

# 复杂地形条件下城市热岛及局地环流特征的数值模拟

孙永<sup>①</sup>,王咏薇<sup>①\*</sup>,高阳华<sup>②</sup>,王恪非<sup>①</sup>,何泽能<sup>②</sup>,杜钦<sup>②</sup>,陈志军<sup>②</sup>

①南京信息工程大学 大气环境中心 江苏 南京 210044;

②重庆市气象科学研究所 重庆 401147

\* 联系人 E-mail:wyw@nuist.edu.cn

2018-02-04 收稿 2018-03-21 接受

国家自然科学基金资助项目(41675016);重庆科技厅项目(cstc2015shmszx00010)

**摘要** 应用基于多层城市冠层方案 BEP (Building Environment Parameterization) 增加室内空调系统影响的建筑物能量模式 BEM (Building Energy Model) 方案的 WRF 模式, 模拟研究重庆热岛的特征、成因以及局地环流对热岛形成的影响。文中共有两个算例,一为重庆真实下垫面算例 称之为 URBAN 算例,二为将城市下垫面替换为耕地下垫面的对比算例 称之为 NOURBAN 算例。结果表明:1) WRF 方案模拟结果与观测 2 m 气温的对比吻合较好,误差主要出现在正午温度峰值和凌晨温度谷值处,由城市下垫面特性及城市内建筑分布误差引起。2) BEP+BEM 方案较好地模拟出了重庆地区的热岛分布的空间和时间特征。重庆市温度的分布受地形和城市下垫面的双重影响,越靠近城区,温度的分布受城市化影响就越大,在海拔低处,温度就越高。3) 城区立体三维表面对辐射的陷阱作用导致城市表面总体反射率小,向上短波辐射小于郊区约 20 W/m<sup>2</sup>。城市表面以感热排放为主,而郊区则表现为潜热的作用占主导。夜间城市地表储热以及空调废热向大气释放,是城市热岛形成的重要原因。4) 模拟区域背景风场主要为东南风,局地环流呈现出越靠近山区风速越大、城市区域风速较小的特性,体现了城市密集的建筑群对低层大气流场的空气动力学效应,以及复杂山谷地形的山谷风环流特性。在市区的西侧和东南侧均有高大山脉阻挡,山脉对城市出流的阻碍作用、气流越山与绕流运动对城市热岛的形成有一定影响。

**关键词**  
城市热岛;  
WRF 模式;  
城市冠层方案

高温天气的形成受辐射增温、平流增温、绝热下沉增温等因素的影响(张尚印等,2005)。除此之外,在城市地区,高温干旱天气的出现还与下垫面结构、人为热排放以及城区建筑物材料等因素密切相关。“城市热岛”(Urban Heat Island,UHI)这一术语最早由 Manley 于 1958 年提出,由于高温城区在外围温度较低的郊区的包围中,就像一个突出海面的岛屿,所以被形象称为“城市热岛”(Manley,1958)。城市热岛现象是城市气候典型特征之一,它影响了城市地区的局地环流特征,使人们在生活、生产过程中形成的大气污染物质在热岛中心区域聚集,危害

人们的身体健康甚至生命,同时,“城市热岛”所引起的增温效应,可导致城市出现极端高温天气的概率与频次增加(司鹏,2010;董良鹏等,2014;叶丽梅等,2014;马红云等,2018)。为此,城市热岛效应的研究一直受到社会的广泛关注和专家学者的重视。

近年来越来越多的学者关注到城市化效应对热岛强度影响这一问题,在问题的研究中所应用的资料和方法也越来越先进。数值模式由于可提供热岛强度空间及时间的变化,一直是研究热岛现象有用的工具(Mirzaei and Haghishat,2010)。该研究领域的一个重要进展是将城市冠层引入陆面过程进行城

引用格式:孙永,王咏薇,高阳华,等.2019.复杂地形条件下城市热岛及局地环流特征的数值模拟[J].大气科学学报 A2(2):280-292.

Sun Y,Wang Y W,Gao Y H,et al. 2019.Numerical simulation of urban heat island and local circulation characteristics under complex terrain conditions [J].Trans Atmos Sci A2(2):280-292.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180204001.(in Chinese).

市热环境的气象研究。Oke and Cleugh (1987) 首次提出城市冠层(Urban Canopy Layer)的概念,将城市冠层与城市边界层划分开。根据 Oke and Cleugh (1987) 的定义,城市冠层指城市中最接近地表面的大气层,高度上伸展到城市建筑物的平均高度,它与建筑物高度、形状、密度、建筑材料、街道宽度和走向等关系密切。随着这一概念的提出,更多的研究工作围绕这一概念展开。Masson (2000) 提出了一个较复杂的能够预报城市路面、墙面和屋顶温度的城市能量收支参数化方案 TEB (the Town Energy Balance sheme) 随后 Kusaka et al. (2001) 将此方案进行了优化和完善。Kondo and Liu (1998)、Martilli et al. (2002)、Kondo and Kikegawa (2003)、Kondo et al. (2005)、王咏薇和蒋维楣(2009)建立了多层冠层模式,考虑引入了三维建筑物分布,提高了城市区域气候模拟性能。

城市冠层对城市边界层的影响最直接,是城市环境及大气运动数值模拟研究的一个不可或缺的物理过程(王咏薇等,2008;周雪帆等,2017),在中尺度模式中耦合一个城市冠层模式(UCM),用于更详细地描述城市的热力学和动力学效应已成为近年模式预报技术发展的重要内容。当前 WRF 模式中已有单层冠层方案(UCM),多层冠层方案(BEP),以及在多层方案基础上增加室内外热量交换对大气温度影响的BEP+BEM 方案(Chen et al. 2011)。基于使用城市冠层方案的数值模拟,国内外对于热岛效应开展了大量研究,并取得了很多研究成果,普遍认为使用 WRF 模式进行城市 2 m 气温和热岛强度的模拟能够取得较好的效果(Giannaros et al., 2013; Bhati and Mohan 2016; Chen et al. 2016; 程志刚等,2016; 郑亦佳等,2017),同时也能较好地模拟出城市热岛对降水的影响(Nie et al. 2017; Zhang et al., 2017)。王咏薇等(2013)使用 WRF 模式中 3 种不同的城市冠层方案对重庆地区进行了模拟比较研究,认为 BEP+BEM 模式模拟性能较好。王咏薇等(2016)使用 WRF 模式考虑城市冠层方案对南京城市热环境的模拟影响,认为 UCM 方案模拟结果与观测更吻合且能较好模拟出城市三维热岛分布。姚帅等(2016)使用 GRAPES-UCM 模式对广州进行了多个个例模拟分析,认为城市冠层模式的引入对城市下垫面的模拟效果有显著的提升作用,能更好模拟出不利于污染物扩散的气象条件。

尽管有前人进行了诸多工作,但不同城市的特征也是多种多样的。重庆位于青藏高原与长江中下

游平原的过渡地带,境内地形多以丘陵为主,主城区处在长江流域河谷中,地势较低,四面环山,下垫面形状及类型复杂。自 1997 年成为直辖市以来,重庆的城市化进程不断加快,人口不断增多。由于盆地地形的限制,城市面积很难扩张,因此建筑物多以 20 层以上的高层建筑物为主,建筑物密度相对较大,同时工业和交通也在不断增长。受到复杂地形和城市化的综合影响,在盛夏期间,重庆市区及周边地区极易出现高温干旱区域,严重地影响到人们正常的生活和工作。2006 年盛夏,重庆出现了近 100 a 来最严重的高温伏旱(陈红等,2007),到 2006 年 8 月 16 日,重庆 28 个区县最高温度超过 40 ℃。目前已有的研究大多从大气环流背景,以及青藏高原大地形的作用对川渝一带 2006 年高温干旱的形成及维持的物理机制进行了深入的讨论。这些结果认为,川渝地区上空长期受西太平洋副高控制,低空弱冷平流输送,而高空的暖平流输送在川渝地区造成稳定的下沉增温,此外 2005 年冬季青藏高原积雪偏少,以及青藏高原感热加强等原因是造成此次川渝干旱高温的主要原因(彭京备和张庆云,2007;邹旭恺和高辉,2007)。然而局地人为活动和城市下垫面中密集建筑对这次高温热浪的影响有多大尚不得知。很多已有的研究表明,人为活动对城市高温的影响不容忽视(Zhou and Shepherd, 2010; Myint et al. 2013)。此外江河、海洋以及山地等复杂地形引起的局地环流相互作用导致城市高温环境发生变化逐渐受到科学家们的广泛关注。重庆地区地形复杂,目前地形地貌,局地环流相互作用对城市高温影响的研究仍然较少。

基于以上背景,本文选取重庆地区作为研究对象,使用重庆市主城区及其周边地区高分辨率下垫面 GIS 数据集,利用 WRF 模式/BEP+BEM 城市冠层参数化方案进行了 2006 年重庆夏季一次高温过程的数值模拟试验。研究目标在于探讨下列问题:1)检验 WRF 模式对局地环流特征复杂的重庆城市热环境的模拟能力;2)了解重庆热环境的三维特征;3)探讨重庆特殊的下垫面结构与地形条件对热环境的影响。预计本研究对重庆市气象精细化预报改进、城市高温的形成原因与缓解有一定的参考意义。

## 1 天气背景与算例介绍

### 1.1 天气背景

2006 年入夏后,重庆地区出现了近几十年来最

严重的高温伏旱天气,最高气温突破40℃,部分站点观测值接近44℃,这超过了重庆以往历史的最高纪录。对于这次天气过程,青藏高压偏强、西太平洋副热带高压的西伸,以及高原及其邻近地区的热力作用对高温干旱天气的维持和增强都有一定的作用。图1是2016年8月重庆城区的平均气温以及热岛强度变化,由总共26个气象站点的数据得出,其中城市站点7个。

重庆市区存在明显的热岛效应,8月的高温、干旱天气增强了热岛效应,强度范围主要在0~3℃之间。本次研究选择8月14—15日进行分析,这两天是重庆市区温度最高、热岛强度也较大的两天,具有一定的代表性。通过分析这一段典型时期的重庆气温变化,有助于了解重庆市区高温的成因以及制定相应的缓解措施。

### 1.2 模式及算例设置

本文数据模拟所用精细下垫面数据来源于重庆市主城区及其周边地区高分辨率下垫面GIS数据集,观测数据来源于重庆2006年6—9月城区及周边地区26个自动站逐小时气象要素信息,数值模拟背景数据为6 h一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP再分析数据。使用了WRFv3.9模式和BEP+BEM参数化方案进行模拟,采用四层嵌套网格,垂直分36层,2 km以下有21层。最内层网格涵盖了整个重庆市区及近郊,分辨率为333 m。

研究选择2006年8月13日20时—16日08时(北京时间,下同)为模拟时间,前12 h为spin-up时间。在这段时间内,重庆天气晴朗,微风。

具体模拟区域信息见图2,模式方案选择以及

参数设置与王咏薇等(2013)中相同。

为了解重庆热环境的三维特征并探讨重庆特殊的下垫面结构与地形条件对热环境的影响,本文设计了两个算例:1)重庆真实的下垫面算例,称之为URBAN算例;2)将模式最内层城市下垫面替换为耕地下垫面以体现城市效应对局地热环境的影响,称之为NOURBAN算例。

研究选取了在模拟区域内的14个气象站点数据与模拟值进行对比研究,其中6个站点为城区站点,8个站点为郊区站点,这些站点较为均匀的分布在模拟区域内,具体分布可见图2的下垫面分布。

## 2 模式模拟效果验证

为检验模式模拟2 m气温的效果,将URBAN算例的结果与14测站观测值进行比较,使用相关系数R,平均误差ME,均方根误差RMSE来评判模拟效果,图3是所有站点模拟值与观测值随时间变化的情况。

所有站点的温度模拟相关系数均在0.89以上,说明模拟值与观测值之间具有很好的相关性,平均误差ME平均值为1.37℃,均方根误差RMSE在2℃以下,说明模拟偏差较小,结果具有可信度,BEP+BEM方案能较好地模拟出重庆城区的热环境。模式结果与观测值的误差主要出现在正午温度峰值和凌晨温度谷值处,表现为高温更高,低温更低。一方面模式中日间气温直接受到辐射的影响,因此可能与辐射方案中目前并无气溶胶影响的误差有关。同时所有城市格点均为同样的参数配置,其不透水下垫面占比较高,日间受到辐射升温更快,导致地表温

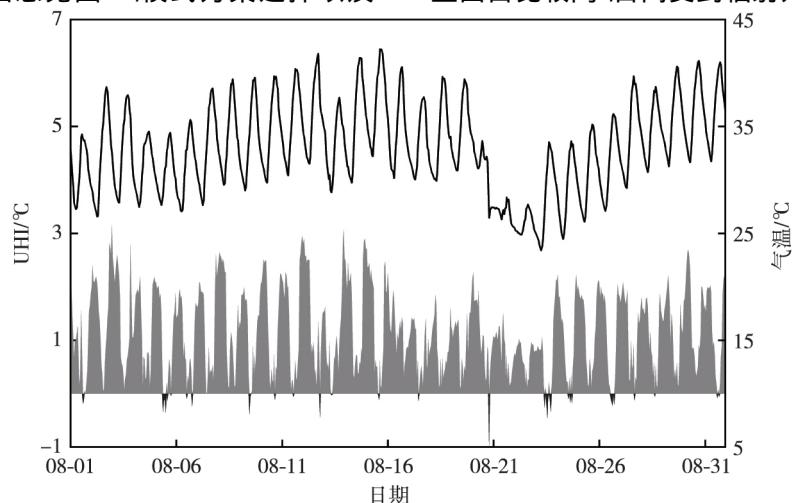


图1 重庆观测的热岛强度与城区平均气温的时间变化(单位:℃)

Fig.1 Temporal changes of observed UHI(Urban Heat Island) and average urban temperature in Chongqing(units:℃)

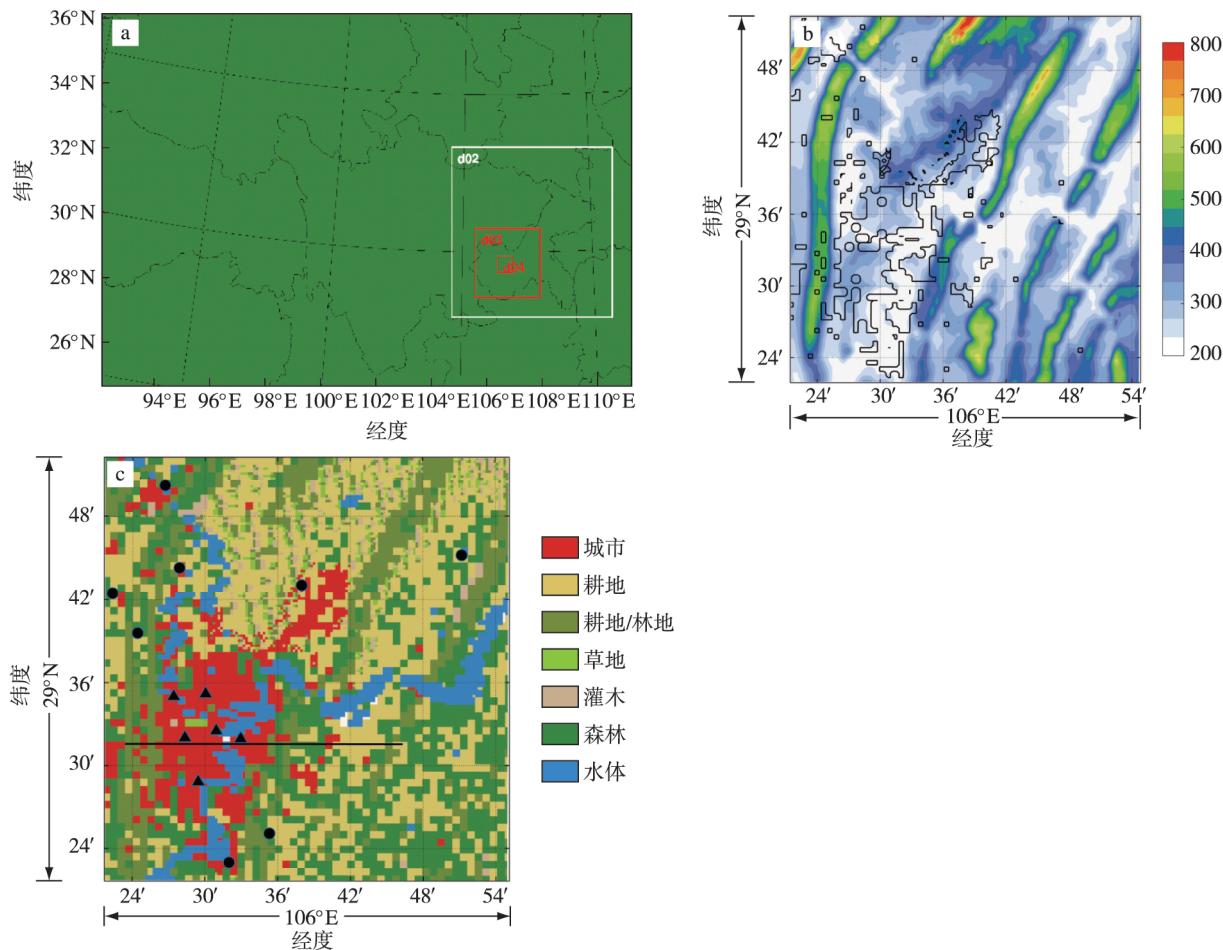


图2 模拟区域的设置(a)以及最内层地形高度(b;单位:m)和下垫面分布(c;三角形为市区观测站点,圆形为郊区观测站点)

Fig.2 (a) Setting of simulation domains ,(b) terrain height (m) and (c) land use distribution of the most inner domain (Triangles represent urban observation stations and circles represent suburban observation stations)

度更高,因此向上影响2 m气温值也较高,从而夜间温度也更低。另一方面,从气象观测站的设置来看,重庆建筑物密度大且较高,部分城市测站可能受到建筑物遮蔽的影响,实测日间气温较低。在乡村区域,模式能较好模拟出气温变化情况,模拟值与实际情况偏差不大。

图4为模拟及观测的热岛强度在2006年8月14日08时—16日08时这段时间内的日变化,将所有测站气温进行海拔高度校正(温度以气温垂直递减率订正到海平面高度以便进行比较)后,使用14个测站中的城市站点气温减去郊区站点气温得出。从图中观测数据可以看出强热岛时段处于夜间,热岛强度在1.5~2.5 °C,白天为弱热岛时段,热岛强度在0~0.7 °C。此外,从图3中可以看出,大多时候城区的平均气温要高于郊区,最高可达3 °C以上,且这种差值在夜晚明显高于白天。在白天,热岛强度有时可以达到负值,这与现有的一些研究结果相

似,即太阳落下后热岛强度在夜间和黎明之前的某一时间段达到最强,而在日间强度则较弱,甚至出现相反的情况而成为一个“冷岛”(8月15日13—17时),可能与城市中高大建筑物的遮阳作用及城市气溶胶排放对短波辐射的影响有关(蒙伟光等,2007;吴昊等,2014)。

本文模式模拟的热岛强度UHI基本为正值,说明大多时候城区的温度要大于郊区,且这种差异在夜间大于白天,这与实际观测的热岛强度变化的结论一致。模式模拟夜间的热岛强度变化较好,但日间城市热岛强度明显高于观测值,这与前文分析可能由于城市占比过高,城市2 m气温在日间模拟值偏高,且自动观测站有可能受到高而密的辐射遮蔽影响有关。

通过以上分析,可以认为模式能较好模拟出重庆区域的热环境特征,2 m气温的模拟相关系数达到0.89以上,平均误差ME低于1.5 °C,能够模拟

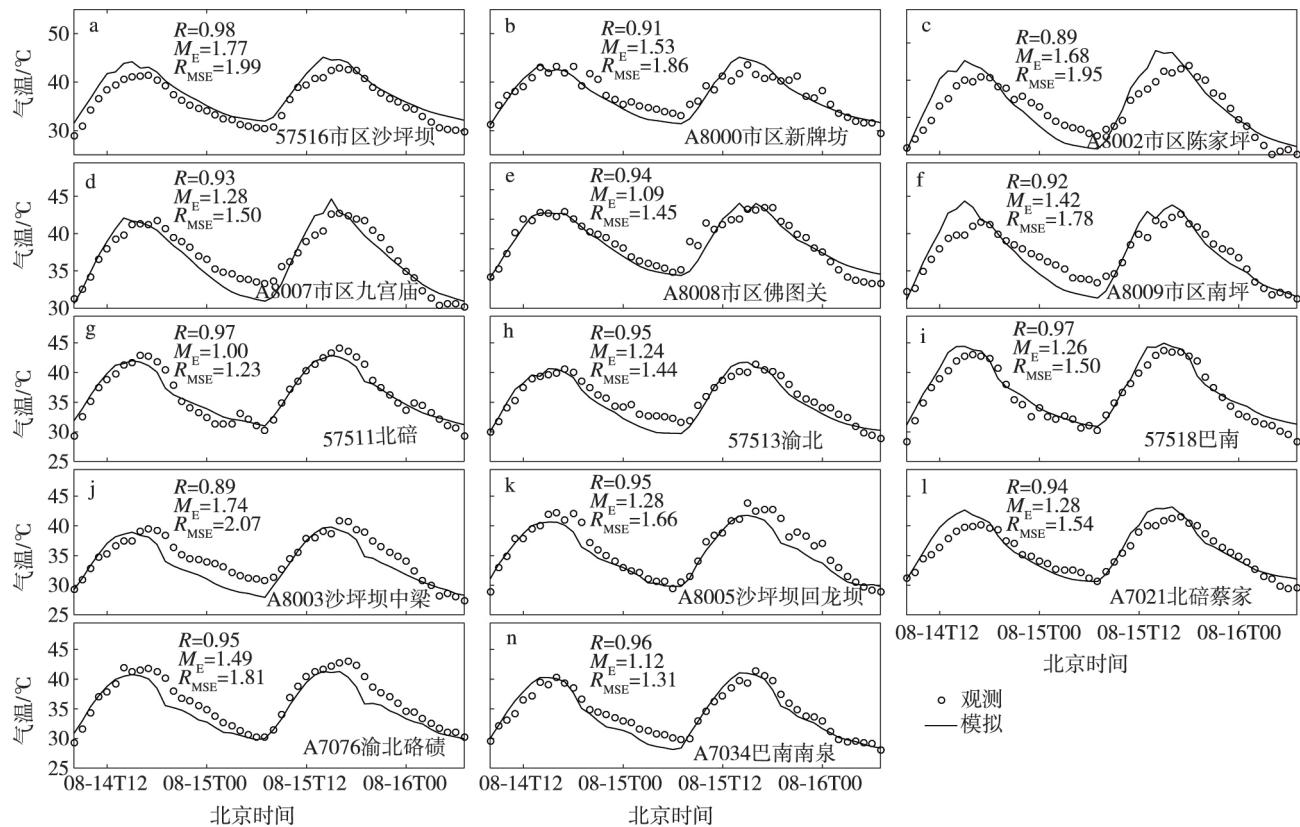


图3 重庆14站观测和模拟的2 m气温的时间变化(单位:℃)

Fig.3 Temporal changes of observed and simulated 2 m temperature at 14 stations of Chongqing (units: °C)

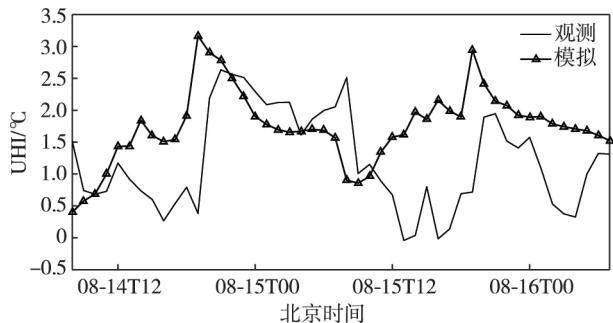


图4 观测和模拟的热岛强度的时间变化(单位:℃)

Fig.4 Temporal changes of observed and simulated UHI (units: °C)

出2 m气温及热岛强度的变化规律。因此可以认为,使用了WRFv3.9/BEP+BEM模式及参数化方案进行的模拟结果可信,可以在模式模拟的基础上进行重庆热环境的影响分析。

### 3 重庆城市下垫面对热环境的影响

#### 3.1 热岛水平分布特征及城市下垫面对其的影响

图5是2006年8月15日4个时间点重庆地区2 m气温的水平分布,城市部分的温度要高于大部分郊区,具有明显的热岛效应。但由于模拟地区地形复杂,地形高度梯度大,模拟区域的温度分布受到

了河流、山脉等地形因素的影响,部分山谷地带也有较高的温度。山谷由于海拔较低,不利于夜间辐射降温,因此在夜间易形成高温带。与图5中模拟热岛强度UHI变化情况类似,02时由于已是后半夜,城市储存热量消耗较多,城区与较平坦的郊区相比,有1.5 ℃左右的城市热岛强度,而08时较小为1 ℃左右。14时由于受到日照辐射影响,且城区人为热排放增加,温度平均为43 ℃左右,但受到城市建筑阻挡影响,温度分布并不均匀。郊区平均温度为41.5 ℃左右,热岛强度为1.5~2 ℃。20时受到日间城市大气持续加热及储热影响,热岛强度最大为3 ℃左右。城区气温约38 ℃,郊区气温约35 ℃。城市地区采用的是相同下垫面类型,在模式中同一下垫面的参数设置相同,但温度分布却不尽相同。夜间可以明显看出城市内高温区域主要集中在沿江区域以及城市的东部一带。这是由于沿江地区海拔高度较低容易集聚热量,同时夜间水体降温较慢,向周边地区释放更多的热量所导致。由图2中的地形图可以看到,城市的东面有细长的山脉阻挡,可能有地形影响环流导致热岛强度提高。在其他复杂地形城市的研究中,山脉所形成的山谷风与热岛环流相互影响(王腾蛟,2013),河流湖泊等由于比热容差

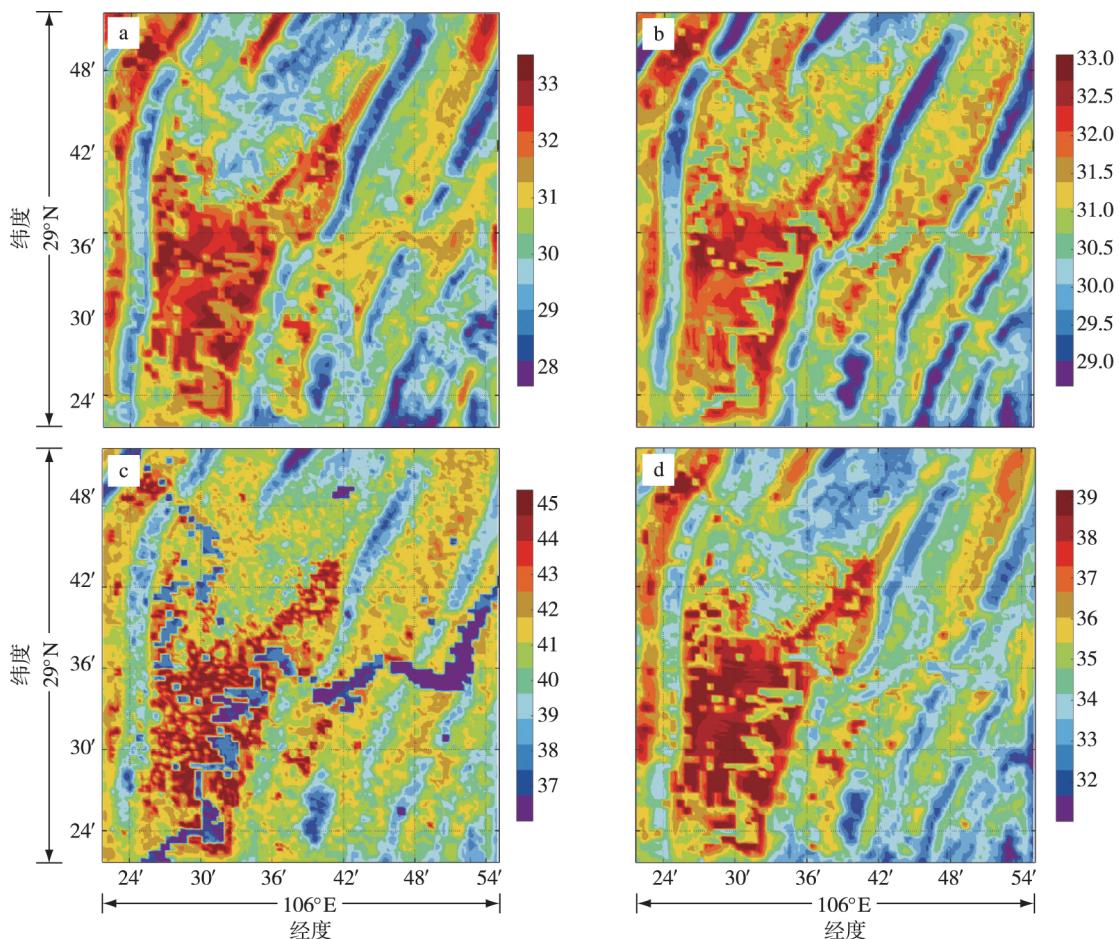


图 5 2006 年 8 月 15 日模拟区域 URBAN 算例的 2 m 气温分布(单位:℃):(a)02 时;(b)08 时;(c)14 时;(d)20 时

Fig.5 Distributions of simulated 2 m temperature of URBAN case in the simulation domain on 15 August 2006 (units:℃):(a)02:00 BST;(b)08:00 BST;(c)14:00 BST;(d)20:00 BST

异在夜间具有保温效应(姜润 2012;黄丹莲 2013)

图 6 是使用 URBAN 算例的 2 m 气温模拟值减去 NOURBAN 算例的 2 m 气温模拟值得到的差值分布,代表了城市下垫面对 2 m 气温模拟的影响。可以看出城市下垫面在夜间有明显的升温作用,这与热岛效应的特征相似。在日间城区内有较多零散的低温度差异区域夹杂在高值区中,这是由于城区内建筑密集,温度分布不均造成的。气温差值区域的分布可以在一定程度上反映出热岛强度的分布情况。通过图 6a、b、d 可以看到城市的西侧边缘有一定的热岛强度影响,且城市边缘区域与城市中心区域的温度差异不同,这可能是局地环流及背景风场所导致的。城市区域下垫面的温度表现出较为一致的特性,这与本文采用了单一城市下垫面有关,这会夸大城市下垫面的影响,同时增大了城市边缘的温度梯度,需要在以后的工作中改进。通过增加城市下垫面高、中、低密度建筑区的划分,可以更加突出城市人口密集区的影响,使城市形态更加具体、集中。

### 3.2 城市下垫面的能量平衡及对城市热岛的影响

尽管城市热岛的成因是多方面的,但热力因素起到了决定性的作用。热量的来源大部分是太阳以及大气的辐射,其体现在模式中的地表能量平衡过程中。由于城市下垫面上的建筑物的几何形状以及建筑材料的差异,相较郊区而言城市下垫面上的各辐射通量有很大的改变,研究城市下垫面的能量平衡,尤其是辐射平衡对理解城市热岛的形成具有重要作用。地表净辐射通量  $Q^*$  可表示为式(1),其中  $Q_{SR}^*$ 、 $Q_{LR}^*$  是净短、长波辐射通量,  $Q_{SR\downarrow}$ 、 $Q_{SR\uparrow}$  为向下、向上的短波辐射通量,  $Q_{LR\downarrow}$ 、 $Q_{LR\uparrow}$  为向下、向上的长波辐射通量。

$$Q^* = Q_{SR}^* + Q_{LR}^* = (Q_{SR\downarrow} - Q_{SR\uparrow}) + (Q_{LR\downarrow} - Q_{LR\uparrow}) \quad (1)$$

图 7 给出了重庆市区 URBAN 方案与 NOURBAN 方案的辐射能量与热量通量随时间变化,正值代表向下的通量。不同方案差异主要体现在向上的

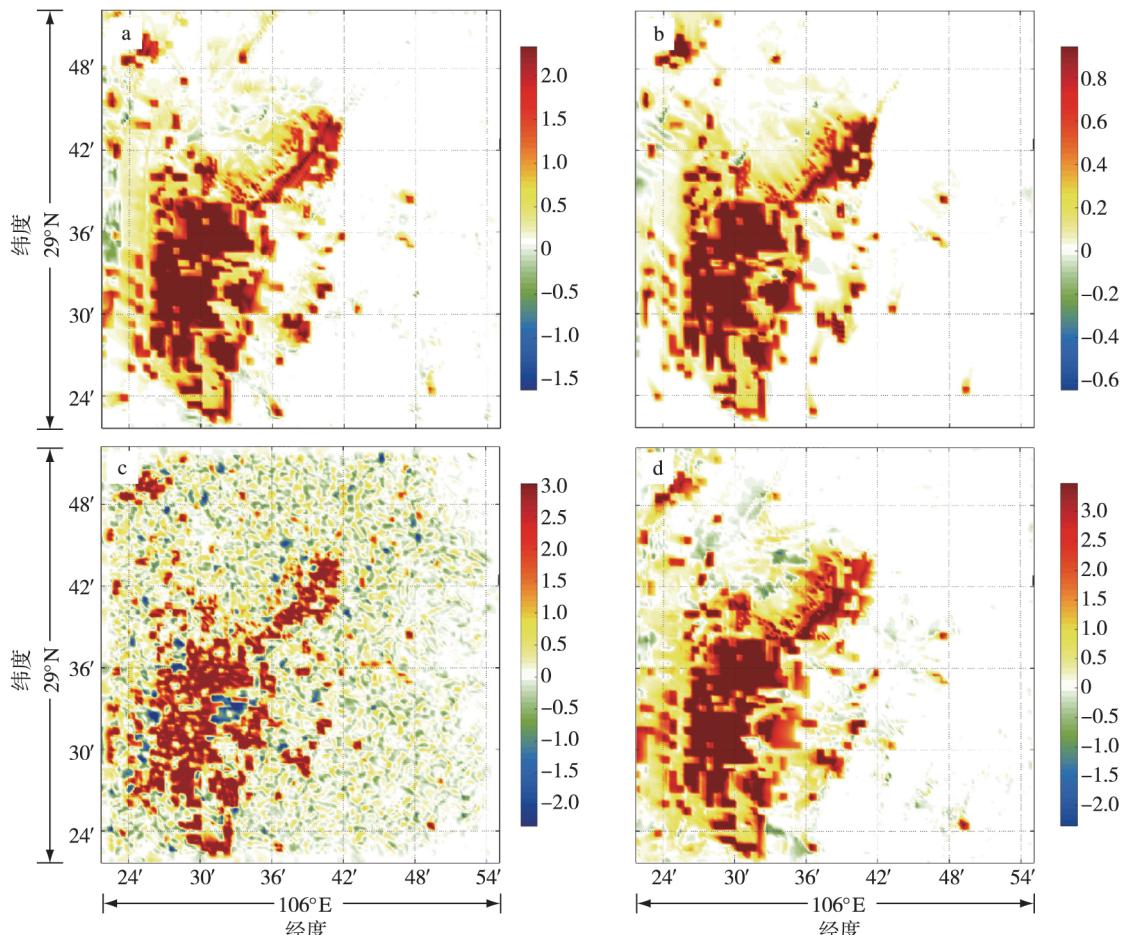


图6 2006年8月15日2 m气温差值(URBAN减NOURBAN)分布(单位:K):(a)02时;(b)08时;(c)14时;(d)20时

Fig.6 Distributions of 2 m temperature differences (URBAN minus NOURBAN) on 15 August 2006 (units:K): (a) 02:00 BST; (b) 08:00 BST; (c) 14:00 BST; (d) 20:00 BST

长、短波辐射中。不同的下垫面类型反照率不同，城市中建筑、街渠的存在导致反照率较低，因此反射的短波辐射量偏低。接收到的短波辐射具有差异，且城市下垫面中考虑了人为热的影响，城市具有热岛效应，地面温度较郊区下垫面高，因而长波辐射较高。

图7c,d,f是模拟区域的潜热、感热、土壤热通量、空调通风系统排放热量以及净辐射通量随时间变化情况。净辐射通量是地-气能量系统的外部驱动项，白天作为能源，加热地表并将热量传递给大气；夜晚则成为能汇，使地表降温并对大气起冷却作用。潜热和感热代表了接收的辐射能量分配情况。有无城市的存在对净辐射影响较小为 $20\text{ W/m}^2$ 左右，在14:00时可达到 $25\text{ W/m}^2$ 。潜热通量在白天最大值为 $55\text{ W/m}^2$ ，土壤热通量最大值为 $-200\text{ W/m}^2$ ，而感热通量最大值为 $580\text{ W/m}^2$ ，远大于潜热通量、土壤热通量的热贡献。总体而言，白天城区表面的感热作用大于潜热作用，而郊区则表现为潜热作

用占主导，这与下垫面特性相关，城市下垫面植被少以及建筑材料的不透水特性使得缺少水汽变化，使得城市气温较高，具有热岛效应。在夜间，空调通风等系统主要以感热排放为主，排放量达到了 $100\text{ W/m}^2$ 以上，较其他排放更大，维持了夜间城市热岛强度。土壤热通量表现为有城市时更大，说明被吸收的短波辐射一部分用于增加土壤热通量，一部分用于增加感热通量。城市地表对大气的加热作用更强，白天城市储热能量更多，与郊区差异最大为 $150\text{ W/m}^2$ ，夜间这些热量向大气释放，是城市热岛形成的重要原因。

### 3.3 热岛垂直分布特征

图8是将URBAN算例、NOURBAN算例沿着一点( $106.39^\circ\text{E}, 29.53^\circ\text{N}$ )与另一点( $106.77^\circ\text{E}, 29.53^\circ\text{N}$ )的连线做出的垂直剖面温度分布，并叠加了流场的分布，流场是由u、w共同合成而得到(由于风速垂直分量w远小于水平分量u，因此将w数值乘以一定系数使得风矢具有垂直速度特征，又不

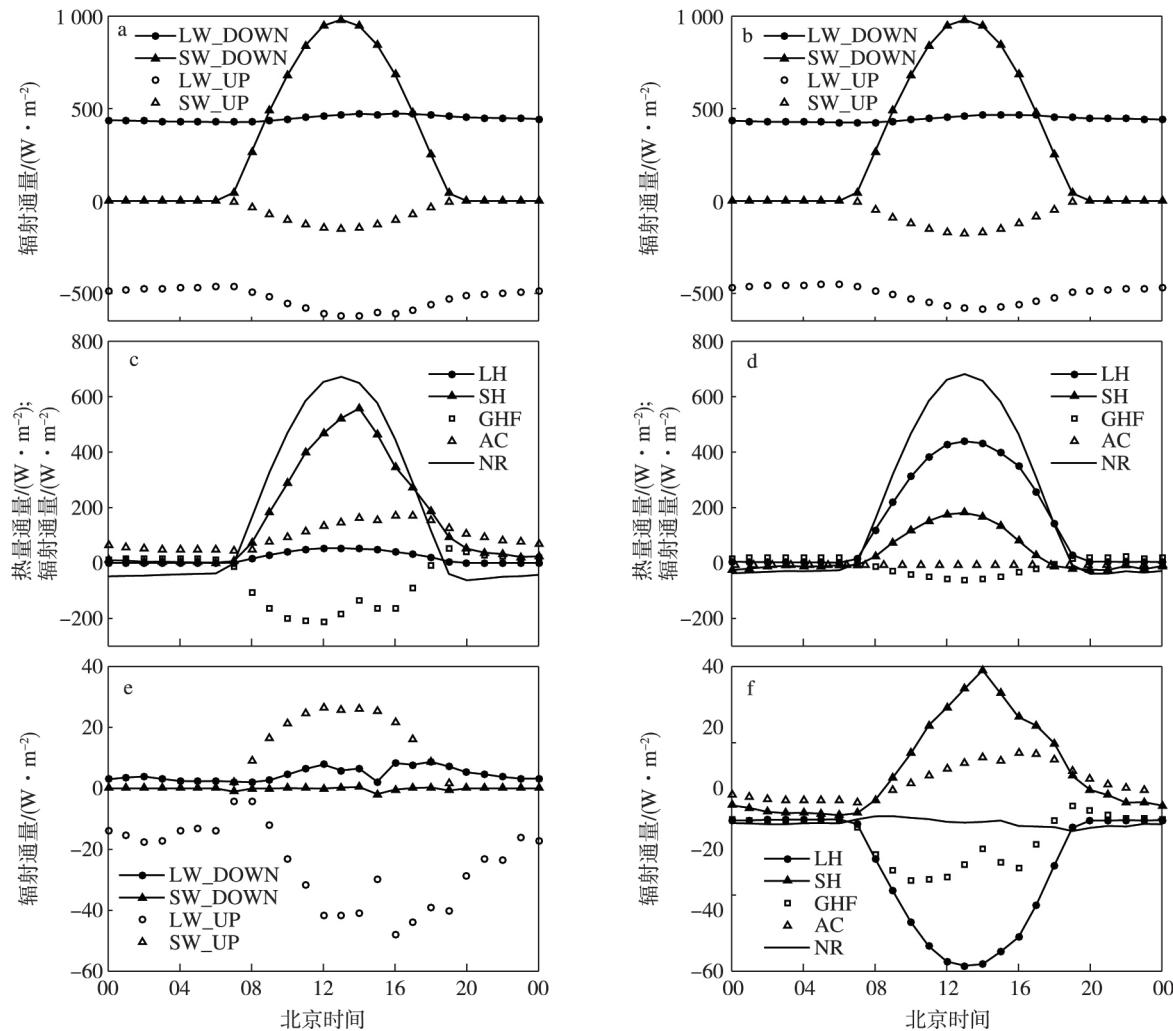


图 7 2006 年 8 月 15 日城市地表下垫面的辐射通量和热量通量的时间变化(单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ ): (a) URBAN 算例辐射 4 分量; (b) NOURBAN 算例辐射 4 分量; (c) URBAN 算例热量通量和净辐射; (d) NOURBAN 算例热量通量和净辐射; (e) URBAN 减 NOURBAN 的辐射 4 分量差值; (f) URBAN 减 NOURBAN 的热量通量和净辐射差值

Fig.7 Temporal changes of radiation energy and heat flux of urban land category on 15 August 2006 (units:  $\text{W}/\text{m}^2$ ): (a) four radiation components of URBAN case; (b) four radiation components of NOURBAN case; (c) heat flux and net radiation of URBAN case; (d) heat flux and net radiation of NOURBAN case; (e) four radiation components differences (URBAN minus NOURBAN); (f) heat flux and net radiation differences (URBAN minus NOURBAN)

失水平特征)。这条剖面经过了重庆市区以及其两侧的山脉,可以分析出城市热岛的垂直分布特征与重庆两侧山脉对热岛环流的影响。图中蓝色实线代表下垫面是城市区域的部分,重庆市区位于两条山脉之间,被长江所分割。

模拟结果表明,所有城市下垫面区域的地面温度都高于对应的 NOURBAN 区域内的耕地下垫面的温度,20 时温度差异最明显,这是由于此时温度尚未大幅下降,而建筑物内有较多白天累积的储热释放所造成的。城市区域热量向上扩散的范围也要

高于对应 NOURBAN 算例,能达到 100 m 以上,但不同时次其对应的扩散能力不同,这与其下垫面温度、热岛强度和垂直湍流扩散能力有关。除日间 14 时以外的 3 个时刻(02、08、20 时),城市区域中 URBAN 方案均较 NOURBAN 方案有明显的大范围高温区域,这体现了城市热岛在垂直方向上的影响。在 14 时,下垫面温度是一天中最高的,但城市地区 URBAN 方案较 NOURBAN 方案却并没有明显的大范围高温区域,表明日间城市热岛体现的不明显,这与文章之前的结论类似。

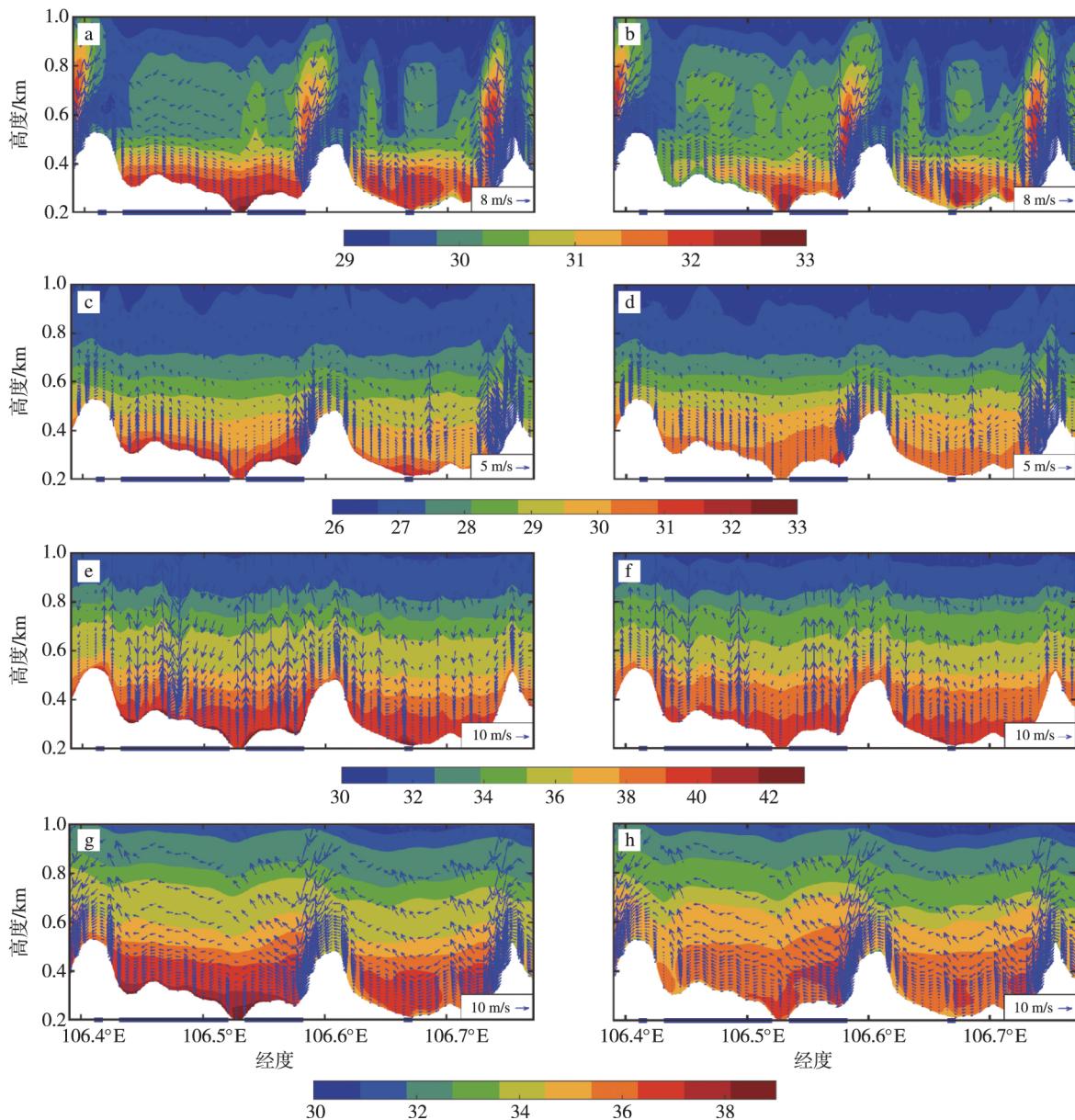


图8 2006年8月15日URBAN算例(a,c,e,g)和NOURBAN算例(b,d,f,h)温度场(单位:℃)和环流场(垂直风速经过处理)的垂直剖面(蓝色横线表示城市区域):(a,b)02时;(c,d)08时;(e,f)14时;(g,h)20时

Fig.8 Vertical cross sections of temperature (units: °C) and circulation (vertical wind speed modified) fields of (a, c, e, g) URBAN and (b, d, f, h) NOURBAN cases on 15 August 2006 (Blue horizontal lines represent urban areas): (a, b) 02:00 BST; (c, d) 08:00 BST; (e, f) 14:00 BST; (g, h) 20:00 BST

城市下垫面地形以及两侧的山脉对背景风场、城市环流均有一定的影响。大部分区域尤其是城市区域的垂直风速都较小,但山脉两侧有较大的垂直风速出现,且山脉的东侧有上升运动而西侧有下沉运动,这与背景东风的气流越山运动有关。在夜间时次,山脉两侧的气流垂直运动表现更加明显,体现了较强的山风。夜间的山风为重庆市区带来了较高温度的空气,同时气流越山所产生一定程度的焚风效应也对重庆城区夜间的城市热岛起到了一定的增强作用。城市区域夜间垂直风速较弱,这与模式模

拟出的浅薄的城市热岛垂直影响区域有关,风向改变主要由于下垫面地形变化所引起,没有形成明显的热岛环流结构。由于周边山脉的山谷风和较强的背景风场对城市热岛环流有一定抑制作用,使得城市高温集中在高度较低的区域。在城市不稳定层结较强的20时,由东侧山脉吹下的风由于地形影响在山脚处有较明显的向上偏转,URBAN方案中城市热岛影响的高温区内的上升气流使得风向在城市上空转变更为快速。在日间14时,URBAN方案城市区域内模拟的上升气流更明显,且在城市中心部分

出现辐合的下沉气流,在两侧各有强上升气流,其中东侧山脉处的上升气流在高空有向城市部分偏转的迹象,热岛环流特征较明显。

### 3.4 局地环流相互作用对热岛的影响

影响热岛形成的因素除了辐射热量差异、上节中的垂直环流的差异外,局地水平环流也对热量的分布与平流有一定作用,同时热岛的形成也会影响城市区域和外围的环流分布。图9是NOURBAN算例减去URBAN算例的10 m风速值的水平分布,同时叠加URBAN算例的10 m风速矢量。

总体而言,背景风场主要为较强的东南风,局地环流呈现了靠近山区风速较大,城市区域风速较小的特性,体现了城市密集的建筑群对低层大气流场的空气动力学效应,复杂山谷地形的山谷风环流特性。在日间,由于下垫面温度较高,背景风场较弱,呈现出以局地热力对流为主的流场结构,风向较为杂乱。在夜间(02、20时),城市内部风场表现较为

一致,城市下垫面造成的风速差异主要体现在市区边缘,普遍具有更大的风速,可能是由于风经过城市区域的绕流以及热岛效应造成的出流。市区东部有较大的负风速差值区,这是由于城市下垫面对背景风有阻碍作用。市区西侧风速较小且有风向转变,一方面是因为高大的山脉阻挡了城市出流,另一方面是山风与出流相抵。这些风场特征使得进出重庆市区的气流较少,温度平流较低,在一定程度上加强了夜间重庆的城市热岛强度。

## 4 结论与讨论

本文采用WRF v3.9模式,在重庆2006年夏季高温伏旱条件下,选取天气晴好,热岛较强的2006年8月13日20时—16日08时作为模拟时段,利用URBAN和NOURBAN两个算例来研究重庆城市热岛分布、成因及局地环流状况,探讨了复杂地形对热岛的影响。主要结论如下:

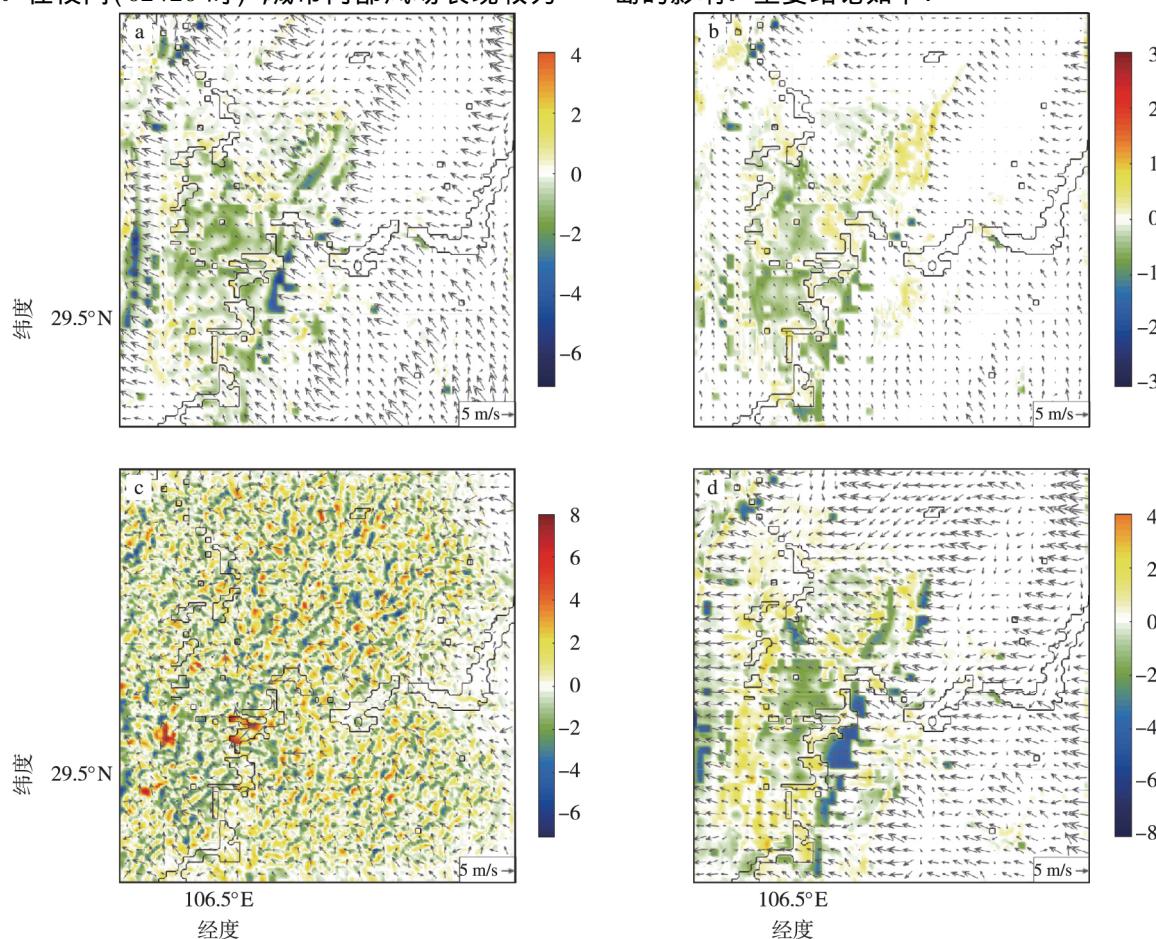


图9 URBAN算例减NOURBAN算例的10 m水平风速差的分布(单位:m/s;叠加URBAN算例的10 m高度风矢量):(a)02时;(b)08时;(c)14时;(d)20时

Fig.9 Distributions of 10 m horizontal wind speed differences (URBAN minus NOURBAN) (units:m/s;Superposed with 10 m wind vector of URBAN case):(a)02:00 BST;(b)08:00 BST;(c)14:00 BST;(d)20:00 BST

1) BEP+BEM 方案能够较好地模拟出重庆复杂地形下的热岛特征。方案合理考虑了建筑物的动力及热力效应, 模拟结果与实际结果变化趋势一致, 量级吻合。城市中 6 个典型建筑物下垫面气象站点 2 m 气温观测与对应模拟值的 ME 平均值为 1.37 °C, 均方根误差 RMSE 在 2 °C 以下。模式结果与观测值的误差主要出现在正午温度峰值和凌晨温度谷值处, 表现为高温更高, 低温更低。这是由于模式中城市下垫面地表结构为单一不透水下垫面, 能量分配以感热为主。同时模式不能显示分辨建筑物的高度, 模式中默认设定的建筑物形态参数不适应重庆实际高密的建筑物形态。由于采用了单一城市下垫面, 使得模拟值普遍要低于城市站点的观测值, 夸大了城市下垫面的影响, 使得城市边缘处有较大的温度梯度。所以有必要在今后的研究中增加城市下垫面种类, 对模式中设定的建筑物高度、密度等冠层相关参数进行改进, 使其与实际情况相符, 从而改进模拟效果。

2) BEP+BEM 方案较好地模拟出了重庆地区的热岛分布的空间和时间特征。重庆市温度的分布受地形和城市下垫面的双重影响, 越靠近城区, 温度的分布受城市化影响就越大, 在海拔低处, 温度就越高。在 14 时, 下垫面温度是一天中最高的, 但城市地区 URBAN 方案较 NOURBAN 方案却并没有明显的大范围高温区域, 表明日间城市热岛体现的不明显。城市两侧的山脉对背景风场、城市环流均有一定影响。夜间的山风为重庆市区带来了山顶的较高温度的空气, 同时气流越山所产生一定程度的焚风效应也对重庆城区夜间的城市热岛起到了一定的增强作用。

3) URBAN 与 NOURBAN 两个算例的能量平衡的分析表明, 城市下垫面立体三维结构对辐射的陷阱作用导致城市表面总体反射率小, 向上短波辐

射略小于郊区, 14 时可达到  $25 \text{ W/m}^2$ , 同时城市能量分配以感热为主, 使得城区温度偏高。在夜间空调通风系统的排放占据了热量排放的主要部分, 可达到  $100 \text{ W/m}^2$ 。城市地表对大气的加热作用更强, 白天城市储热能量更多, 夜间热量向大气释放。

4) 重庆市复杂地形引发的局地环流对热岛强度及其分布产生一定的影响。此次过程背景风场主要为东南风, 局地环流呈现了越靠近山区地形较高处风速大, 山谷城市区域风速较小的特性。在市区的东南侧有高大的山脉阻挡, 东南向的背景风经过这些山脉时或绕流, 或气流越山, 而城区西侧的山脉阻挡了市区内的出流, 对城市热岛的形成有一定的促进作用。白天由于山地地形以及城市下垫面的影响, 湍流很旺盛, 流场呈现明显的垂直运动特征, 城市储存的热量交换很强, 白天热岛较弱, 14 时模拟热岛强度为 1.5 °C 左右。到了夜间, 温度降低, 湍流运动减弱, 流场整体呈现背景场东南风的特征。此时在城市东侧的山脉存在明显的下坡风, 存在有一定的类似下沉增温的效应, 因此城市西侧温度更高。同时, 由于城市处于谷地, 城市热量夜间很难被带走, 呈现明显的持热效应。自 20 时湍流活动减弱后, 存在最强的热岛效应, 模拟热岛强度为 3 °C 左右。在城市西侧, 仍然存在一定程度的上坡风, 把热量逐渐带走, 因此在夜间城市降温, 热岛强度降低。模拟热岛强度在 08 时达到一天中的最低值仅为 0.8 °C 左右。

本文利用 WRF 模式, 对重庆地区热环境及环流状况进行模拟, 得出了有一定意义的结论, 但模式中仍存在许多需要改进的地方。本文采用了单一城市下垫面, 需要在以后的工作中改进, 增加城市下垫面高、中、低密度建筑区的划分。针对研究区域的特点, 对模式设定的建筑物高度、比例进行细化改进, 并对不同格点的城市占比进行单独设定。

## 参考文献(References)

- Bhati S, Manju M H. 2016. WRF model evaluation for the urban heat island assessment under varying land use/land cover and reference site conditions [J]. *Theor Appl Climatol*, 126(1/2): 385–400.
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *Int J Climatol*, 31(2): 273–288.
- Chen G, Zhao L H, Mochida A. 2016. Urban heat island simulations in Guangzhou, China, using the coupled WRF/UCM model with a land use map extracted from remote sensing data [J]. *Sustainability*, 8(7): 14.
- 陈红, 卫捷, 孙建华. 2007. 2006 年夏季主要天气系统及环流特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 12(1): 8–19. Chen H, Wei J, Sun J H. 2007. The weather and its circulation in summer of 2006 [J]. *Clim Environ Res*, 12(1): 8–19. (in Chinese).
- 程志刚, 孙晨, 毛晓亮, 等. 2016. 城市化对成都地区夏季气候变化影响的数值模拟研究 [J]. *成都信息工程大学学报*, 31(4): 386–393. Cheng Z G, Sun C, Mao X L, et al. 2016. Simulation of the impact of urbanization on summer climate in Chengdu [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 31(4): 386–393. (in Chinese).

- 董良鹏 江志红 沈素红 等 2014.近十年长三角洲城市热岛变化及其与城市群发展的关系 [J].*大气科学学报*,37(2):146-154. Dong L P , Jiang Z H ,Shen S H ,et al. 2014.Urban heat island change and its relationship with urbanization of urban agglomerations in Yangtze River Delta in past decade[J].*Trans Atmos Sci* ,37(2):146-154.(in Chinese).
- Giannaros T M ,Melas D ,Daglis I A ,et al. 2013.Numerical study of the urban heat island over Athens(Greece) with the WRF model[J].*Atmos Environ* ,73:103-111.
- 黄丹莲 2013.杭州市城市热岛特征及其模拟研究[D].南京:南京信息工程大学. Huang D L ,2013.Characteristics and simulation of urban heat island in Hangzhou City[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology.(in Chinese).
- 姜润 2012.南京夏季城市热岛时空分布特征观测及模拟研究[D].南京:南京信息工程大学. Jiang R ,2012.Observation and simulation analysis on distribution characteristics of Nanjing summer urban heat island[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology.(in Chinese).
- Kondo H ,Liu F H ,1998.A study on the urban thermal environment obtained through one-dimensional urban canopy model[J].*J Japan Soc Atmos Environ* ,83:179-192.
- Kondo H ,Kikegawa Y ,2003.Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use[J].*Pure and Applied Geophysics* ,160(1/2): 317-324.
- Kondo H ,Genchi Y ,Kikegawa Y ,et al. 2005.Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city : structure of the urban canopy model and its basic performance[J].*Bound-Layer Meteor* ,116(3):395-421.
- 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.
- 马红云,董轩 孙岑霄 等 2018.南京地区高温天气下城市化影响的模拟研究[J].*大气科学学报* ,41(1):67-76. Ma H Y ,Dong X ,Sun C X ,et al. 2018.Numerical simulations of urbanization impacts under hot weather conditions in Nanjing [J].*Trans Atmos Sci* ,41(1):67-76. ( in Chinese).
- Manley G ,1958.On the frequency of snowfall in metropolitan England [J].*Quart J Roy Meteor Soc* ,84(359):70-72.
- Martilli A ,Clappier A ,Rotach M W ,2002.An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models [J].*Bound-Layer Meteor* ,104 (2): 261-304.
- Masson V ,2000.A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models[J].*Bound-Layer Meteor* ,94(3):357-397.
- 蒙伟光,闫敬华,扈海波 2007.热带气旋背景条件下的城市效应与广州夏季雷暴[J].中国科学 D 辑 ,37(12):1660-1668. Meng W G ,Yan J H , Hu H B 2007.Urban effect under tropical cyclone background and summer thunderstorms in Guangzhou[J].*Science in China (Series D)* ,37(12): 1660-1668. (in Chinese).
- Mirzaei P A ,Haghhighat F ,2010.Approaches to study urban heat island-abilities and limitations[J].*Building and Environment* ,45(10):2192-2201.
- Myint S W ,Wentz E A ,Brazel A J ,et al. 2013.The impact of distinct anthropogenic and vegetation features on urban warming [J].*Landscape Ecol* ,28 (5):959-978.
- Nie W S ,Zaitchik B F ,Ni G H ,et al. 2017.Impacts of anthropogenic heat on summertime rainfall in Beijing [J].*J Hydrometeor* ,18(3):693-712.
- Oke T R ,Cleugh H A ,1987.Urban heat storage derived as energy balance residuals[J].*Bound-Layer Meteor* ,39(3):233-245.
- 彭京备,张庆云 2007.2006年川渝地区高温干旱特征及其成因分析[J].*气候与环境研究* ,12(3):464-474. Peng J B ,Zhang Q Y ,2007.Characteristics and causes of high temperature and drought in Sichuan-Yunnan Region in 2006 [J].*Clim Environ Res* ,12(3):464-474. (in Chinese).
- 司鹏 2010.城市化对深圳气温变化的贡献[J].*大气科学学报* ,33(1):110-116. Si P ,2010.Urbanization-induced surface air temperature change in Shenzhen[J].*Trans Atmos Sci* ,33(1):110-116. (in Chinese).
- 王腾蛟 2013.河谷城市兰州热岛效应的观测与数值模拟[D].兰州:兰州大学. Wang T J ,2013.Observation and numerical simulation of urban heat island effect in valley city Lanzhou [D].Lanzhou:Lanzhou University. (in Chinese).
- 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):981-993. Wang Y W ,Jiang W M ,2009.Numerical study on development of a multilayer urban canopy model[J].*Acta Meteorologica Sinica* ,67(6):981-993. (in Chinese).
- 王咏薇,蒋维楣,刘红年 等 2008.大气数值模式中城市效应参数化方案研究进展[J].*地球科学进展* ,23(4):371-381. Wang Y W ,Jiang W M , Liu H N ,et al. 2008.Advanced in research of urban effect parameterization scheme on models of atmosphere [J].*Advances in Earth Science* ,23 (4):371-381. (in Chinese).
- 王咏薇,伍见军 杜钦 2013.不同城市冠层参数化方案对重庆高密度建筑物环境的数值模拟研究[J].*气象学报* ,71(6):1130-1145. Wang Y W ,Wu J J ,Du Q ,2013.Numerical of the Chongqing high-density building environment by the WRF with the different urban canopy schemes [J].*Acta Meteorologica Sinica* ,71(6):1130-1145. (in Chinese).
- 王咏薇,任侠 瞿雪飞 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 Y W ,Ren X ,Zhai X F ,et al. 2016.Numerical study of the three-dimensional thermal environment over a complex underlying surface in Nanjing [J].*Trans Atmos Sci* ,39(4):525-535. (in Chinese).
- 吴昊,王体健,方欢 等 2014.南京细颗粒物对城市热岛强度的影响[J].*大气科学学报* ,37(4):425-431. Wu H ,Wang T J ,Fang H ,et al. 2014. Impacts of aerosol on the urban heat island intensity in Nanjing [J].*Trans Atmos Sci* ,37(4):425-431. (in Chinese).
- 姚帅,蒋德海 张艳霞 等 2016.利用 GRAPES-UCM 模式对广州典型污染天气过程的数值模拟研究[J].*南京大学学报(自然科学版)* ,52(6): 1016-1028. Yao S ,Jiang D H ,Zhang Y X ,et al. 2016.Study on the numerical simulation of the typical polluted weather process in Guangzhou using GRAPES-UCM [J].*Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* ,52(6):1016-1028. (in Chinese).
- 叶丽梅,江志红 霍飞 2014.南京地区下垫面变化对城市热岛效应影响的数值模拟[J].*大气科学学报* ,2014,37(5):642-652. Ye L M ,Jiang Z H ,Hu F ,2014.Numerical simulation of the impact of land cover change on the urban heat island effect in Nanjing [J].*Trans Atmos Sci* ,37(5): 642-652. (in Chinese).

- 张尚印,张海东,徐祥德,等.2005.我国东部三市夏季高温气候特征及原因分析[J].高原气象,24(5):829-835. Zhang S Y ,Zhang H D ,Xu X D ,et al. 2005.Climatic character and cause analysis of summer high temperature in main cities of east China [J].Plateau Meteorology 24(5):829-835.(in Chinese).
- Zhang Y Z ,Miao S G ,Dai Y J ,et al. 2017.Numerical simulation of urban land surface effects on summer convective rainfall under different UHI intensity in Beijing [J].J Geophys Res Atmos ,122(15):7851-7868.
- 郑亦佳,刘树华,何萍,等.2017.滇中地区夏季城市热岛效应的数值模拟研究[J].北京大学学报(自然科学版),53(4):639-651. Zheng Y J ,Liu S H ,He P ,et al. 2017.Numerical study of summertime urban heat island in dianzhong [J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinen-sis 53(4):639-651.(in Chinese).
- 周雪帆,李保峰,陈宏.2017.城市高层化及高密度化发展模式对城市气候的影响研究[J].城市建筑(1):16-19. Zhou X F ,Li B F ,Chen H ,2017.Study on the influence of urban high-rise and high-density development models on urban climate [J].Urbanism And Architecture(1):16-19.(in Chinese).
- Zhou Y ,Shepherd J M .2010.Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies [J].Nat Hazards ,52(3):639-668.
- 邹旭恺,高辉.2007.2006年夏季川渝高温干旱分析[J].气候变化研究进展,3(3):149-153. Zou X K ,Gao H .2007.Analysis of high temperature and drought in Sichuan and Sichuan in summer of 2006 [J].Advances in Climate Change Research 3(3):149-153.(in Chinese).

## Numerical simulation of urban heat island and local circulation characteristics under complex terrain conditions

SUN Yong<sup>1</sup>,WANG Yongwei<sup>1</sup>,GAO Yanghua<sup>2</sup>,WANG Kefei<sup>1</sup>,HE Zeneng<sup>2</sup>,DU Qin<sup>2</sup>,CHEN Zhi-jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

<sup>2</sup>Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China

Using WRF model coupled with multilayer urban canopy scheme BEP(Building Environment Parameterization) and BEM(Building Energy Model) scheme, a simulation was conducted to explore characteristics and causes of Chongqing urban heat island and impact of local circulation on it. There were two simulation cases conducted, one was URBAN case that utilized real Chongqing land use data, another was NOURBAN case that replaced urban category with crop in order to understand impact of urban on Chongqing heat island. Results show that: (1) WRF model produces good results compared to observed 2 m air temperature. Errors mainly occur at noon temperature peak and morning temperature valley, which are caused by the characteristics of urban land use and unreal building parameters. (2) BEP+BEM scheme can simulate well spatial and temporal features of urban heat island in Chongqing. Spatial distribution of temperature in Chongqing is influenced by topography and urban underlying surface. When closer to the city, greater temperature is affected by the urbanization, and higher temperature locates at low elevation. (3) Urban 3D surface leads to trap effect in urban surface albedo (Total reflectivity of urban surface is low), and the urban upward shortwave radiation is less than about 20% in suburbs. Sensible heat is a major factor in urban energy balance however latent heat in suburbs. The larger urban surface heat storage and the waste heat of air-conditioner released to the atmosphere at night are important reasons for urban heat island conformation. (4) The background wind field is mainly southeast wind in the simulated area. The wind speed is higher in mountain area and lower in urban area, which reflects the aerodynamic effects of dense urban buildings on the low-level atmospheric flow field, as well as the characteristics of valley wind circulation over complex valley terrain. There are high mountains in the western and southeastern sides of the city, which block the outflow from the city, let the background wind to climb or circle around the mountains, and contribute to the enhancement of urban heat island.

**urban heat island; WRF model; urban canopy scheme**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180204001

(责任编辑:张福颖)