,建筑物宽度增大3m时,冠层内气温能 升高 0.5 K,而街道宽度增大时气温呈降低的趋势, 建筑物高度增大时气温呈升高趋势。

(4)由敏感性试验可知,建筑物材料的不同主 要影响了辐射参数(如屋顶反照率),辐射通量、热 通量、温度等参数对反照率高度敏感。与灰色水泥 屋顶相比,采用高反照率白色涂料,使屋顶净辐射 热量损失近 380 W m⁻²,屋顶表面温度降低约 10 K。

(5)本文研究发现,城市冠层模式输出(包括 重要能量通量和表面温度)对城市几何的不确定度 高度敏感。然而本文仅仅做了晴天的算例,对于不 同天气条件下,模型计算的能量通量以及表面温度 等是否有不同的特性并无深入研究。此外,本文采 用离线手段从机理上分析了建筑物几何形态、屋顶 材料对于冠层内气温和表面温度的影响,而更实际 的天气条件及城市类型,需要用在线的天气尺度模 型去模拟研究。

参考文献(References)

Akbari H, Davis S, Huang J, et al. 1992. Cooling our communities. A

guidebook on tree planting and light-colored surfacing [R]. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division.

- Akbari H, Levinson R, Rainer L. 2005. Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings [J]. Energy & Buildings, 37 (10): 1007–1016, doi:10.1016/j.enbuild.2004.11.013.
- Cao C, Lee X, Liu S D, et al. 2016. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution [J]. Nature Communications, 7: 12509, doi:10.1038/ ncomms12509.
- 董韶伟. 2007. 重庆市下垫面热效应及城市热岛效应的流动观测研究 [D]. 重庆大学硕士学位论文, 29-78. Dong Shaowei. 2007. Research on the heat effect of underlying surfaces and the urban heat island effect using mobile measurement in Chongqing City [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chongqing University, 29-78.
- 蒋德海, 王咏薇, 蒋维楣. 2010. 应用城市冠层模式对建筑物表面太阳 辐射的分析 [J]. 高原气象, 29 (3): 614-620. Jiang Dehai, Wang Yongwei, Jiang Weimei. 2010. Analysis of solar radiation on the surface of building by applying urban canopy model [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (3): 614-620.
- Kanda M, Kawai T, Kanega M, et al, 2005. A simple energy balance model for regular building arrays [J]. Boundary-Layer Meteorology, 116 (3): 423–443.
- Krayenhoff E S, Christen A, Martilli A, et al. 2014. A multi-layer radiation model for urban neighbourhoods with trees [J]. Bound.-Layer Meteor., 151 (1): 139–178, doi:10.1007/s10546-013-9883-1.
- Kusaka H, Chen F, Bao J W, et al. 2004. Simulation of the urban heat island effects over the Greater Houston Area with the high resolution WRF/LSM/Urban coupled system [C]// Proceedings of Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone. Seattle, Wash, 4pp.
- Kusaka H, Chen F, Bao J W, et al. 2004. Simulation of urban heat island effects over the Greater Houston Area with the high resolution WRF/ LSM/Urban coupled system [J]. Symposium on "Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone". January, 1–15.
- Kusaka H, Chen F, Tewari M, et al. 2012. Numerical simulation of Urban Heat Island effect by the WRF Model with 4-km grid increment: An inter-comparison study between the urban canopy model and slab model[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 90B: 33–45.
- 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 Meteor., 101 (3): 329–358, doi:10.1023/A: 1019207923078.
- 刘寿东,姜润, 王成刚, 等. 2014. 南京夏季城市热岛时空分布特征的观测分析 [J]. 大气科学学报, 37 (1): 19–27. Liu Shoudong, Jiang Run, Wang Chenggang, et al. 2014. Observation analysis on spatial and temporal distribution characteristics of summer urban heat island in Nanjing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 19–27, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2014.01.003.
- Martilli A, Clappier A, Rotach M W. 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models [J]. Bound.-Layer Meteor., 104 (2): 261–304, doi:10.1023/A:1016099921195.

Martilli A, Santiago J L. 2007. CFD simulation of airflow over a regular

array of cubes. Part II: Analysis of spatial average properties [J]. Bound. -Layer Meteor., 122 (3): 635–654, doi:10.1007/s10546-006-9124-y.

- Mascart P, Noilhan J, Giordani H. 1995. A modified parameterization of flux-profile relationships in the surface layer using different roughness length values for heat and momentum [J]. Bound.-Layer Meteor., 72 (4): 331–344, doi:10.1007/BF00708998.
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. Bound.-Layer Meteor., 94 (3): 357–397, doi:10. 1023/A:1002463829265.
- Miller J L. 2017. Passive cooling doesn't cost the planet [J]. Physics Today, 70 (4): 16–18, doi:10.1063/PT.3.3513.
- Millstein D, Menon S. 2011. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment [J]. Environmental Research Letters, 6 (3): 034001, doi:10.1088/1748-9326/6/3/034001.
- Prado R T A, Ferreira F L. 2005. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials [J]. Energy and Buildings, 37 (4): 295–300, doi:10.1016/j.enbuild.2004.03.009.
- Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model [J]. Theor. Appl. Climatol., 99 (3–4): 331–344, doi:10.1007/ s00704-009-0142-9.
- Santamouris M, Gaitani N, Spanou A, et al. 2012. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project [J]. Building and Environment, 53: 128–136, doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.022.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学 出版社, 72–115. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 72–115.
- Takebayashi H, Moriyama M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island [J]. Building and Environment, 42 (8): 2971–2979, doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.017.
- Voogt J A, Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates [J]. Remote Sens. Environ., 86 (3): 370–384, doi:10.1016/S0034-4257(03) 00079-8.
- 王成刚, 孙鉴泞, 胡非, 等. 2007. 城市水泥下垫面能量平衡特征的观测 与分析 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 43 (3): 270–279. Wang

Chenggang, Sun Jianning, Hu Fei, et al. 2007. Observation and analysis of the characteristics of urban concrete surface energy balance [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 43 (3): 270–279.

- 王咏薇. 2007. 城市陆面过程与边界层响应的数值研究 [D]. 南京大学 博士学位论文, 93-133. Wang Yongwei. 2007. Numerical study on response of urban land surface process and boundary layer [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 93-133.
- 王咏薇,蒋维楣. 2009. 多层城市冠层模式的建立及数值试验研究 [J]. 气象学报, 67 (6): 1013–1024. Wang Yongwei, Jiang Weimei. 2009. Numerical study on development of a multi-layer urban canopy model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (6): 1013–1024, doi:10. 11676/qxxb2009.098.
- 王咏薇, 任侠, 翟雪飞, 等. 2016. 南京复杂下垫面条件下的三维城市热环境模拟 [J]. 大气科学学报, 39 (4): 525-535. Wang Yongwei, Ren Xia, Zhai Xuefei, et al. 2016. Numerical study of the three-dimensional thermal environment over a complex underlying surface in Nanjing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 525-535, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20110608002.
- 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 Yongwei, Zhai Xuefei, Qi Deli, et al. 2017. Simulation of the land-use change effect on urban local thermodynamic circulation[J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 17 (3): 16–29, 35.
- Yu B F, Chen Z, Shang P J, et al. 2008. Study on the influence of albedo on building heat environment in a year-round [J]. Energy and Buildings, 40 (5): 945–951, doi:10.1016/j.enbuild.2007.07.009.
- Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al. 2017. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling [J]. Science, 355 (6329): 1062–1066, doi:10.1126/science.aai7899.
- Zhao L, Lee X, Smith R B, et al. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands [J]. Nature, 511 (7508): 216– 219, doi:10.1038/nature13462.
- 赵小艳,杨沈斌,申双和,等. 2009. 基于遥感的南京市城市热岛效应时 空演变分析 [J]. 安徽农业科学, 37 (22): 10776–10778. Zhao Xiaoyan, Yang Shenbin, Shen Shuanghe, et al. 2009. Analysis on spatial and temporal variation of the urban heat island effect based on remote sensing in Nanjing City [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 37 (22): 10776–10778, doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2009.22.170.