

城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响

蒙伟光^{1, 3} 闫敬华¹ 扈海波²

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 通过对 2004 年 8 月 11 日午后发生在珠江三角洲地区的一次强雷暴天气的高分辨数值模拟, 研究了城市化发展可能对雷暴活动的影响问题, 主要考察了与城市土地利用类型改变相关的“城市热岛”的形成和演变特征, 城区粗糙度增大可能引起的低层辐合的增强过程, 及其与雷暴发展强度变化的关系。结果表明: 模拟的雷暴发展和演变过程与这一地区城市化的发展有密切的联系。引进了更加真实的关于珠江三角洲地区的土地利用类型资料之后, 耦合了陆面模式 Noah LSM 的 MM5 模式可以更加成功地模拟出强雷暴天气的发展和演变过程。雷暴系统移经主要城市区后在珠江口西岸的增强过程与这一地区“城市热岛”的效应有关。中午时热岛开始形成于广州城区的上空, 之后向南移动, 范围扩大。另外, 城区粗糙度增大引起的低层辐合增强可能在雷暴发展和演变过程中也起到了作用。模拟的与城市影响有关的低层辐合主要位于 500 m 以下的近地面层, 开始时形成于城市的上风方向, 并在下风方向增强, 由此引起的强烈上升运动有利于新的对流的启动和发展, 促使雷暴强度增强。

关键词 雷暴 城市化影响 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2007) 02-0364-13

中图分类号 P446

文献标识码 A

Possible Impact of Urbanization on Severe Thunderstorms over Pearl River Delta

MENG Wei-Guang^{1, 3}, YAN Jing-Hua¹, and Hu Hai-Bo²

1 *Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080*

2 *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089*

3 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract During the late afternoon hours of 11 August 2004, convective storms moved through the urban areas of the Pearl River Delta in South China. The convective system included severe thunderstorms with wind gusts (>30 m/s) and caused extensive damage in the urban and suburban areas. To investigate the impact of urban land use changes on the evolution of the severe thunderstorms in the vicinity of Pearl River Delta, a high-resolution numerical simulation is conducted using the MM5 (V3.6) modeling system. In the current investigation, two comparison experiments are performed. The first experiment (Expt 1) is carried out with the MM5 original surface characteristics and a simple five-layer soil model. Then, the second experiment (Expt 2) is designed to use a new land use dataset derived from local GIS to identify the Pearl River Delta urban land use changes and couple the MM5 model with the advanced NOAH LSM (land surface model), in which the urban effects has been represented and enhanced by increasing the roughness length to 0.8 m and reducing the surface albedo to 0.15. The two experiments employ three

收稿日期 2005-09-27, 2006-02-09 收修定稿

资助项目 科技部基础条件平台项目 2003DIB4J145, 城市气象科学研究基金 UMR200504, 广州市攻关项目 2005Z3-E0061, 灾害天气国家重点实验室开放课题

作者简介 蒙伟光, 男, 1962 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向: 中尺度气象的数值模拟和预报, 陆-气相互作用。

E-mail: wgmeng@grmc.gov.cn

fixed grids with spacing of 36, 12, 2 km respectively. The outer two grids are set as a two-way run, and the 2 km grid is nested within the 12 km domain by using a one-way run. The initial and boundary conditions are provided by the NCEP FNL analysis and include assimilation of the upper air and surface observations. Both simulations are initialized at 0800 LST on 11 August 2004 and run for 24 h through the course of the convective event. Model results from the 2 km domain are compared with observations.

The comparison experiments show that the development and evolution of the simulated thunderstorm are sensitive to local urban land use changes. By using the new land use dataset and coupling with Noah LSM, the MM5 modeling systems more successfully capture the characteristics of storm evolution. The simulation results show that Expt 2 works reasonably well in developing an urban heat island (UHI) over Guangzhou city and convection that is enhancing on the west bank of Pearl River estuary, the downwind side of the main urban areas. The UHI firstly appears over Guangzhou city at noon and then intensifies when it advects downwind of the main city areas. It is the enhanced low-level heating that made the urban atmosphere more unstable and favorable for the convection. Surface convergence enhanced by urban roughness also plays an important role in initiating the severe storm. Analysis reveals that except for the low-level outflows from the former convection storm, convergent flows produced by the urban roughness also contribute to the enhancement of convergence around the urban areas. The urban induced convergence firstly forms on the upwind side of the Guangzhou city, mainly located below 500 m, and then intensifies on the urban downwind side, which produces the sufficient vertical motion to initiate new convections in front of the original storm. As a result, convections on the downwind side of the urban areas are enhanced.

Key words thunderstorm, urbanization impact, numerical simulation

1 引言

下垫面非均匀性,特别是城市下垫面非均匀性对天气的影响已越来越受到人们的重视。不少观测研究表明,城市的发展可以改变城市区及其周边地区的天气和气候现象^[1, 2]。就现有的研究结果来说,人们已认同了这样的观点,由于城市化发展而引起的城区及周边地区降水和对流发展的变化很可能是由以下的一个或几个因素共同影响造成的:(1) 低层加热增强引起的大气不稳定性;(2) 低层粗糙度增大引起的辐合增强;(3) 凝结核增多引起的大气微物理过程和动力过程的改变;(4) 除此之外,城市化发展引起的低层水分含量的改变也逐步引起了人们的关注。近年来,随着高分辨率数值模式的发展,国外已有不少工作应用三维的中尺度数值模式或云模式对城市效应引起的低层辐合和对流的发展进行了模拟,并就这些因素可能引起的城区对流增强的问题进行了探讨,取得了不少的研究成果^[3~6]。

目前,这方面工作所采用的研究方法主要有两种,一种是采用较简单的、通过修改模式现有陆面过程中有关城市区的反射率、粗糙度、土壤热力性质以及蒸发率等来反映城市的作用。另一种方法是在模式中另外耦合一个城市冠层模式,不仅考虑了城

市建筑物、道路的几何分布,还描述了城市冠层截取的辐射量及其引起的风切变的影响等等。Rozoff 等^[4]和 Liu 等^[5]的工作采用第一种方法,通过改变陆面过程模式中城市土地利用类型有关的参数来描述城市的效应,研究了城市化与对流发展的关系问题,所取得的成果是令人鼓舞的。国内,近年来对非均匀下垫面包括城市下垫面的影响问题也给予了足够的重视^[7, 8],在城市边界层观测、模式发展和城市冠层参数化研究方面已取得一些研究成果^[9~11]。

本研究工作应用中尺度数值模式 MM5V 3.6 及其耦合的陆面过程模式 Noah LSM,采用类似于前述的第一种方法和更加真实的地表面资料,对 2004 年 8 月 11 日发生在珠江三角洲地区的一次强雷暴过程进行了高分辨的数值模拟,特别探讨了雷暴移经城市群区的增强过程及其物理机制,试图了解珠江三角洲城市群发展可能对雷暴天气带来的影响。

2 模式的设置和数值试验设计

MM5 模式是一个非静力平衡的模式,可用于高分辨率的数值模拟研究。它包含有各种复杂和先进的物理过程方案,特别是陆面过程方案 Noah LSM 的引进,为我们应用这一模式系统研究城市

下垫面对大气的影晌问题提供了方便。Noah LSM 是广泛应用于陆面过程研究的 OSU (Oregon State University) LSM 的改进^[12]。它包含一个较简单的植被冠层模式、一个 4 层的土壤模式以及地表径流方案等,对陆面的水循环过程、植被对降水的截留、植被的蒸发与蒸腾、土壤水分在土壤内的扩散与流动等都进行了比较仔细的处理,可模拟和预报土壤湿度、土壤温度、地表温度、积雪厚度、冠层水含量、地表径流以及和地表能量和水分平衡过程密切相关的地表感热、潜热通量等等。对于城市下垫面的影响来说,目前模式中主要是通过减小叶面指数、植被覆盖率,增大城区地表面的反射率、地表粗糙度以及城区土壤的热容量和热传导率等参数反映出来。

为了反映城市群发展的影响,模拟区域中需要较真实地反映地表特征,特别是城市土地利用的情况。利用可获得的有关广东省土地利用类型的地理信息系统 (GIS) 数据资料,我们将其引入模式中。与原有的基于 1993 年美国 USGS (United States Geological Survey) 提供的 1 km 分辨率的土地利用类型资料 (图 1a) 比较,可以发现两者有很大的差别,新的资料表明珠江三角洲的城市建设有很大发展,如广州、佛山、珠江口东侧的东莞、深圳等城区 (土地利用类型为 1 的红色区域) 面积扩大很明显 (图 1b),新资料可以更准确地反映珠江三角洲城市化发展引起的土地利用类型的变化。

研究中模式设置为三重套网格 (图略),其中最外的粗网格 D01 格距为 36 km,区域中心位置位于 (23.5°N, 113.0°E),范围大小有 181×142 个水平格点,中间网格 D02 的格距为 12 km,水平格点 151×121;细网格 D03 格距设置为 2 km,193×163 个格点;模式在垂直方向上分为 27 层。积分过程中,D01 和 D02 设置为双向运行,而 D02 与 D03 之间为单向运行,D03 的初、边值条件由 D02 的运行结果插值到网格上得到。

为了考查数值模式对雷暴系统的模拟性能以及城市化的影响,设计了 2 个不同的试验方案。试验 1 (Expt 1) 应用的是模式原有的地表特征资料,没有耦合 Noah LSM 模式,而是采用了一个较简单的 5 层土壤模式^[13],仅对土壤温度进行预报。而试验 2 (Expt 2) 则耦合有陆面模式 Noah LSM,并应用了新的土地利用类型资料。两个试验采用的边界条

件均由 NCEP 1°×1°的 FNL (Final Analysis) 资料提供,试验 2 所需要的土壤层资料也是来自 FNL 资料。2 个试验的初始条件均利用模式系统的三维变分系统 (3DVAR) 由大模式提供的背景场和可获得的地面和高空常规观测资料经同化分析后得到。模式采用的物理过程包括:Reisner 的显式降水方案 (Mixed-Phase)、Betts Miller 积云降水方案、MRF 边界层方案等。D03 的运行除了不考虑积云降水的参数化之外,其他的设置与其相应粗网格试验相同。另外,需要提及的是模式中关于城市的参数仍保留为原模式的设计值,城市的粗糙度为 0.8 m,城区地表面的反射率为 0.15。文中对模拟结果的讨论均是针对 D03 的结果进行。

3 2004 年 8 月 11 日的强雷暴过程和模拟概况

由于城市发展的影响,珠江三角洲地区雷暴雨活动有增强的趋势。近年来,受连续多日高温影响后在城市区出现的强对流天气的增强现象并不少见。如 2004 年 08 月 11 日午后发生在珠江三角洲地区的雷暴天气就是在当地连续 4 天发布了高温预警信号后出现的这样一次过程。又如 2005 年 8 月 7 日广州午后出现的强雷暴天气,也是在连续多日出现高温异常现象后发生的,根据当地气象部门的纪录,在这一次雷暴天气过程中,仅广州市 2 小时内测得的地闪总数就超过了 2000 次。因此,城市发展对雷暴天气的影响值得注意。本文主要针对 2004 年 8 月 11 日的雷暴过程进行研究。

3.1 卫星和雷达观测到的雷暴系统的演变

2004 年 8 月 11 日,由于受热带气旋“云娜”外围气流的影响,华南大部分地区高温炎热,大气极不稳定。从天气形势上看,珠江三角洲一带气流比较弱,初始的雷暴云团形成于一条近于南北向的辐合线中 (图略),并逐渐向西南方向移动。受其影响广东省东部、西北部、中部,尤其是珠江口附近地区 11 日午后爆发了强雷暴天气。根据当地气象部门的记录,珠江三角洲地区的广州、东莞等均出现 8 级以上雷雨大风、冰雹等强对流天气,广州的番禺区还出现了强的龙卷风,持续的强风造成了人员伤亡和财产损失。图 2 是卫星云图显示的雷暴云团在 11 日 14 时 (北京时,下同) 左右的发展情况。可以看到对流云团在热带气旋“云娜”西面的珠江三

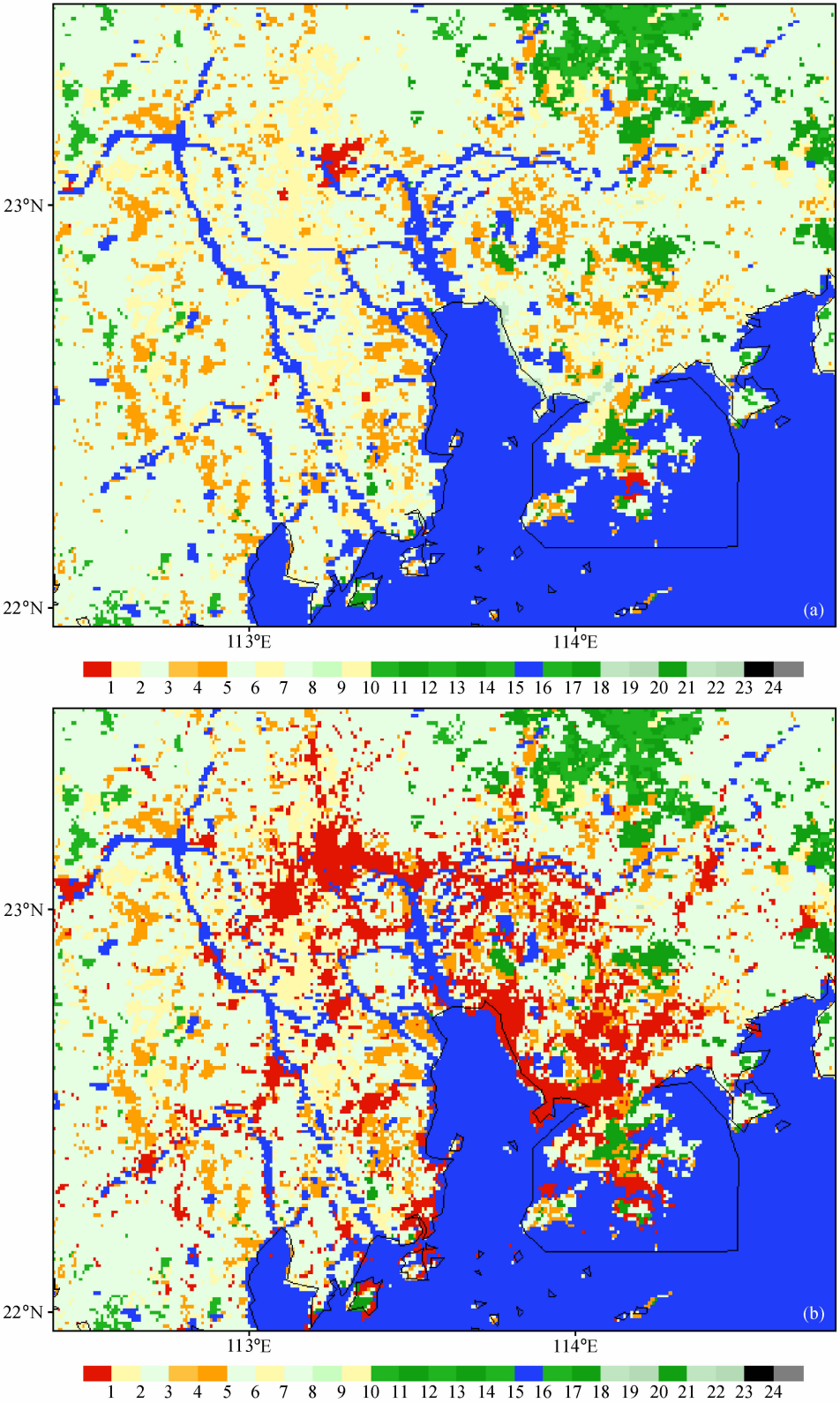


图 1 珠江三角洲地区的城市化发展 (城市区用红色表示): (a) 基于 USGS 的土地利用类型; (b) 基于广东省 GIS 数据的土地利用类型

Fig. 1 Urbanizations over the Pearl River Delta region (Urban landuse is indicated by red areas): (a) Landuse map based on the 1 km resolution USGS 24-category; (b) landuse map based on local GIS dataset

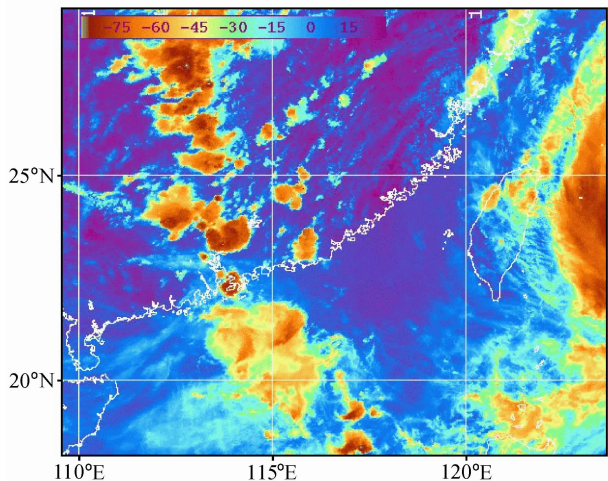


图 2 2004 年 11 日 14 时的卫星云图

Fig. 2 Satellite image at 1400 LST 11 Aug 2004

角洲及其以北地区形成。雷暴系统的演变可以从图 3 给出的广州雷达的回波图看到,在其发展过程中,由于受环境气流的影响,系统从珠江三角洲的东北部向西南方向移动,从 14 时开始广州附近已有回波出现(图 3a),16 时(图 3b)城区一带雷达回波强度增强,特别是在随后的 1~2 小时中,在城市的下风方向,当雷暴系统移经珠江三角洲一带的城市群之后,系统发展得更强,珠江口西岸一带 30 dBZ 以上回波强度的范围更大了,其前缘不乏大于 40 dBZ 的强对流回波。图 3c 给出的是 18 时的回波情况。

降水和雷暴活动在城市下风方向增强的现象,在过去的研究中已受到人们的关注。已有的数据表明,城市区及其下风方的年降水总量可比周围农村地区高 10%~17%,其中雷暴的增加可达到 21%^[14]。这有可能是由于城市和郊区之间加热和冷却差异造成的局地环流,以及城市建筑,特别是高层建筑导致的地面粗糙度增大而产生的机械湍流,有利于对流形成和增强等原因造成的。本次雷暴过程所表现出来的特征为我们对这一问题开展研究提供了一个例子。

3.2 数值模拟结果概况

试验中模式均从 2004 年 8 月 11 日 08 时开始积分,到次日 08 时结束。其结果表明,尽管两个试验都模拟出了雷暴系统的发展和演变过程,但所模拟的系统的发展演变情况不完全相同。由于试验 2 中应用了新的土地利用类型资料,能够更加真实

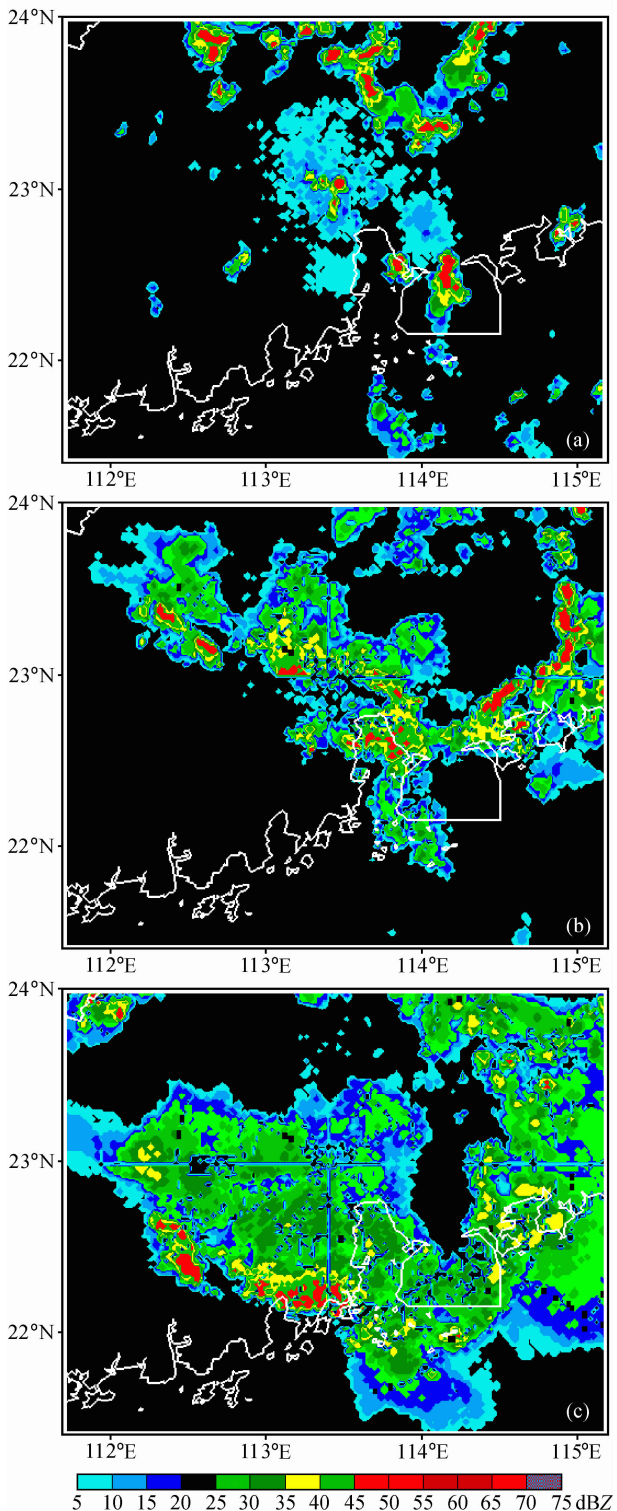


图 3 广州雷达观测到的 2004 年 08 月 11 日的雷达回波(单位: dBZ): (a) 14 时; (b) 16 时; (c) 18 时

Fig. 3 Radar reflectivity (dBZ) images based on Guangzhou radar observation on 11 Aug 2004: (a) 1400 LST; (b) 1600 LST; (c) 1800 LST

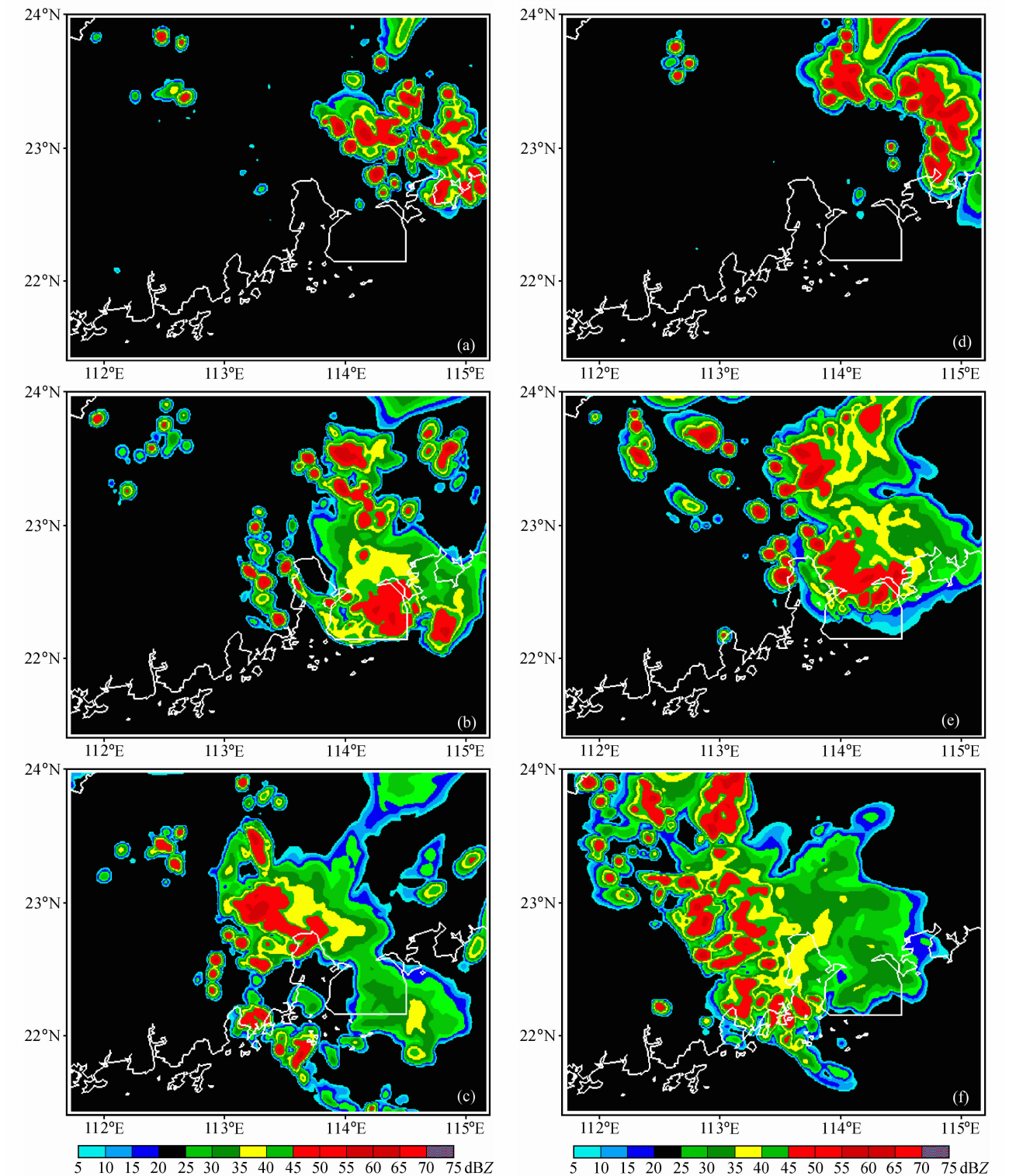


图 4 不同试验结果反算得到的 2004 年 8 月 11 日 14 时 (a、d)、16 时 (b、e)、18 时 (c、f) 的雷达合成回波强度图 (单位: dBZ): (a、b、c) 试验 1; (d、e、f) 试验 2

Fig. 4 Composite radar reflectivity (dBZ) images at 1400 LST (a, d), 1600 LST (b, e), 1800 LST (c, f) 11 Aug 2004 in Expt 1 (a, b, c) and Expt 2 (d, e, f)

地描述珠江三角洲地区城市化的发展情况,而且耦合的陆面过程模式可以更加合理地模拟地表面的能量平衡过程,因此,试验 2 的模拟结果比试验 1 的结果有较好的改进。图 4 是由 D03 区域不同模拟试验结果反算得到的 11 日 14 时、16 时、18 时的雷达合成回波强度。可以看到,尽管试验 1 和试验 2 都模拟出了雷暴系统的初始发展过程,但随着系统向西南方向移动和发展,试验 1 模拟的合成雷达回波在 16 时移过珠江口以后,其加强的程度不及试验 2 (图 4c、f)。虽然反算的回波强度偏强(可达 50 dBZ 以上),试验 2 对雷暴系统移经珠江三角洲地区时的增强过程模拟得更加合理,特别是在珠江口西岸、城市下风方向的增强过程,模拟合成雷达回波的分布和强度变化特征与实际观测结果(图 3c)更加相似,均表现为西北—东南走向的强回波带,强的对流回波也是位于系统的前缘。

4 雷暴系统的发展过程和城市的可能影响

利用试验 1 和试验 2 两个试验的结果并结合观测事实,以下我们对雷暴系统的发展过程和城市的可能影响作进一步的分析。

4.1 站点资料的比较

图 5 分别给出了由试验 1 和试验 2 模拟的广州城区和天河自动气象站[G1001 (23.08°N, 113.19°E)]观测到的地面气压、温度、以及相对湿度随时间的变化情况。从图 5 上可以看到,实际观测的雷暴系统在 14 时以后开始影响广州,随着雷暴系统的逼近和影响,气压、气温和相对湿度的变化都显示出了雷暴过境的特征,如气压的涌升、温度的迅速下降都很明显。

两个试验都模拟出了这些要素的变化特征,但试验 2 模拟的结果从总的变化趋势上与实际观测比较更加相似和合理。如从气温变化看,观测和试验 2 模拟的气温都在中午以后上升到最高,达到 38℃ 以上,并在 14 时后开始下降,最低时均下降到了 26℃ 左右,只是模拟温度的迅速下降比观测的结果要晚,滞后 1~2 小时,而且模拟的地面温度在雷暴影响前偏高 1~2℃。与试验 2 不同,试验 1 模拟的中午时刻的最高温度只达到 36℃ 左右,与实际观测和试验 2 的结果相比偏低了 2℃ 以上。两个试验对相对湿度的模拟也有类似的差别,试验 2 对相对

湿度的模拟结果与实际观测比较更加相似。如雷暴开始影响前,两者都有一个湿度下降的过程,之后近地面的相对湿度迅速上升,均从 40% 左右上升到近 90%。而试验 1 对相对湿度的模拟明显偏高,雷暴影响前模拟的相对湿度都在 50% 以上,比实际观测和试验 2 的结果高了约 10%。而两个试验对地面气压的模拟结果相差不大,都模拟出了雷暴过境前后,气压的下降和回升过程。但相对与对温度和相对湿度的模拟结果来说,模式对气压的模拟偏差要大一些,主要是模拟的气压均偏高。

总的来说,对以上几个气象要素的分析表明,与试验 1 结果相比,试验 2 对本次雷暴过程的模拟更加成功。比较分析这两个试验的结果,可以进一步分析城市的效应。

4.2 城市效应对流的发展过程

4.2.1 “城市热岛”特征

“城市热岛”可以通过比较城市区与城郊不同站点的资料来粗略表示。图 6 为观测资料 and 不同试验给出的关于城区和郊区在不同时间的温度对比。城区的温度仍选取位于广州市天河区的自动气象站 G1001 为代表,郊区的温度则用位于增城区的自动气象站 G1022 (23.28°N, 113.62°E) 为代表。观测资料表明,城市与郊区的温差还是很明显的,说明“城市热岛”是存在的。这种差别在中午 13 时左右达到最强,城区地面温度达到 38℃ 以上,城市与郊区的温差达到 +3℃ 左右(图 6a)。随着雷暴过境,温度下降的特征两者是相似的,温度均下降到 26℃ 左右,并维持相似的温度约 1 个多小时,之后,特别在夜间,城区的温度又比郊区的温度高出约 2℃。试验 2 较好地模拟出温度的这种变化特征(如图 6b),模拟的城市与郊区之间的温差也在中午 13 时左右达到最强,城区地面温度也超过了 38℃,只是夜间的模拟效果要差一些,城区与郊区的温度差别较小,与实际观测结果不完全相符。当然温度的这种变化可能与日变化有关,但从后面的分析我们还可以看到,高温区首先在城区上空出现,可以间接地证明热岛是存在的。

比较试验 2 和试验 1 的结果可以证实,热岛强度与城市下垫面的特征密切相关。图 6b 中还给出了试验 1 模拟的城区温度的变化情况,与试验 2 的结果相比两者在雷暴影响之前差别较大,相差最大时在中午左右可达到 3℃ 以上,试验 1 模拟的城区

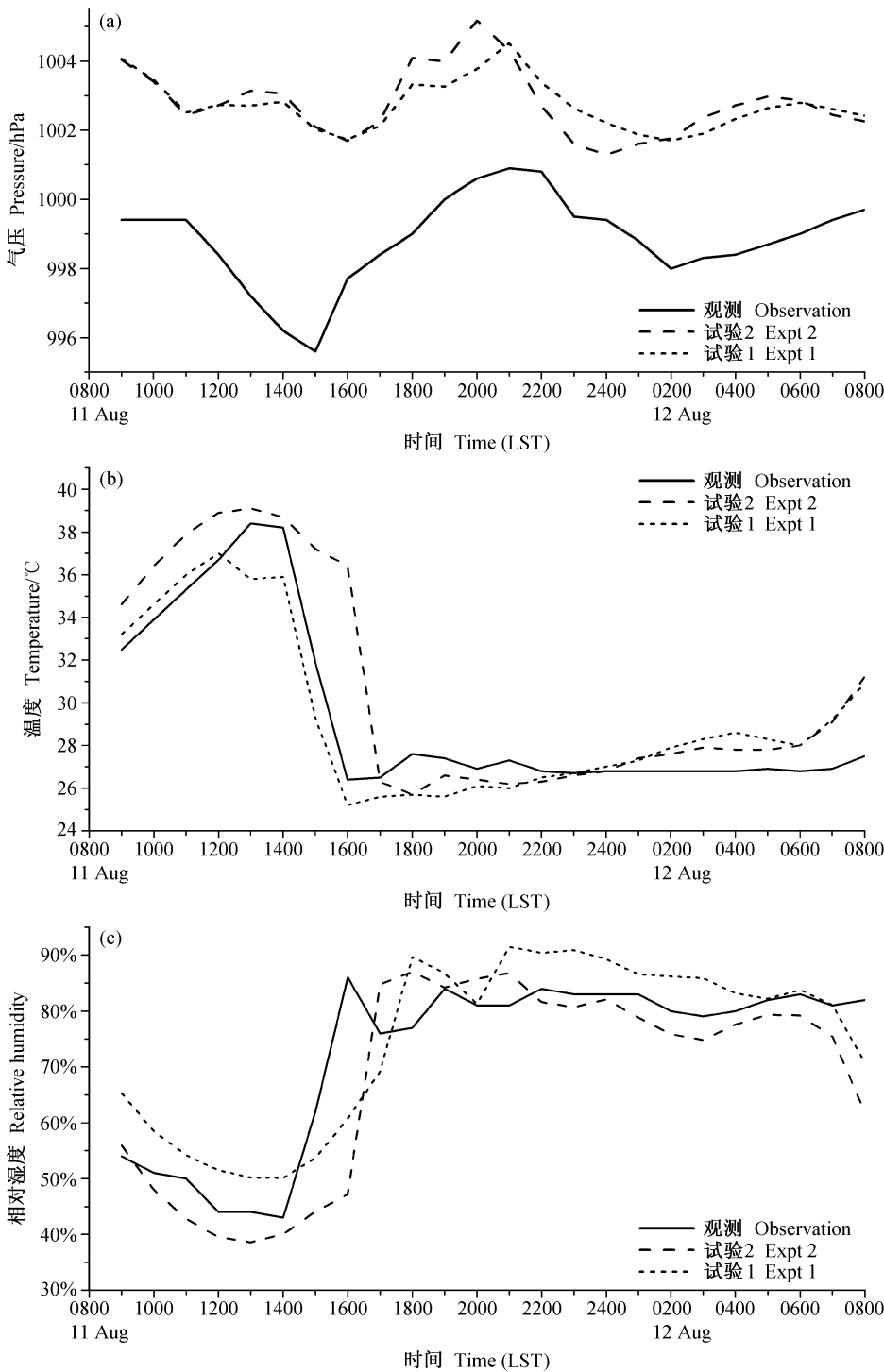


图 5 不同试验模拟结果与实际观测的站点资料比较：(a) 气压；(b) 温度；(c) 相对湿度

Fig. 5 Site comparisons between different experiments and observations: (a) Pressure; (b) temperature; (c) relative humidity

地面温度明显偏低，与试验 2 中郊区的温度变化更加相似，午后的地面最高温度没有超过 36℃。

热岛形成之后，我们发现其范围和位置会随时间发生变化。图 7 给出了 12 时～15 时，由试验 2

模式第一层（约 50 m 高）资料表示的“城市热岛”和风场的演变情况。“城市热岛”12 时后首先在广州附近城区上空出现，开始时范围较小；但在随后的几个时次，热岛的强度逐渐增强，而且除了广州

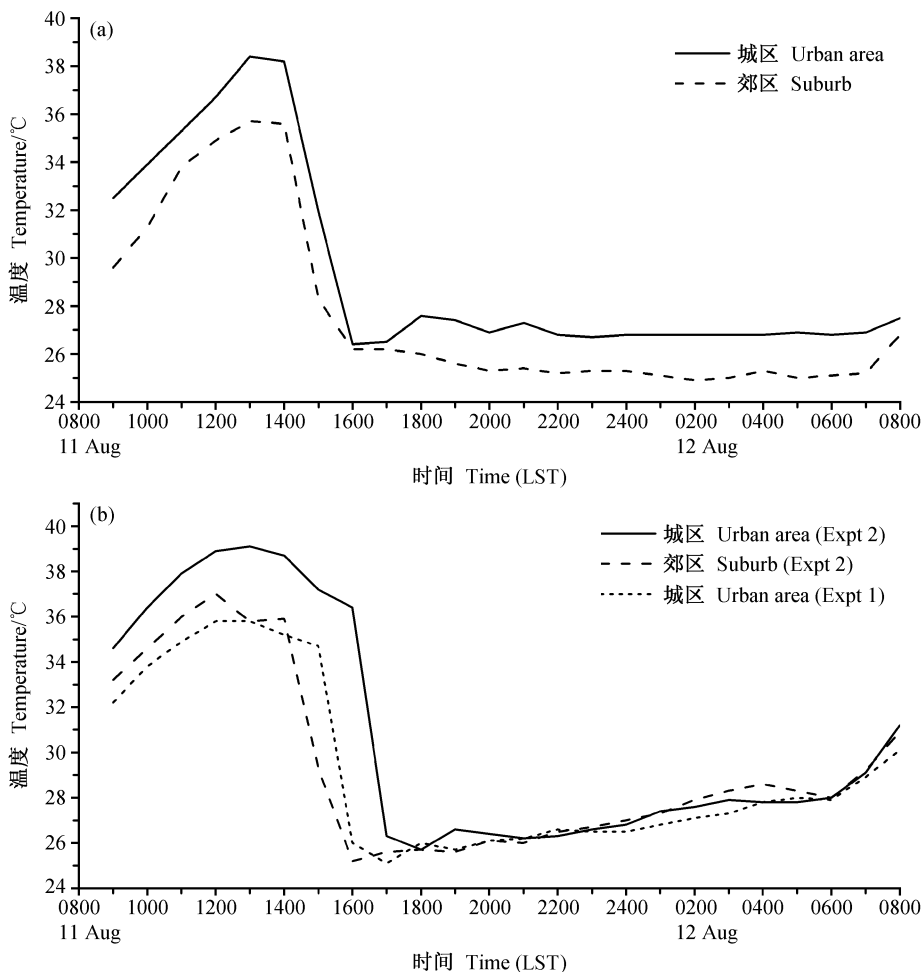


图 6 “城市热岛”特征: (a) 观测的城区和郊区的温度比较; (b) 模拟的城区和郊区的温度比较

Fig. 6 Urban heat island characteristics; (a) Observation comparison between urban area and suburb; (b) simulation comparison between urban area and suburb

城区上空之外,其东南部的东莞、深圳等城区上空也出现了暖的中心。但可以看到这两个城区上空的热岛特征并不明显,可能与这一带海风的调节有关,如从图 7b 中可以看到,珠江口及其东部地区海风盛行。有趣的是,尽管珠江口西岸城市化的程度不及东侧,但在 13 时之后,这一地区上空也有暖中心的形成,而且范围还比较大,表现为广州城区上空暖区的向南扩展。如图 7c、d 表明,到了午后的 14、15 时,除了广州城区上空之外,其南边珠江口以西一带热岛的特征也很明显,35°C 以上的高温区由广州城区上空一直向南伸展到沿海一带。这一现象引起了我们的关注,有可能与雷暴移经过珠江口后的增强过程有关联。

过去有研究表明,当热岛出现后,如果风速较小,热岛可以随盛行气流移向下风方向^[15]。这一

现象可能正是在这种情况下发生的。从模拟的结果看,中午以后的几个时次,近地面层的风速都比较小,热岛范围的向南扩展可能是弱偏北气流引导热空气向南移动造成的。值得指出的是,模拟的 35°C 高温区离海岸总是有一段距离,从另一角度也说明海风对于这一地区“城市热岛”的形成和演变是有影响的。可以推测,雷暴移经珠江口后强度的变化与热岛的这种向南移动特征有关。因为热岛的形成、地表面温度的升高,可以影响到地面以上的温度和湿度层结,从而也影响到了气层不稳定能量的积聚。

从低层(模式第一层)湿度场看,与热岛相对应的区域范围,比湿相对都较小,也就是说城市的效应使低层空气变干了(图略)。在这种情况下,一般来说,尽管热岛效应引起了城区地面温度的升

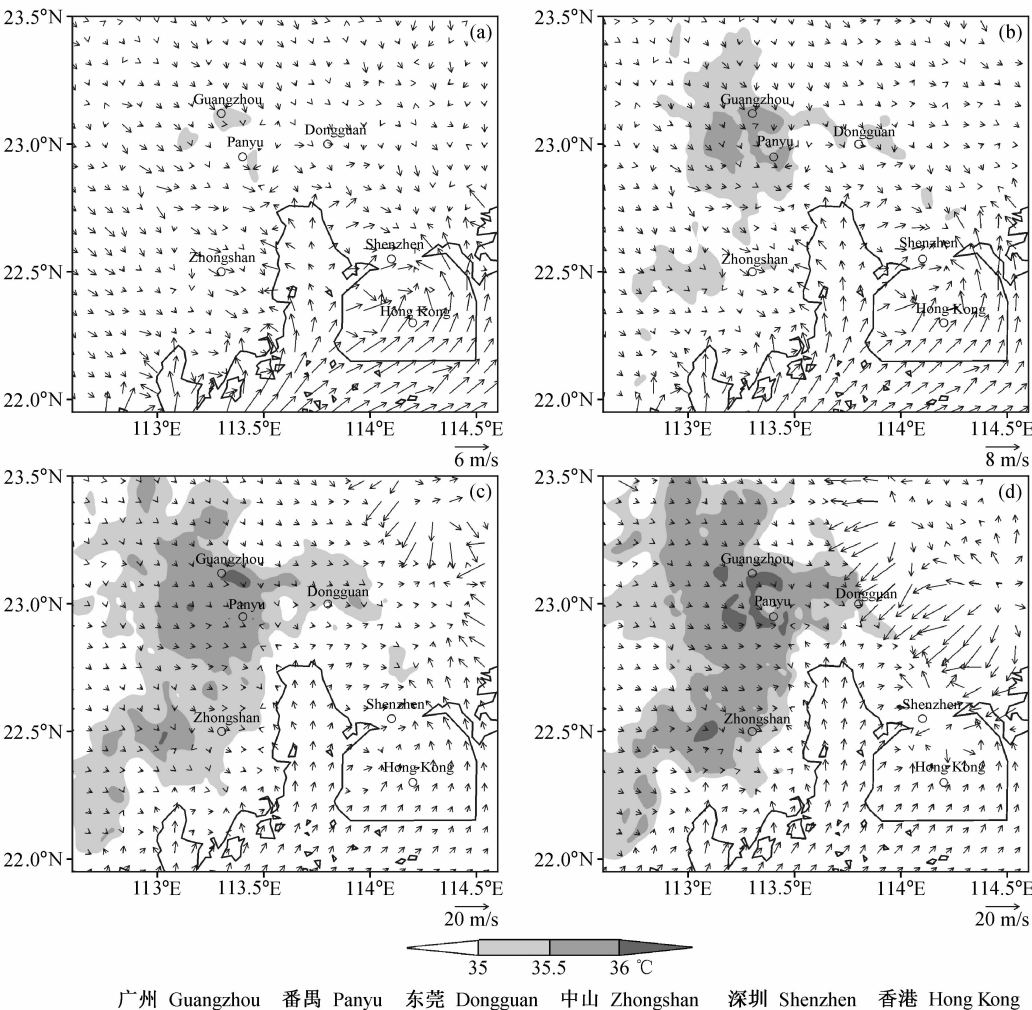


图 7 2004 年 8 月 11 日由试验 2 模式第一层 (50 m) 给出的“城市热岛”和风场的演变特征：(a) 12 时；(b) 13 时；(c) 14 时；(d) 15 时。阴影为温度大于 35℃ 的区域。图中还给出了主要城市的位置

Fig. 7 Evolution of the first model level (50 m) heat island and wind field on 11 Aug 2004 in Expt 2: (a) 1200 LST; (b) 1300 LST; (c) 1400 LST; (d) 1500 LST. Shaded areas are temperature $\geq 35^{\circ}\text{C}$. Locations of main cities also are presented

高,但由于城区湿度的减少,最终会导致对流有效位能(CAPE)的减少。但由模拟结果计算得到的广州城区下风方向的番禺站(23.00°N, 113.40°E)上空的CAPE值来看,在雷暴影响之前的几个时次,试验2的结果均比试验1的结果高(见表1),前者多在1600 J/kg以上,而后者均在1600 J/kg以下,最大时两者相差可达到300 J/kg以上。仔细分析发现,热岛中局部地方CAPE值的增大还与低层强的气流辐合有关,强的辐合可导致水汽的集中,并引起湿度增大。如在16时前,试验2中番禺站低层(900 hPa附近)的辐合量最大达到了一 $60.0\times10^{-4}\text{s}^{-1}$ 以上,而相应试验1中的值仅为一 $30.0\times10^{-4}\text{s}^{-1}$ 左右,由此造成的低层露点温度的

增大最强时到达了 0.8°C 以上。这种在热岛中心区CAPE值的增大现象在一些研究中也发现,如Rozoff等^[4]的工作也表明,热岛中心区可有例外的CAPE值增大现象,是由于低层强的气流辐合和由此造成的水汽辐合引起的。

正是由于具有了更高的不稳定能量,在有利条件的触发下,试验2模拟的雷暴强度发展得更强。从下一节的分析我们还可以看到,低层强的气流辐合很大程度是由于城区地表粗糙度增大引起的。

4.2.2 低层辐合和对流发展过程

图8给出了试验2在15时和16时两个时次经过广州城区沿23.20°N东西向的垂直环流以及散度场的纬向剖面图。可以清楚地看到,15时,雷暴

表 1 不同试验 2004 年 8 月 11 日番禺站 (23.00°N, 113.40°E) 上空 CAPE 值和模式第一层温度 (T) 及露点 (T_d) 的变化
Table 1 Variations of CAPE (Convective Available Potential Energy), the first model level temperature (T) and dew point temperature (T_d) at Panyu station (23.00°N, 113.40°E) on 11 Aug 2004 for different experiments

试验 Expt	要素 Element	时间 Time (LST)						
		1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Expt 1	CAPE/J · kg ⁻¹	1566	1433	1473	1559	1525	672	0
	T /°C	34.6	35.4	32.6	31.2	28.3	24.7	25.5
	T_d /°C	22.4	22.1	21.9	21.6	21.4	24.2	23.5
Expt 2	CAPE/J · kg ⁻¹	1844	1799	1722	1616	1582	73	53
	T /°C	34.7	35.9	35.8	35.7	30.1	24.5	24.9
	T_d /°C	22.8	22.9	22.6	22.3	21.5	23.6	23.5

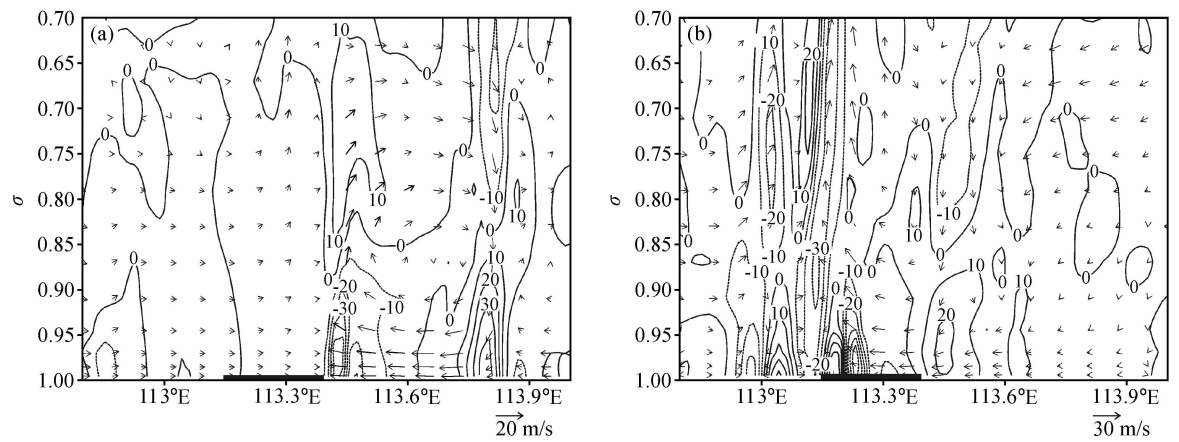


图 8 2004 年 8 月 11 日试验 2 经过广州市城区 (由粗黑线表示) 沿 23.20°N 散度 (单位: 10^{-4} s^{-1}) 和东西向环流 (箭头矢量) 的纬向剖面图: (a) 15 时; (b) 16 时
Fig. 8 Vertical cross section of divergence (10^{-4} s^{-1}) and winds (arrows) over Guangzhou city (thick solid line) along 23.20°N in Expt 2 at (a) 1500 LST and (b) 1600 LST 11 Aug 2004

系统仍位于城区东面的上风方向, 系统内气流的下沉和在低层的向外流出很明显, 前缘已达广州城区的东侧, 并在 $\sigma = 0.85$ 层面 (约 1000 m) 以下的低层形成了辐合区, 强的辐合中心位于 500 m 以下的近地面层。16 时, 低层的主要辐合区移经广州并到达城区的下风一侧, 而且中心强度也由原来的 $40.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 增大到 $50.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以上, 尤其应注意到的是强辐合中心也是位于近地面层。低层辐合中心的这些变化特征, 可以认为与城市区粗糙度的增大是有直接联系的。从图中还可以看到, 低层的这种辐合引起了强的上升运动, 这对于新的对流单体的启动和发展很有帮助。

由于本个例的雷暴系统是在城市区的上风方向形成, 然后由东北方向向西南方向移动经过城市区的, 雷暴系统本身的下沉向外流出对系统前方新对流单体的形成和发展可能也有很大作用, 从中区分

城市的这种影响有一定的困难。如从图 7 给出的低层风场演变也可以看到城市区对流发展和增强过程与这种下沉向外流出气流的密切联系。从 14 时开始, 已经可以看到雷暴系统的向外流出 (图 7c)。这是由于降水出现后, 由降水质点拖曳作用产生下沉运动并到达地面后形成的。15 时, 模拟的下沉向外流出在雷暴前缘形成了一条很强的阵风锋, 温度对比非常大, 风场辐合也很强 (图 7d)。当这一强的辐合线移近城市区时, 由于此时的“城市热岛”效应, 热岛上空的气层已表现得相当不稳定, 加上城区的粗糙度可进一步增强低层辐合, 新的对流单体很容易触发形成, 雷暴系统移经城市区后的增强过程很可能是在这样的一种过程中完成的。

相应图 8 的两个时次, 图 9 给出了由试验 2 与试验 1 近地面风场差的分布情况, 阴影区表示珠江三角洲的城市群区。两者的风场差有这样的几个特

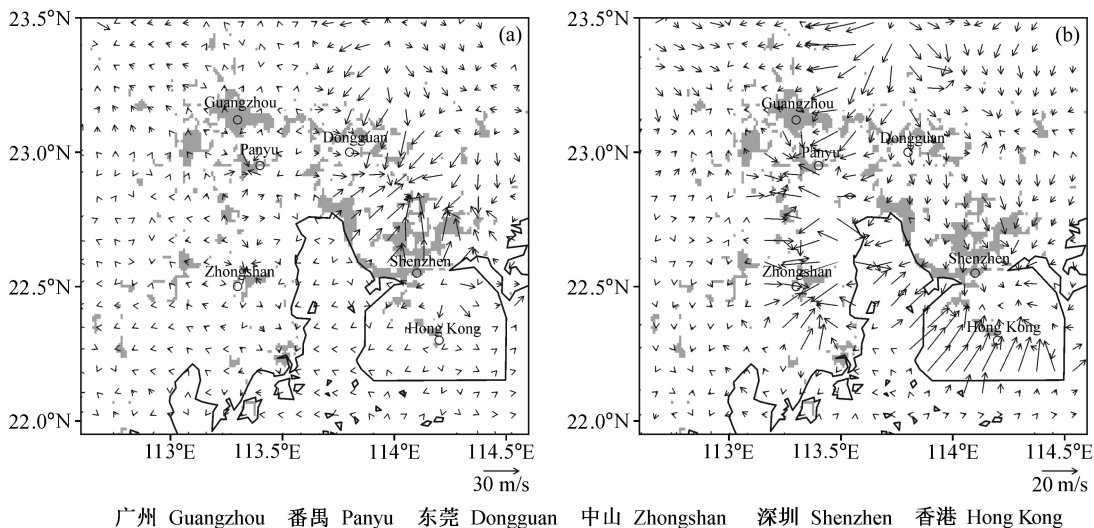


图9 2004年8月11日试验2和试验1之间模式第一层(50 m)的风场差:(a) 15时;(b) 16时。阴影区为珠江三角洲城市区
Fig.9 Difference of wind fields on the first model level (50 m) between Expt 2 and Expt 1 at (a) 1500 LST and (b) 1600 LST 11 Aug 2004. Urban areas over the Pearl River Delta are shaded

征: 15 时, 风场差在东莞 (23.0°N, 113.8°E)、深圳 (22.5°N, 114.1°E) 一带表现为明显的辐合; 16 时, 在珠江口西面从广州一直向南到中山 (22.5°N, 113.3°E) 一带风场差表现为一条明显的辐合线; 除此之外, 珠江口到香港一带也有一条明显的辐合线。从两个试验本身的设计看, 风场差的这种分布特征一定程度上也可以说是由于城市效应引起的。特别是对于位于珠江口东西两侧的辐合中心(线)更是如此。当然影响雷暴发展和增强的原因可能还有其他复杂的因素, 如前面提到的海风, 对于珠江三角洲这一特殊的地理位置来说, 可能在雷暴发展的过程中也起到重要的作用。图 9 中从珠江口到香港一带的辐合线显然是两个试验对海风和雷暴系统向外流出气流模拟结果的差别引起的, 海风对于珠江三角洲一带“城市热岛”的调节及其对沿海对流发展的影响问题还都有待于今后更进一步的研究。

5 总结和讨论

通过对 2004 年 8 月 11 日午后发生在珠江三角洲地区的一次强雷暴天气的高分辨数值模拟, 本文研究了城市化发展可能对雷暴发展的影响问题, 主要考察了与城市土地利用类型改变相关的“城市热岛”的形成和演变特征, 城区粗糙度增大可能引起的低层辐合的增强过程, 及其与雷暴发展强度变化

的关系。

比较不同试验的结果表明: 模拟的雷暴发展和演变过程与这一地区城市化的发展有密切的联系。应用 NCEP 的 FNL (Final Analysis) 资料作为背景场和边界条件, 并在模式中引进了更加真实的关于珠江三角洲地区的土地利用类型资料之后, 耦合了陆面过程模式 Noah LSM 的 MM5 模式可以更加成功地模拟出强雷暴天气的发展和演变过程, 模拟的雷达回波演变特征与实际观测结果相似, 对雷暴过境时站点资料演变特征的模拟也相当成功。

雷暴是在有利的环境背景条件下发生的, 珠江三角洲一带“城市热岛”的形成及其演变对雷暴发展强度的变化起到了重要作用。模拟的结果表明: “城市热岛”在中午 12 时开始形成于广州城区的上空, 之后在盛行气流的引导下向南移动和扩展。雷暴影响之前, 除了广州城区上空之外, 其南边珠江口以西一带热岛的特征也很明显, 热岛范围由广州城区上空一直向南伸展到沿海一带。而由于热岛的效应, 气层表现得更加不稳定, 雷暴系统移经城市区后的增强过程与热岛的这种演变特征应该有联系。

除了“城市热岛”效应之外, 城区粗糙度增大引起的低层辐合增强可能在雷暴发展和演变的过程中也起到了作用。模拟的与城市影响有关的低层辐合主要位于 500 m 以下的近地面层, 并引起了强的

上升运动,这对于新的对流的启动和发展无疑有很大的帮助。但也应该看到,模式中还包括有很多其他的相互作用过程,要从模拟结果中区分出城市粗糙度增大而引起的低层辐合增强还是很困难的。

应用数值模拟的方法研究城市效应对雷暴天气的影响问题,还有许多问题要解决。随着模式分辨率的提高,如何更加准确地描述地表面的特征和作用、更加精确地评估下垫面对对流的强迫作用是十分必要的。本研究仅仅是在 MM5 及其耦合的陆面模式 Noah LSM 和原有参数的基础上开展的一项工作,所有关于城市的参数对于模式区域中不同城市化程度的城市区都是一样的,而且随着模式分辨率的提高,这些参数需要如何改变仍有待进一步开展研究。

参考文献 (References)

- [1] Balling R, Brazel S. Recent changes in Phoenix summertime diurnal precipitation patterns. *Theor. Appl. Climatol.*, 1987, **38**: 50~54
- [2] Baik J J, Kim Y H, Chun H Y. Dry and moist convection forced by an urban heat island. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**: 1462~1475
- [3] Craig K J, Bornstein R D. MM5 simulations of urban induced convective precipitation over Atlanta. Preprints Fourth Symp. on the Urban Environment, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 2002, 5~6
- [4] Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J. Appl. Meteor.*, 2003, **42**: 716~738
- [5] Liu Y, Chen F, Warner T, et al. Improvements to surface flux computations in a non-local-mixing PBL scheme, and refinements on urban processes in the NOAH land-surface model with the NCAR/ATEC real-time FDDA and forecast system. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. 11-15 January, 2004, Seattle, Washington
- [6] Kusaka H, Chen F, Bao J W, et al. Simulation of urban heat island effects over the Greater Houston Area with the high resolution WRF/LSM/Urban coupled system. Symposium on "Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone". 1-15 January, 2004, Seattle, Washington
- [7] 刘红年, 刘罡, 蒋维楣, 等. 关于非均匀下垫面大气边界层研究的讨论. 高原气象, 2004, **23** (3): 412~416
- [8] Liu Hongnian, Liu Gang, Jiang Weimei, et al. Discussions about study on the boundary layer meteorology over heterogeneous underlying surface. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (3): 412~416
- [8] 孙继松, 王华, 王令, 等. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用. 大气科学, 2006, **30** (2): 221~234
- [8] Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 221~234
- [9] 卞林根, 程彦杰, 王欣, 等. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究. 应用气象学报, 2002, **13** (特刊): 13~25
- [9] Bian Lin'gen, Cheng Yanjie, Wang Xin, et al. Observational study of wind and temperature profiles of urban boundary layer in Beijing winter. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Special Issue.): 13~25
- [10] 李晓莉, 何金海, 毕宝贵, 等. MM5 模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. 气象学报, 2003, **61** (5): 526~539
- [10] Li Xiaoli, He Jinhai, Bi Baogui, et al. The design of urban canopy parameterization of MM5 and its numerical simulations. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (5): 526~539
- [11] 佟华, 陈仲良, 桑建国. 城市边界层数值模式研究以及在香港地区复杂地形下的应用. 大气科学, 2004, **28** (6): 957~978
- [11] Tong Hua, Chan J C L, Sang Jianguo. A study of the urban boundary layer model and its application in the Hong Kong area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (6): 957~978
- [12] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface - hydrology model with the Penn State - NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 569~585
- [13] Dudhia J. A multi-layer soil temperature model for MM5. Preprints, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, 22-24 July 1996, Boulder, Colorado, 49~50
- [14] Changnon S A Jr., Huff F A, Semonin R G. METROMEX: an investigation of inadvertent weather modification. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1971, **52**: 958~968
- [15] 寿绍文. 中尺度气象学. 北京: 气象出版社, 2003. 370pp
- [15] Shou Shaowen. *Mesoscale Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 370pp