

蒙伟光, 李昊睿, 张艳霞, 等. 2012. 珠三角城市环境对对流降水影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 36 (5): 1063–1076, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.10205. Meng Weiguang, Li Haorui, Zhang Yanxia, et al. 2012. A modeling study of the impacts of Pearl River Delta urban environment on convective precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1063–1076.

珠三角城市环境对对流降水影响的模拟研究

蒙伟光^{1,2} 李昊睿¹ 张艳霞¹ 戴光丰¹ 万齐林¹

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所/中国气象局热带季风重点实验室, 广州 510080

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100010

摘 要 采用具有 2 km 分辨率的中尺度气象模式 WRF 及其耦合的单层城市冠层模式, 以及 Thompson 云微物理方案, 针对广州市附近发生的一次对流风暴过程, 模拟研究了城市环境包括城市地表性质变化、城市空气污染可能引起的云粒子浓度增大现象对对流降水发展的影响问题。结果表明城市地表引起的热岛和干岛效应, 可造成城市边界层高度升高, 有利于城区附近辐合流场形成和不稳定能量增大。模拟结果显示, 城市地表作用可在广州市南北各形成一个对流有效位能 CAPE 增大的辐合区, 模拟对流降水回波起始发展于这些具有高不稳定能量的辐合区, 并与观测雷达回波特征相一致, 反映出城市地表对对流的起始发展及其发生位置有更直接作用。对流发展起来后, 敏感试验反映出高云粒子浓度 (污染) 情形中有更多降水形成, 降水增多可达 20% 以上。诊断分析发现降水增多与对流云中有更多雨水及过冷却云水形成有关系。增多的云水雨水通过相应的由于潜热释放增加引起的强上升运动被传送到较高层次, 引起云中冻结过程及液态水和冰相物质之间的相互作用增强, 从而导致更多冰相物质形成、降落地面降水增多。

关键词 对流降水 城市地表 云粒子浓度 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2012) 05-1063-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.10205

A Modeling Study of the Impacts of Pearl River Delta Urban Environment on Convective Precipitation

MENG Weiguang^{1,2}, LI Haorui¹, ZHANG Yanxia¹, DAI Guangfeng¹, and WAN Qilin¹

1 *Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration (CMA)/ Key Laboratory for Tropical Monsoon, CMA, Guangzhou 510080*

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

Abstract Using a 2-km-resolution WRF model, along with its single-layer urban canopy model and Thompson bulk-parameterization microphysics scheme, numerical simulation of a convective rainstorm is executed over Guangzhou city in the Pear River Delta (PRD) to investigate the impacts of urban environments (including urban land use changes and urban air pollution-enhanced cloud droplet number concentration) on the convective precipitation. Results indicate that urban heat island and dry island effect produced by the land surface can lead to an enhanced urban boundary layer, which is conducive to air confluence and unstable energy increase in the areas near the city. Simulation shows that to the north and south of Guangzhou city, caused by the urban land surface, there exists respectively a convergence zone with enhanced CAPE (Convective Available Potential Energy) values. The simulated radar echoes being initiated within these

收稿日期 2010-11-27, 2012-04-14 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40775068, 公益性行业科研专项 GYHY200706014、GYHY200906026, 灾害天气国家重点实验室开放基金 2009LASW-B03

作者简介 蒙伟光, 男, 1962 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事中尺度气象和数值模拟研究。E-mail: wgmeng@grmc.gov.cn

zones and consistent well with observations reflect that the urban land surface plays a more direct role in convection initiation and development. Once convection develops, sensitive experiments show that enhanced cloud droplet number concentration might lead to more precipitation. In case with high concentration (polluted cases), precipitation is increased by up to 20%. Diagnostic analysis suggests that the increased precipitation results from that more rain water and supercooled cloud water produce in the convective clouds. These rain and cloud water, carried upward by strong upward motion intensified by more latent heat release during this process, can be transported to higher altitudes, where ice formation is enhanced through freezing or through interaction with other already existing ice species, and that finally results in surface precipitation increase.

Key words convective precipitation, urban land surface, cloud droplet number concentration, numerical simulation.

1 引言

城市的发展可影响到城市及其周边的天气,这一现象早已被人们所认知。如早期研究发现,一些城市可造成夏季对流降水在城市区及下游方向增多9%~17% (Changnon, 1968; Landsberg, 1970; Huff and Changnon, 1972)。为了更加地深入理解这一问题,20世纪70年代,美国曾在密苏里州圣路易斯地区开展了METROMEX (Metropolitan Meteorological Experiment Project) 实验专门针对这一问题进行研究,结果也证实了城市这种增雨效应确实存在。研究发现圣路易斯夏季阵雨发生的频率可增多45%,降水的增多主要集中在城市中心区及其下风方50~70 km处,增幅可达到背景值的5%~25% (Changnon et al., 1977)。根据METROMEX实验的研究结果,Changnon et al. (1981) 曾提出三种可能的影响机制用于解释城市的这种增雨效应: (1) 城市热岛及其环流触发引起城市对流降水增强; (2) 城市边界层摩擦辐合引起城市降水增多; (3) 城市空气污染源提供更多的大凝结核增加了城市的降水。过去二三十年,关于城市对降水影响问题的研究更多的是集中在第一和第二种机制,也即城市热力学及动力学效应上。

关于城市的热力学及动力学效应,许多模式敏感性研究结果已证实,城市对流发展及增强过程与城市地表性质改变引起的热力不稳定及低层辐合增强确实有着密切联系 (Hjelmfelt, 1982; Craig and Bornstein, 2002; Vukovich and Dunn, 1978; Thielen et al., 2000; Baik et al., 2001)。尤其是近些年来,通过在模式中引入更为真实城市地表特征资料并针对实际个例所开展的模拟研究工作,更加增进了人们对于城市热力学和动力学效应的认识 (Rozoff et al., 2003; Niyogi et al., 2006)。

相对来说,城市大气污染引起气溶胶增多现象

对于降水可能造成的影响问题,认识却仍不十分明确。Shepherd (2005) 曾指出,尽管有证据表明城市气溶胶对降水有改变作用,但其影响过程及机理仍有许多不确定的地方。在一些城市由于排放的污染空气使CCN (云凝结核) 浓度增大,致使观测到降水减少,这与CCN浓度增大导致云粒子谱变窄并阻止碰并过程发生、抑制暖云发展有关系。但在另外一些城市,由于排放的气溶胶粒径较大,是大凝结核(GCCN)的丰富源区,反而会导致暖云过程增强,从而可为城市及周边地区带来更多降水 (Johnson, 1976; Mather, 1991)。此外,气溶胶还具有所谓的“动力学效应”,也使问题变得复杂化。Khain et al. (2005) 针对气溶胶“动力学效应”进行的研究发现,气溶胶开始时对暖云过程的抑制可延迟云中下沉气流的形成,致使云中大量水滴或小水滴可在云中存在更长时间,从而有更多机会被抬升到更高高度,并通过冻结或与其它冰相物质发生碰并作用,使云中冰化过程及效率提高。并且,由于下沉气流延迟形成以及冰化过程释放潜热的加热作用还可增强上升运动,这都有可能导致降水最终出现增多。

另外,城市地表和城市气溶胶这两个因素对降水的影响哪一个更为主要? 这也是值得研究的问题。应用包括有城市地表复杂过程和气溶胶微物理效应的数值模式, van den Heever and Cotton (2007) 针对一次对流风暴的研究曾发现,相对于气溶胶的影响来说,城市地表引起的下风方向的辐合对对流风暴的发展起到更主要的作用。但同时也指出,一旦对流风暴发展起来后,城市气溶胶增多可对风暴中的动力学、微物理过程以及降水等产生重要影响。模拟的结果表明,降水对于城市气溶胶增多的响应依赖于背景环境中气溶胶的浓度,高气溶胶浓度背景环境中降水的响应相对较弱,而在低气溶胶背景环境中,城市气溶胶增多则可引起强烈响应。

由此也特别强调, 要对这一问题下结论必须十分谨慎, 更多的针对不同环境和不同城市开展相关的研究是必要的。

国内关于城市环境对降水的影响问题已开展不少研究工作(如徐祥德等, 2005; 孙继松等, 2007; 段婧和毛节泰, 2008; 黎伟标等, 2009), 这些工作多数从气候学效应上对城市环境的影响进行了分析和评估。此外, 一些工作还针对城市的影响问题对对流降水真实个例进行了分析和模拟研究(孙继松等, 2006; Meng et al., 2007; 蒙伟光等, 2007)。然而, 关于城市不同环境因素的具体作用及其相对重要性等问题仍不清楚, 尤其是针对特定的城市环境, 仍有必要开展更为广泛的研究。

本文应用耦合有城市冠层模式的 WRF 模式及可事先指定云粒子浓度大小的 Thompson 云微物理方案, 选取 2008 年 6 月 2 日发生在广州市及邻近地区的一次对流风暴过程, 针对城市环境包括城市地表性质变化和城市大气污染可能引起的云粒子浓度增大现象对对流降水发展的影响问题进行模拟研究, 目的在于加深理解城市环境中对流降水的发展过程, 深入认识城市化发展可能带来的天气学效应。

2 资料和方法

2.1 资料

研究所使用资料包括源自珠三角一带密集自动气象站的观测资料、广州多普勒雷达探测资料以及 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料等。珠三角中尺度自动气象观测站网的平均密度目前已达到 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$, 在该地区实时天气监测工作中发挥着重要作用。研究中主要应用该站网观测到的温度、风以及降水等资料, 对 2008 年 6 月 2 日发生在广州市及邻近地区对流风暴个例的观测特征进行分析。雷达观测资料被重新插值到 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的网格后应用于研究中。NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料除了用于描述对流风暴发展的天气尺度环流背景之外, 在模拟研究中还被用作模式的初始场和边界条件。

2.2 方法

模拟研究采用的是中尺度气象模式 WRF。WRF 模式是一个可压缩、非静力平衡的模式系统 (Skamarock et al., 2005)。本研究采用的模式版本为 V3.1.1, 为了模拟城市地表的影响, 采用了该模式系统提供的 Noah 陆面过程方案及其耦合的单层

城市冠层模式 (Kusaka and Kimura, 2004; Kusaka et al., 2001, 2004)。

为了考虑城市大气污染的影响, 本文假定城市大气污染、气溶胶增多可引起云粒子浓度增大, 采用改进的 Thompson 云微物理方案 (Thompson et al., 2008) 进行模拟。改进的 Thompson 云微物理过程方案可事先指定云粒子浓度的大小, 尽管指定的云粒子浓度在空间和时间上被假定是定常的, 但云水粒径的 Γ 谱分布直接受所指定的云粒子浓度大小影响。在清洁或海洋环境大气中, 云凝结核 (CCN) 分布的模拟采用高参数 Γ 谱型, 从而可得到比大陆上更大的粒子有效半径, 而在大陆环境中, 采用低参数 Γ 谱型, 使得粒子半径变小。与 WRF 模式中其它的单参数云微物理方案相比较, 该方案所刻画的云微物理过程转化率已不只是取决于水物质的质量比, 与粒子浓度也发生了关系, 一定程度上增强了模式对于气溶胶和云物理过程相互作用的描述能力。

模拟试验水平分辨率设置为 2 km , 模拟区域中心位于广州市附近, 网格大小设置为 326×278 , 垂直分为 40 层。模拟时除选用了前面提到的 Noah 陆面过程方案及其耦合的 Kusaka 城市冠层模式和 Thompson 云微物理方案之外, 边界层方案选用的是 YSU 方案, 积分时没有采用积云对流参数化方案。

总共设计了 3 个对比试验用于比较分析不同影响因素的作用。在整个模拟区域中通过设定 Thompson 微物理方案中云粒子浓度 $N_d = 600 \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_d = 50 \text{ cm}^{-3}$, 分别用于对应污染大气 (高云粒子浓度背景) 和清洁大气 (低云粒子浓度背景) 开展了两个试验, 称为 Exp-Polluted 和 Exp-Clean, 用于考察城市环境中污染大气对对流和降水发展的影响。根据 Ramanathan et al. (2001) 提出的通过成核作用而能够被活化成云粒子的气溶胶粒子一般占到整个大气气溶胶粒子 30%~50% 左右, 两个试验所设定的云粒子浓度相当于气溶胶粒子或云凝结核 (CCN) 分别取值为在 $1200 \sim 2000 \text{ cm}^{-3}$ 和 $100 \sim 166 \text{ cm}^{-3}$ 左右。尽管缺乏当地观测值进行比对, 但这一取值范围与过去类似研究工作中 CCN 的取值相当 (van den Heever and Cotton, 2007; Zhang et al., 2007; Khain and Lynn, 2009), 认为是比较合理的。

在试验 Exp-Polluted 的基础上, 还设计了另一个试验 Exp-NoUrban, 主要是通过改变原试验中城

市建设用地为农用或自然植被类型, 去除城市地表影响, 用于考察城市地表性质变化的相对重要性。

研究中采用的地表资料为WRFV3.1版本后提供的可用于Noah陆面过程方案的MODIS 20种分类的土地利用资料, 该数据集的分辨率为30", 城市建设用地为第13类。与原有USGS 30"土地利用资料相比, 该数据集更能反映珠三角地区城市化发展引起的土地利用变化。图1是由该数据集给出的华南南部及沿海城市区的土地利用情况, 城市建设用地为第13类 (用灰色填色表示), 较好地反映出了该地区城市发展的情况。试验Exp-NoUrban中城市建设用地被置换为第14类, 也即为农用地或自然

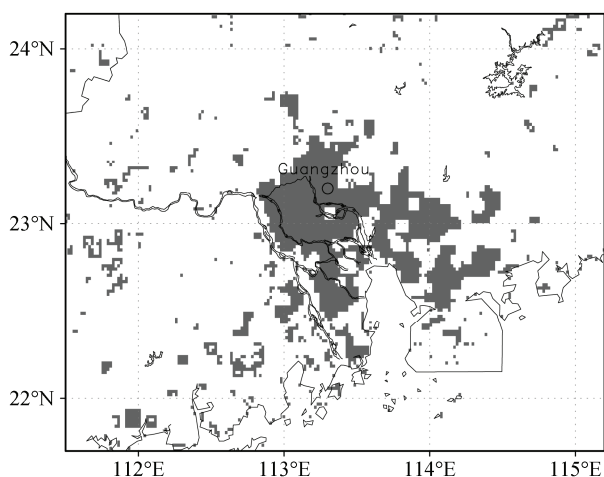


图1 MODIS 20 种分类土地利用资料 (30") 反映的珠三角地区城市土地利用状况

Fig.1 Pearl River Delta urban landuse based on the MODIS 20 category landuse data (30")

植被类型。

3 研究个例观测特征

3.1 天气尺度环境

所研究的对流降水个例发生于 2008 年 6 月 2 日入夜后的广州市, 是前一次冷空气影响后期发生在锋后的一次局地降水过程。实际天气分析表明从 5 月 28 日起华南受到了一次较强冷空气的南下侵袭, 受其影响华南大部分地区曾发生明显降水。5 月 31 日 0000 UTC (协调世界时, 下同) 后冷锋南移进入南海北部并演变成为准静止锋, 广州及珠三角地区位于入海锋线后部, 低层逐渐转为受变性弱高压脊影响, 500 hPa 西风气流变得平直。但此时 850 hPa 上华南大部仍受低槽和切变线影响, 槽后仍有偏北气流的的活动。对流正是在这样一种环流背景中在广州市及邻近地区发展起来。

图 2a、b 分别是由 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料给出的 6 月 2 日 0000 UTC 500 hPa 和 850 hPa 等压面上的环流形势, 可以看到此时 850 hPa 等压面上偏北气流主要位于华南北部, 在其进一步南下影响珠三角地区之前, 当日中午时段, 由于天气转好、云量减少, 有更多太阳短波辐射到达地面并造成珠三角一带城市区地表升温, 导致午后这一带的气层变得不稳定。图 2a、b 中阴影区分别给出的是午后 0600 UTC 的地面抬升指数和对流有效位能, 除位于南部海面上的高值区外, 此时珠三角地区相对于周边具有相对较高的对流有效位能, 其值普遍达到 500 J/kg 以上, 地面抬升指数也为相对的高负值区。

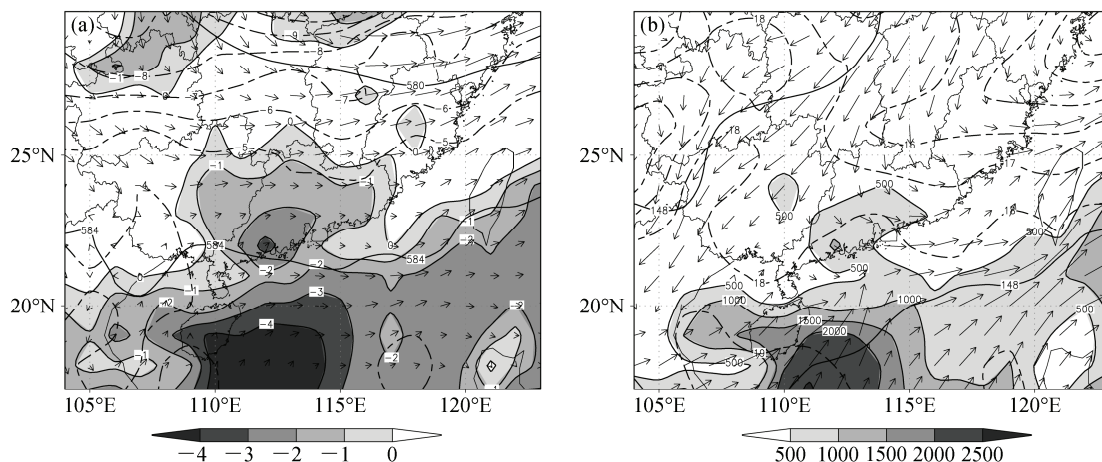


图2 2008年6月2日0000UTC由NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 资料分析的等压面环流形势: (a) 500 hPa, 阴影区为 0006 UTC 地面抬升指数 ($^\circ\text{C}$); (b) 850 hPa, 阴影区为 0006 UTC 对流有效位能 (单位: J/kg)

Fig.2 Isobaric circulation analysed by using the NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data at 0000 UTC 2 Jun 2008: (a) 500 hPa, shaded areas denoted the lift index ($^\circ\text{C}$) at 0006 UTC; (b) 850 hPa, Convective Available Potential Energy (CAPE) (J/kg) for 0006 UTC is shaded

3.2 对流系统发展及强度

有利的天气尺度环境场为对流的发展提供了条件，但对流回波主要集中形成于城市上空表明与城市的影响还有紧密联系。由自动气象站观测资料分析得到的地面温度场和流场图(图 3a)可以看到，到了 2 日 1000 UTC，由于地表升温导致的广州及珠三角地区一带的城市热岛特征变得明显，并造成局地流场发生改变而在广州市附近形成一东西向的中尺度辐合带，对流的发展与和热岛相关辐合流场的形成有联系。

图 4 给出了 2 日 1000 UTC 及 1100 UTC 左右由广州雷达观测到的对流在广州市附近发展的情况。对流起始发展于广州市南北两侧，之后北侧的回波区向南扩展、移动，1100 UTC 以后汇集于广州市上空形成对流风暴，回波发展强度最大超过了 45 dBZ。

从相对应两个时刻雷达回波沿 113.5°E 的经向垂直剖面图(图略)可以看到，对流发展的高度比较高，回波顶伸展到了 12 km 以上，属于一种深对流系统。受这一对流风暴系统影响，广州市内多个自动气象站记录到的降水强度超过了 100 mm/h，最强达到 130 mm/h 左右，雷电活动也很活跃。图 3b 给出的是风暴降水最集中 6 小时(1200~1700 UTC)累积的雨量分布，主要降水区位于广州市及邻近地区。城市作用是否对对流风暴的发展产生影响，值得进行研究。

4 模拟结果分析

4.1 模拟结果与观测的比较

模拟研究采用的初边值条件由 NCEP FNL 1°×1°再分析资料提供，积分起始时间为 2008 年 6 月 2 日 0000 UTC，积分 24 h，积分步长为 12 s。模

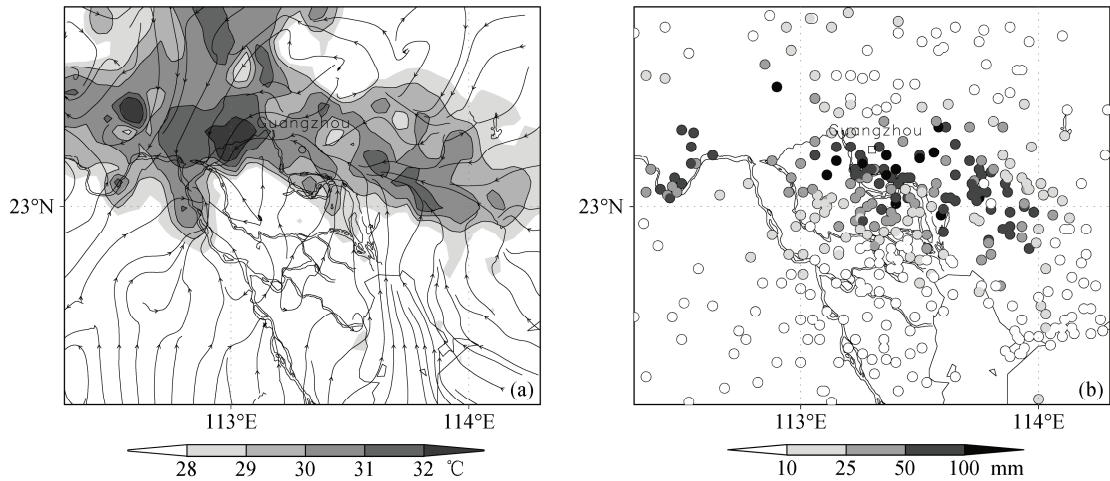


图 3 2008 年 6 月 2 日自动站资料分析的城市热岛、地面流场和累积降水量分布：(a) 1000 UTC 的城市热岛(阴影)、地面流场；(b) 6 小时(1200 UTC~1700 UTC)累积降水(单位：mm)

Fig.3 Urban heat island, surface air flows, and precipitation analysed by using automatic weather station data on 2 Jun 2008: (a) Urban heat island (shaded area), surface air flows at 1000 UTC; (b) 6 h accumulated precipitation for 1200 UTC–1700 UTC

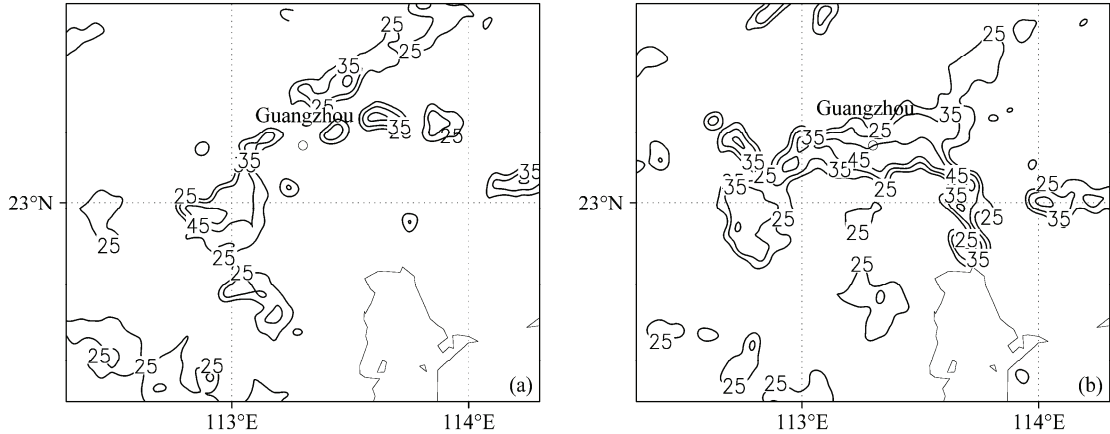


图 4 2008 年 6 月 2 日广州雷达观测到的降水回波(单位：dBZ)分布：(a) 1000 UTC；(b) 1100 UTC

Fig.4 Precipitation echo (dBZ) detected by Guangzhou radar on 2 Jun 2008: (a) 1000 UTC; (b) 1100 UTC

拟结果表明 WRF 模式对本次对流降水过程具有较好的模拟能力,只是不同试验模拟的降水集中发生时间均比实际观测晚了约 3 个小时。

图 5 给出了 3 个试验模拟的降水最集中 6 小时 (1200 UTC~1700 UTC) 累积雨量分布与观测结果的比较,其中观测降水由图 3b 的站点值插值到约 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 的网格后绘制得到。尽管模拟降水最集中的时间滞后 3 小时,但其分布模态基本与实际观测一致,降水主要集中在广州市附近。其中 Exp-Polluted (图 5a) 模拟结果最好,模拟的广州市附近的 6 小时累积雨量中心值超过 100 mm ,达到 120 mm 左右,而且强降水集中区(图 5a 中矩形区)落在广州市区中,与实际观测(图 5d)降水中心值最为接近。相对来说尽管 Exp-Clean (图 5b) 试验在广州南部地区模拟出了更多的降水,但在广州市附近模拟的 6 小时雨量中心则没有超过 100 mm 。仅从广州市附近累积雨量中心值对比看,污染造成降水增多可达到 20% 左右。

图 5c 是与 Exp-Polluted 相对应的、无城市影响时的降水,也即 Exp-NoUrban 试验的模拟结果。同样是在高云粒子浓度背景中,但如果没有了城市地表的影响,对流发生的位置和强度均发生了改变,降水位置向北偏离主要城市区,范围缩小、强度减弱。如 Exp-Polluted 试验和观测分析结果原来在广州附近具有较强降雨的区域,Exp-NoUrban 试验模拟的雨量值多数均在 50 mm 以下。由此看来,本次对流降水的发生与城市地表影响关系更为密切,地表作用直接影响到了对流降水的形成及发展位置,而城市大气污染状况(云粒子浓度大小)则主要是在对流发展过程中影响到了降水量的大小和强度。

图 6 给出的是不同试验模拟的区域平均降水强度随时间的演变情况,所取平均区域如图 5a 中的降水集中区(矩形区),面积约 500 km^2 ,图中同时也给出了矩形区内由 20 个自动气象站观测雨量平均得到的雨强变化。比较来看,观测降水主要集中在 1200 UTC~1400 UTC,最强平均降水强度

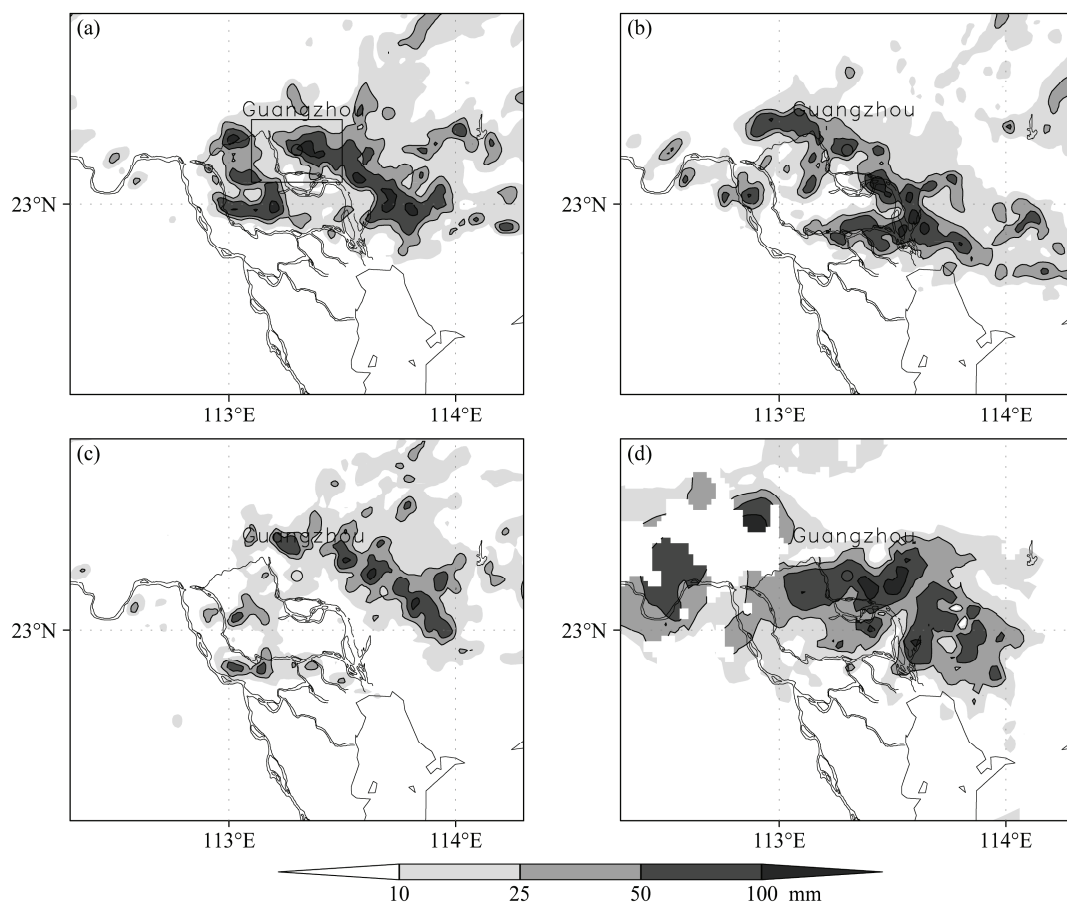


图 5 不同试验模拟的 6 小时 (1200~1700 UTC) 累积雨量 (单位: mm): (a) Exp-Polluted (矩形区为文中定义的对流集中发展区); (b) Exp-Clean; (c) Exp-NoUrban; (d) 观测

Fig.5 6 h (1200 UTC~1700 UTC) accumulated rainfall (mm) simulated in different experiments: (a) Exp-Polluted (rectangular area is the main convection zone defined in the text); (b) Exp-Clean; (c) Exp-NoUrban; (d) observation

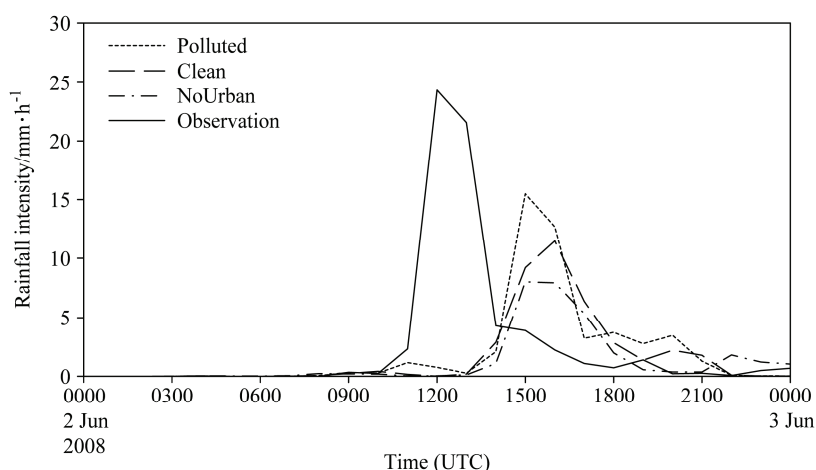


图6 不同试验模拟的区域平均降水强度(单位: mm/h)

Fig.6 Area average rainfall intensity (mm/h) simulated in different experiments

达到 25 mm/h, 而不同试验模拟的降水则集中发生在 1500 UTC~1700 UTC, 比观测均落后了约 3 小时, 而且最大平均降水强度相对较弱(模拟平均降水强度明显低于实际观测的平均降水强度可能与格点平均和站点平均的差异有关系)。尽管如此, 其演变特征是相似的, 尤其是 Exp-Polluted 试验的模拟结果, 从图 6 中可以看到, 与观测降水的演变特征尤为相似, 在降水集中发生的 3 小时中, 都是第 1 小时降水量最大, 第 2 小时次之, 到了第 3 小时降水量已大为减少。另外, 图 6 中还反映出 Exp-Polluted 试验模拟的平均降水强度最强, 最大超过了 15 mm/h, 可超出 Exp-Clean 试验最强平均降水强度 12 mm/h 近 25%; 无城市地表影响的试验 Exp-NoUrban 平均降水强度最弱, 不到 10 mm/h, 比 Exp-Polluted 试验结果低了近 30%。

为什么不同试验模拟的降水集中发展时间均滞后于实际降水发生的时间? 最主要的可能与模式初始条件中仍缺少对环境场中尺度特征的详细描述有关系。另外, 模式物理过程尤其是与局地特征密切相关的诸如陆面过程、边界层方案及其它与降水过程相关物理方案的局限性也可能影响到了模式对于此类局地对流系统发展的模拟效果, 对其原因的具体分析已超出本文研究范围。尽管如此, 以上不同设置试验对广州市附近降水模拟效果造成的差异仍可为研究城市环境对降水影响问题提供了机会。以下分别对城市地表及不同云粒子浓度的影响作进一步的分析。

4.2 城市地表影响

图 7 分别给出的是 Exp-Polluted 模拟的 2 日傍

晚时段地面 2 m 温度的演变及其和 Exp-NoUrban 模拟结果的差异。可以发现城市的存在导致珠三角城市区一带的 2 m 温度(阴影区)比周边地区高, 到了 1000 UTC 热岛的特征逐渐变得明显, 热岛中心区位于广州西南部, 1100 UTC 城区与郊区的温度对比进一步增强, 强度达 4℃左右。与此同时, 城市区一带的湿度(2 m 比湿)比起周边地区也要低, 形成了一个比较明显的干岛(图 7a、b 中等值线, 图中为清楚起见仅画出了 16 g/kg 等比湿线)。图 7c、d 为与图 7a、b 相应时刻 Exp-Polluted 和 Exp-NoUrban 两个试验结果的差异, 可以看到温度差异(阴影区)和湿度差异(等值线)的分布特征与图 7a、b 中热岛和干岛的相似, 差异最大集中出现在珠三角的城市区, 反映出城市地表对城市环境中温、湿场有很大影响。

图 8 是 1100 UTC 经过热岛中心区沿 113.2°E 的位温、相对湿度以及流场的经向垂直剖面图, 可以看到此时城市区的边界层顶(等位温线平直区)位于 1.6 km 左右, 比起周边郊区边界层顶高了 400~500 m, 城市区等位温线陡直, 近地面超绝热层已不存在, 说明此时城市边界层中的气流已充分垂直混合, 这对于低层辐合流场发展十分有利。城市干岛的特征在图 8 上也有明显表现, 在 500 m 以下的近地面层, 城区与郊区间相对湿度的水平梯度很大, 边界层高度以上, 相对湿度的差别才变得不明显。城市热岛边界层的这些特征与过去的观测和模拟研究结果是相似的(Spangler and Dirks, 1974; Hjermfelt, 1982)。

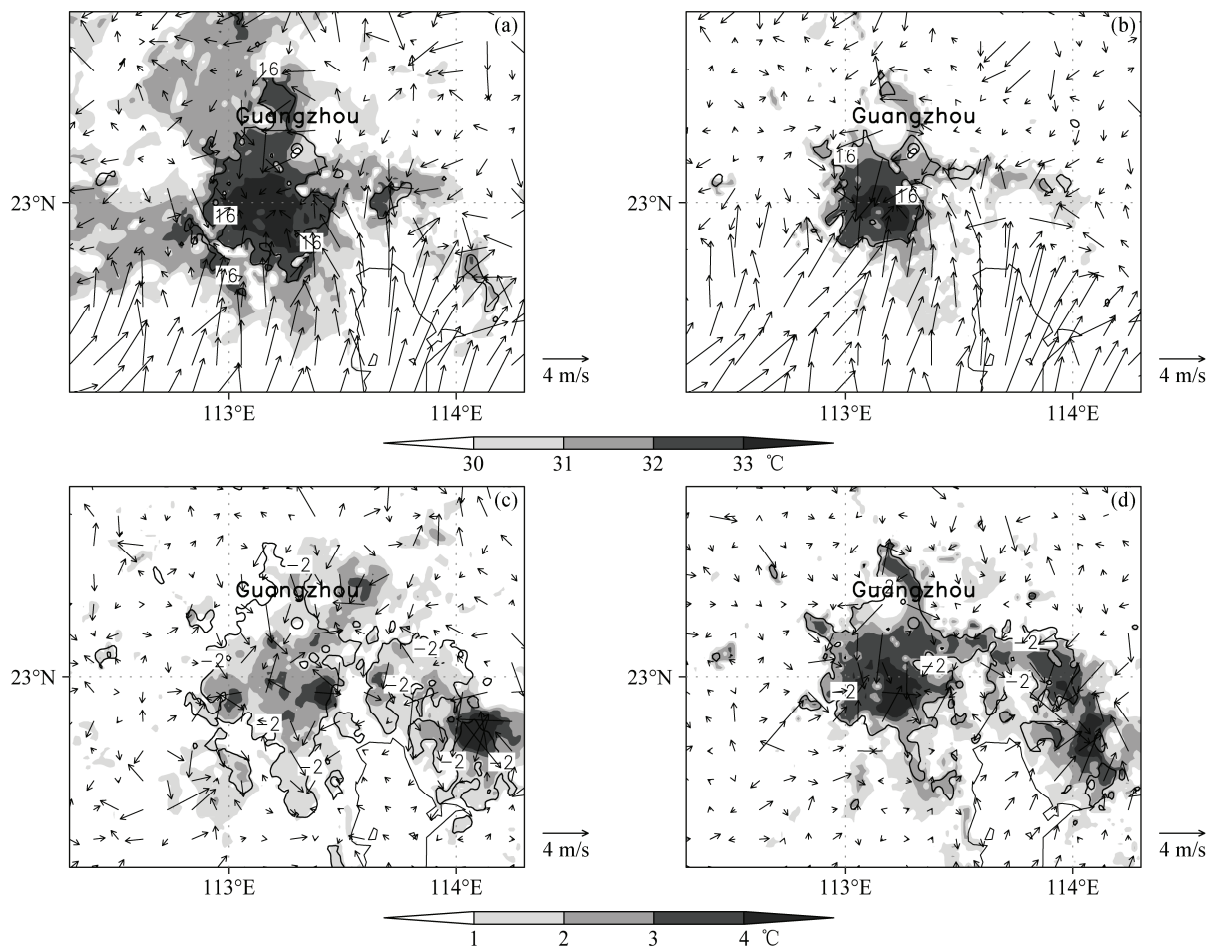


图7 (a、c) 1000 UTC 和 (b、d) 1100 UTC 的 2 m 温度 (阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、比湿 (等值线, 单位: g/kg)、10 m 风 (矢量): (a、b) Exp-Polluted 模拟; (c、d) Exp-Polluted 与 Exp-NoUrban 模拟结果的差异

Fig.7 2-m temperature (shaded), 2-m specific humidity (contour line, g/kg), 10-m wind (vector) at (a, c) 1000 UTC and (b, d) 1100 UTC: (a, b) Exp-Polluted simulations; (c, d) differences between simulations of Exp-Polluted and Exp-NoUrban

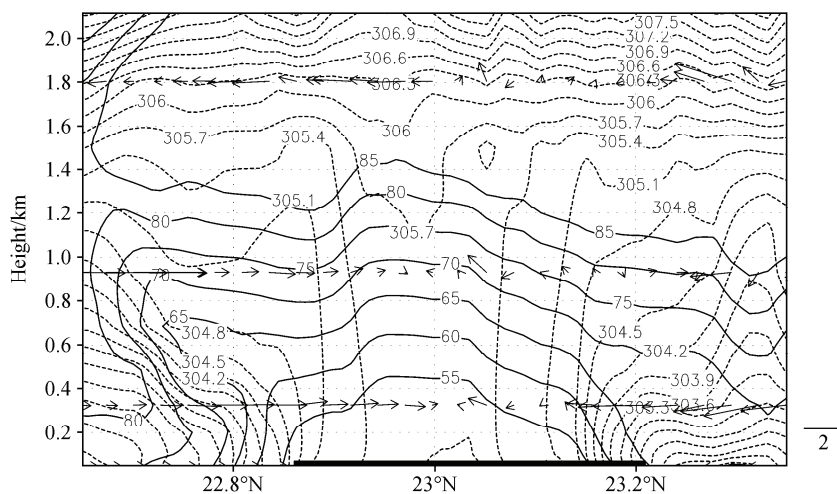


图8 1100 UTC Exp-Polluted 试验模拟的位温 (虚线, 单位: K)、相对湿度 (%) (实线) 及流场沿 113.2°E 的经向剖面图。粗实线: 广州城市的位置

Fig.8 Vertical cross section (along 113.2°E) of simulated θ (dashed line, K), relative humidity (solid line, %), and air flows at 1100 UTC for the Exp-Polluted. Thick solid line denotes location of Guangzhou city

城市干岛的形成与城市植被少、蒸发蒸腾少有关,造成低层水汽缺乏,一般被认为并不利于对流的发展,因为干岛形成不仅减少了对流发展需要的水汽,而且也会造成对流有效位能(CAPE)减少。但应该注意到,尽管干岛减少了低层的水汽,由此带来的感热加热增强却提升了城市边界层的高度,这是有利于低层辐合发展,有利于对流形成的。图8中城市边界层高度比郊区高,并对应低层辐合,正是这一原因造成。而且与热岛相联系的低层辐合反过来还可造成水汽辐合,使局部地区的低层水汽增多并导致对流有效位能增大。图9给出了对流开始发展时(1200 UTC)由Exp-Polluted模拟的10 m风场和散度场(图9a)及Exp-Polluted与Exp-NoUrban模拟对流有效位能差值和风场差异(图9b),同时还分别给出了随后的1400 UTC和1500 UTC由Exp-Polluted模拟的强度大于25 dBZ的对流回波区。可以看到由于低层大气变干,珠三角多数地区对流有效位能是减少的,但在地面明显有辐合的区域,对流有效位能却增加,这与辐合气流引起的水汽增加有关系。图9中对流开始发展时广州市南北各存在对流有效位能增大的区域,相应的地面强辐合区散度值相当大,如位于广州市西南侧的辐合中心其值达到 $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,由此造成水汽辐合并引起对流有效位能增大普遍达300 J/kg以上,最大超过500 J/kg。

对流正是在这样一些地面强辐合区和具有较

大对流有效位能的区域开始发展起来的。从图9a给出随后的1400 UTC由Exp-Polluted模拟结果反算得到的雷达组合反射率看,大于25 dBZ的回波区与地面辐合中心区对应良好,对流回波开始时也主要形成于广州市的南北两侧,之后(1500 UTC,图9b)对流集中于城市上空发展达最强。模拟回波的演变特征与雷达实际观测结果(如图4)有很多相似之处,这些都进一步说明了城市地表对于对流的起始发展及其发生位置有更直接的作用。

4.3 云粒子浓度影响

城市地表影响的这种相对重要性,前面给出的区域平均降水强度演变图(图6)也有清楚反映。在没有城市地表影响情况下,即使在高云粒子浓度背景中,平均的降水强度最小,最强仅达到7 mm/h左右。同样在有城市地表影响情况下,低云粒子浓度背景试验Exp-Clean模拟的最大平均降水强度为12 mm/h左右,而高云粒子浓度背景试验Exp-Polluted最大平均降水强度则可达到15 mm/h以上。这都反映出了城市地表影响造成的降水强度变化是第一位的,而城市大气污染的增雨效应则要列于第二位。

这与van den Heever and Cotton(2007)针对城市气溶胶增多对于对流风暴和降水发展影响的研究结果相类似,他们的研究也指出主要是城市地表引起的低层辐合,而不是气溶胶浓度增加,控制了城市中对流发展的位置和降水量大小。同时他们也

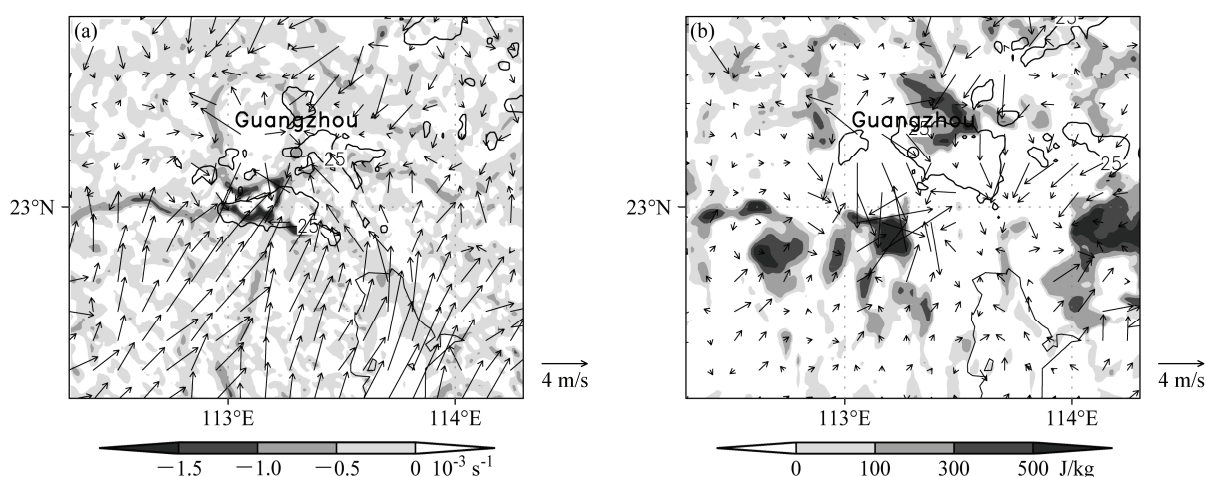


图9 (a) 1200 UTC Exp-Polluted 模拟的风场(风矢量)和散度场(阴影,单位: 10^{-3} s^{-1}); (b) 1200 UTC Exp-Polluted 与 Exp-NoUrban 模拟对流有效位能(阴影,单位: J/kg)和风场(风矢量)的差异。等值线:为随后1400 UTC (a)和1500 UTC (b)由Exp-Polluted模拟的25 dBZ以上的回波区

Fig.9 (a) Exp-Polluted simulated wind field (vector) and divergence (shaded area) at 1200 UTC; (b) difference fields of simulated CAPE (shaded area) and wind (vector) between Exp-Polluted and Exp-NoUrban at 1200 UTC. Contour lines in (a) and (b) denote the Exp-Polluted simulated radar echo above 25 dBZ at 1400 UTC and 1500 UTC, respectively

指出,一旦对流发展起来后,城市气溶胶增多可对风暴系统动力学、云微物理学以及降水产生重要影响。但由于云微物理学与风暴动力学之间关系复杂、互相之间的反馈作用又是非线性的,气溶胶增多会造成降水增强还是减弱则很难给出一个确切的答案。

本个例模拟结果反映出随着云粒子浓度的增大降水是增强的,这与过去源自于对一些浅层状云降水研究结果的认识即气溶胶增多抑制降水发展的观点(Zhang et al., 2007)相反。近年来已有不少工作强调气溶胶对降水产生的效应与环境场条件和云类型的不同还有很大关系,气溶胶与云动力学的强烈反馈作用在某些情况下是可以导致降水增强的。如 Lynn et al. (2005) 和 Lee et al. (2008a,

2008b) 的研究就发现了深对流发展区域可导致降水增强的现象。

为进一步了解云粒子浓度对降水的影响过程,图 10 给出了试验 Exp-Polluted 和 Exp-Clean 模拟的降水集中区最大上升运动的时间演变。尽管最大的上升运动速度都没有超过 10 m/s,比一般强对流系统上升速度往往可达到几十米/秒要小很多,但这一数值与该对流系统处于较小对流有效位能(约 500 J/kg,见图 2b,最大上升运动可用 $w_{\max} = \sqrt{\text{CAPE}}/2$ 估算)环境中是相一致的。从图中可以看到 Exp-Polluted 试验中最大的垂直上升运动达到 9 m/s,比 Exp-Clean 试验的结果普遍要大,与高云粒子浓度环境中更多的潜热释放有关系。

图 11 给出的是模拟降水集中发展的第 1 小时

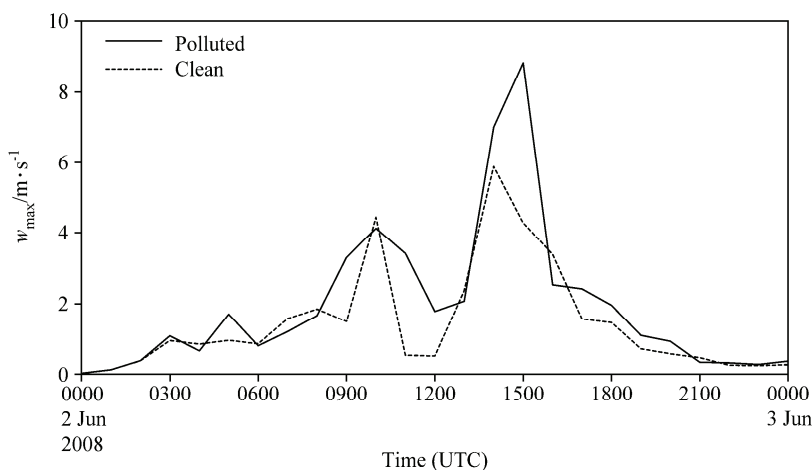


图 10 Exp-Polluted (实线) 和 Exp-Clean (虚线) 试验模拟的最大垂直上升运动 (单位: m/s)

Fig.10 Simulated maximum vertical velocities in Exp-Polluted (solid line) and Exp-Clean (dashed line)

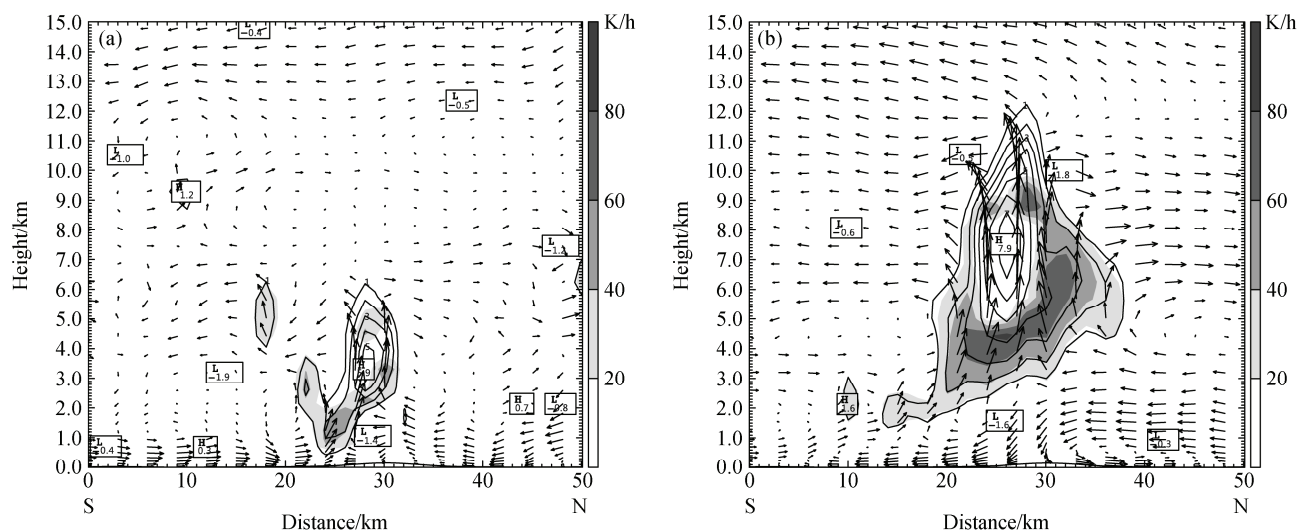


图 11 (a) 1400 UTC、(b) 1500 UTC Exp-Polluted 与 Exp-Clean 试验模拟的凝结核加热率差 (阴影, 单位: K/h) 及垂直上升运动差 (等值线, 单位: m/s) 经 113.2°E 的经向垂直剖面图。风矢量: Exp-Polluted 模拟的经向环流

Fig.11 Vertical cross sections (along 113.2°E) of differences of simulated latent heating rate (shaded area) and ascending motion (contour line, m/s) between Exp-Polluted and Exp-NoUrban at (a) 1400 UTC and (b) 1500 UTC. Wind vectors denote the meridional circulations simulated in Exp-Polluted

和第 2 小时 (即 1400 UTC 和 1500 UTC), 由试验 Exp-Polluted 与 Exp-Clean 模拟的潜热加热差异及垂直上升运动差异经广州城市区 (113.2°E) 南北向的垂直剖面图, 图中风矢为 Exp-Polluted 模拟的经向环流。可以看到对流起始发展于与热岛相关的南北向气流辐合场中, 在初始阶段, 潜热加热相差最大的区域位于边界层顶 1.6 km 左右的高度上, 之后, 随着对流的进一步发展, 最大加热差异区迅速上升至 4~5 km 高度附近, 最大相差值近 80 K/h。凝结加热差异造成垂直上升运动的发展也有很大不同, 在对流发展最强的 1500 UTC 两个试验模拟上升运动速度相差最大近 8 m/s, 并且位于潜热加热相差最大区的上空, 表明高云粒子浓度环境中更多的凝结潜热释放增强了城市上空对流的发展。

凝结潜热差异是云中各种水凝物相互转换存

在差异的一种表现。从降水集中发展区不同类型水凝物总质量 (水平垂直积分) 随时间的演变 (图 12) 可以看到, 大气中总的水汽含量 (可降水量) 在 Exp-Polluted 和 Exp-Clean 试验中的差值相对来说并不大, 但在对流发展时段 Exp-Polluted 比 Exp-Clean 有更多的云水物质形成, 表明高云粒子浓度背景中有更多的云滴通过碰撞合并作用得以增长, 由此引起云中的云水和雨水含量增多, 其中最大时云水增多可达 1 倍, 雨水增多也达到了 50% 左右。另外, 所有冰相物质包括云冰、雪、霰等也表现出了相似的演变特征, 高云粒子浓度环境中更多的冰相物质形成。其中雪的含量最高, 最多时可达 5 kg/m^2 , 而霰的含量次之, 冰的含量最小。注意图中冰和霰的垂直坐标与其它水凝物的不同, 尤其是冰的含量其量级比其它水凝物要小两个量级以上, 可能与华

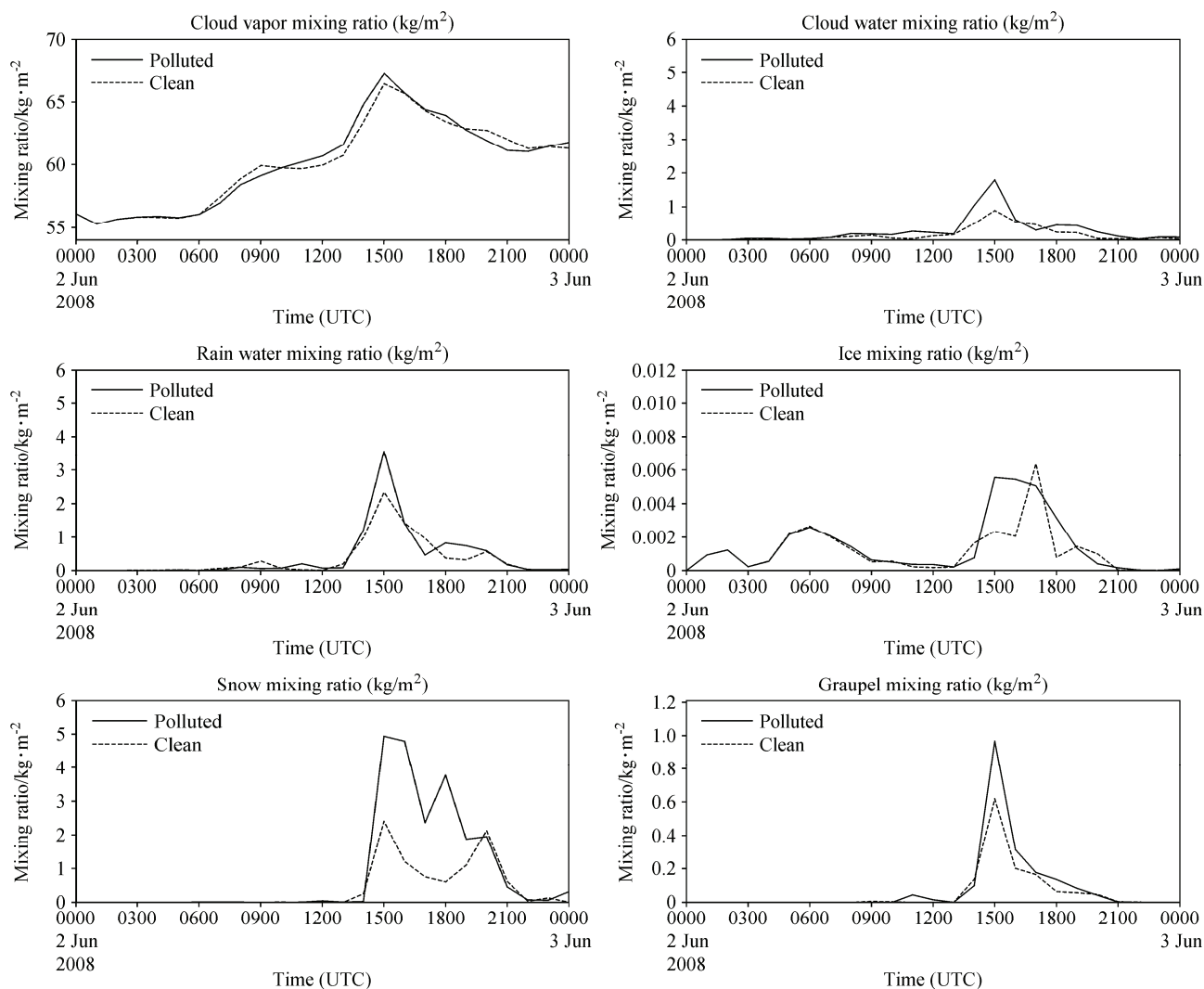


图 12 降水集中发展区不同类型水凝物的水平和垂直积分 (单位: kg/m^2)

Fig.12 Horizontal and vertical integration of different types of hydrometeors in the main precipitation zone

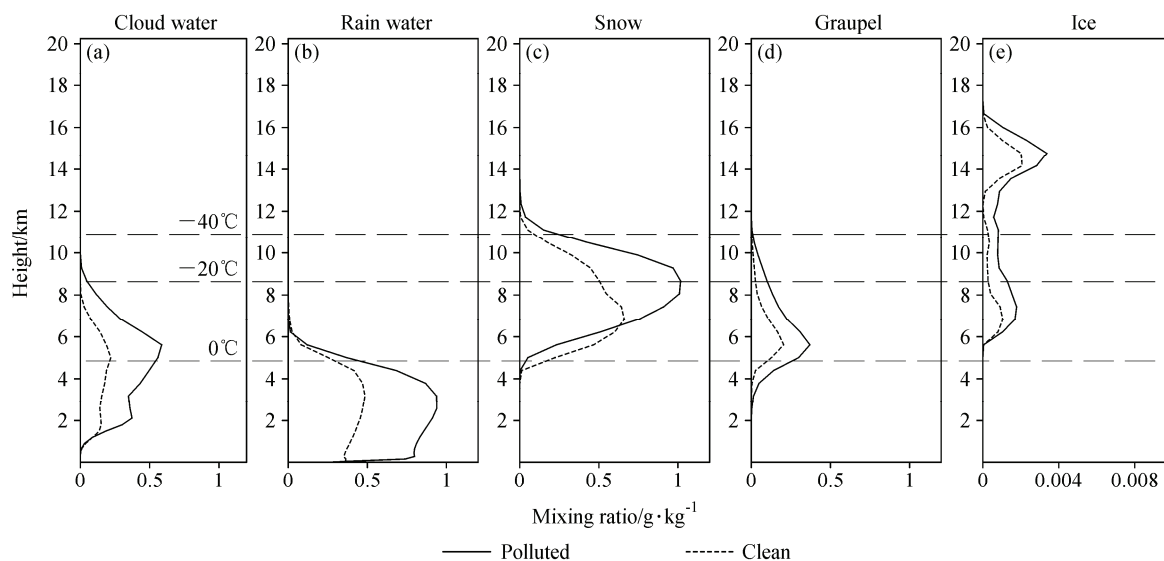


图 13 1500 UTC 对流集中发展区域平均不同水凝物混合比 (单位: g/kg) 在垂直方向的分布: (a) 云水; (b) 雨水; (c) 雪; (d) 霰; (e) 冰晶
Fig.13 Vertical profiles of mixing ratios for different types of hydrometeors (g/kg) averaged over the main convection zone at 1500 UTC: (a) Cloud water; (b) rain water; (c) snow; (d) graupel; (e) ice

南处于较低纬度、冻结高度较高有关系。

图 13 给出的是对流发展最强的 1500 UTC 降水集中区平均水凝物在垂直方向的分布, 图中对不同高度上的温度进行了标注。可以看到冻结层高度 (0°C 层) 位于近 5 km 高度上, 不仅在此高度以下, 高云粒子浓度环境试验在此高度上也具有更多的云水和雨水, 尤其是过冷却云水增多可达低云粒子浓度环境中的 1 倍以上。正是由于有了更多的过冷却液态水存在, 加上降水集中发展区具有强的垂直上升运动, 使对流发展过程中有更多的冰相物质形成。图 13 上表明雪晶及霰的增多尤其明显, 霰主要位于 0°C 层附近及以上的高度, 与过冷却云滴共存于比较深厚的一个区域, 而雪晶则位于更高的高度。图 11 位于 4~5 km 高度范围的凝结加热最大差异区可能正是高云粒子浓度环境中有更多雪晶和霰粒增长的反映, 是雪晶、霰粒增长过程中发生水汽凝华及冻结过程释放潜热加热的一种结果。

由此可以推测, 高云粒子浓度环境有更多的降水发生与对流云中有更多雨水及过冷却云水形成有很大关系。对流云中增多的云水雨水, 可通过对流云中强的上升运动而被传送到较高层次, 引起云中冻结过程及液态水和原已存在的其它冰相物质之间的相互作用增强, 致使更多冰相物质形成。而由于潜热释放增多引起的上升运动增强, 加强了这一过程的发生, 并使得对流可以持续, 最终导致落地地面降水增多。

5 总结和讨论

本文针对一次发生在广州市及邻近地区的对流风暴过程, 模拟研究了城市环境包括城市地表性质变化和城市空气污染可能引起的云粒子浓度增大现象对对流降水发展的影响问题。模拟试验采用了具有 2 km 分辨率的中尺度气象模式 WRF 及其耦合的单层城市冠层模式, 以及可事先指定云粒子浓度大小的 Thompson 云微物理方案进行。研究结果表明: 相对于云粒子浓度增大的影响来说, 城市地表性质变化在对流降水形成发展过程中起到更主要作用, 直接影响到对流降水的形成及其发展位置。城市地表作用可引起城市热岛和干岛形成, 造成城市边界层高度升高, 引发局地环流改变形成有利于对流发展的辐合流场, 结果导致局地不稳定能量增大, 并引发对流发展。在无城市地表影响时, 即使是在高云粒子浓度 (污染) 背景中, 对流降水发生位置偏离主要城市区, 范围小、强度弱。但是当对流发展起来后, 城市空气污染状况 (云粒子浓度大小) 可影响到对流的发展强度及降水量大小。分析表明, 同样条件下, 污染状况下平均降水强度可增强 25%, 降水增多 20% 左右。

在高云粒子浓度背景中, 对流发展更加强烈, 降水增多并集中于城市区。云粒子浓度增大对对流降水的增强作用主要表现在可增进对流云中液态水和冰相物质的含量。针对各种类型水凝物进行区

域垂直积分得到的结果表明, 高云粒子浓度背景中, 云水含量最大时可增多 1 倍, 雨水增多也达到了 50% 左右, 增多的云水主要位于冻结层高度 (0℃ 层) 附近及以上高度。由于这些增多的液态水尤其是过冷云水的存在, 通过对流云中强的上升运动被传送到较高层次, 引起云中冻结过程及液态水和原已存在的其它冰相物质之间的相互作用增强, 致使有更多的冰相物质形成。这一过程中, 潜热释放增多引起了上升运动增强, 在加强这一现象发生的同时, 也使得对流可以持续, 最终导致降落地面降水增多。

当然, 需要指出的是, 城市环境对对流降水的影响是一个复杂问题, 有众多的影响因素。本文针对城市空气污染影响方面的模拟研究只是在假定城市空气污染可能引起云粒子浓度增大前提下进行的, 尽管采用了一个改进的整体参数化云物理方案 (Thompson 云物理方案) 来刻画云的各种微物理转化过程, 但由于仍缺乏对气溶胶向云凝结核转化过程的描述, 不论从微观上还是宏观上还很难直接对城市气溶胶对降水产生影响的具体过程进行评估, 而且由于只是针对特定环境中一个个例的模拟分析, 也并没有严格区分城市区及郊区云粒子浓度的差异, 所得结论是初步的。今后工作中应用更加细致的云微物理方案如分档处理的微物理方案 (Spectral Bin Microphysics) 或是考虑了气溶胶核化过程的双参数云微物理过程方案, 针对不同环境条件、不同城市、不同气溶胶浓度背景开展更多的模拟研究仍很有必要。

参考文献 (References)

- Baik J J, Kim Y H. 2001. Dry and moist convection forced by an urban heat island [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40: 1462–1475.
- Changnon S A. 1968. The LaPorte weather anomaly—Fact or fiction? [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 49: 4–11.
- Changnon S A, Huff F A, Schickedanz P T, et al. 1977. Summary of METROMEX, Volume 1: Weather anomalies and impacts [M]. Urbana: Bulletin 62, Illinois State Water Survey, 260pp.
- Changnon S A, Semonin R G, Auer A H, et al. 1981. METROMEX: A Review and Summary [M]. America: American Meteorological Society, 81pp.
- Craig K, Bornstein R. 2002. MM5 simulation of urban induced convective precipitation over Atlanta [C]. Preprints, Fourth Conf. on the Urban Environment, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 5–6.
- 段婧, 毛节泰. 2008. 华北地区气溶胶对区域降水的影响 [J]. *科学通报*, 53 (23): 2947–2955. Duan Jing, Mao Jietai. 2008. Aerosols impact on regional precipitation over North China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 53 (23): 2947–2955.
- Hjemfelt M R. 1982. Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary layer airflow and vertical air motion: Simulations of urban vs. non-urban effects [J]. *J. Appl. Meteor.*, 21 (9): 1239–1257.
- Huff F A, Changnon S A. 1972. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis [J]. *J. Appl. Meteor.*, 11 (5): 823–842.
- Johnson D B. 1976. Ultragiant urban aerosol particles [J]. *Science*, 194 (4268): 941–942.
- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. 2005. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (611): 2639–2663.
- Khain A, Lynn B. 2009. Simulation of a supercell storm in clean and dirty atmosphere using weather research and forecast model with spectral bin microphysics [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D19209, doi: 10.1029/2009JD011827.
- Kusaka H, Kimura F. 2004. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (1): 67–80.
- 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.
- 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]. Symposium on “Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone”. 1–15 January, Seattle, WA.
- Landsberg H E. 1970. Man-made climatic changes [J]. *Science*, 170 (3964): 1265–1274.
- Lee S S, Donner L J, Phillips V T J, et al. 2008a. The dependence of aerosol effects on clouds and precipitation on cloud-system organization, shear and stability [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D16202, doi: 10.1029/2007JD009224.
- Lee S S, Donner L J, Phillips V T J, et al. 2008b. Examination of aerosol effects on precipitation in deep convective clouds during the 1997 ARM summer experiment [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134 (634): 1201–1220, doi: 10.1002/qj.287.
- 黎伟标, 杜尧东, 王国栋, 等. 2009. 基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究 [J]. *大气科学*, 33 (6): 1259–1266.
- Li Weibiao, Du Yaodong, Wang Guodong, et al. 2009. Urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta based on satellite data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (6): 1259–1266.
- Lynn B, Khain A, Dudhia J, et al. 2005. Spectral (bin) microphysics coupled with a mesoscale model (MM5). Part 2: Simulation of a CaPE rain event with squall line [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133: 59–71, doi: 10.1175/MWR-2841.1.
- Mather G K. 1991. Coalescence enhancement in large multicell storms caused by the emissions from a Kraft paper mill [J]. *J. Appl. Meteor.*, 30: 1134–1146.

- 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响 [J]. 大气科学, 31 (2): 364–372. Meng Weiguang, Yan Jinghua, Hu Haibo. 2007. Possible impact of urbanization on severe thunderstorms over Pearl River Delta [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 364–372.
- Meng W G, Yan J H, Hu H B. 2007. Urban effects and summer thunderstorms in a tropical cyclone affected situation over Gunagzhou city[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 50 (12): 1867–1876.
- Niyogi D, Holt T, Zhong S, et al. 2006. Urban and land surface effects on the 30 July 2003 MCS mesoscale convective system event observed in the southern Great Plains [J]. J. Geophys. Res., 111: D19107, doi: 10.1029/2005JD006746.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate and the hydrological cycle [J]. Science, 294 (5549): 2119–2124, doi: 10.1126/science.1064034.
- Rozoff C, Cotton W R, Adegoke J O. 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms [J]. J. Appl. Meteor., 42: 716–738.
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. Earth Interactions, 9 (2): 1–27.
- Spangler T C, Dirks R A. 1974. Mesoscale variations of the urban mixing height [J]. Bound.-Layer Meteor., 6 (3–4): 428–441.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2005. A description of the Advanced Research WRF Version 2 [R]. NCAR Tech Notes–468+STR.
- 孙继松, 舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究 [J]. 大气科学, 31 (2): 311–320. Sun Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 311–320.
- 孙继松, 王华, 王令, 等. 2006. 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 [J]. 大气科学, 30 (2): 221–234. Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 221–234.
- Thielen J, Wobrock W, Gadian A, et al. 2000. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso-gamma-scale [J]. Atmospheric Research, 54 (1): 15–39.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit Forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (12): 5095–5115.
- Vukovich F M, Dunn J W. 1978. A theoretical study of the St. Louis heat island: Some parameter variations [J]. J. Appl. Meteor., 17 (11): 1585–1594.
- van den Heever S C, Cotton W R. 2007. Urban aerosol impacts on downwind convective storms [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46 (6): 828–850, doi: 10.1175/JAM2492.1.
- 徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 2005. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应 [J]. 科学通报, 50 (22): 2522–2530. Xu Xiangde, Shi Xiaohui, Zhang Shengjun, et al. 2005. Aerosol influence domain and its climatic effect over Beijing and surrounding cities [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (22): 2522–2530.
- Zhang H, McFarquhar G M, Saleeby S M, et al. 2007. Impacts of Saharan dust as CCN on the evolution of an idealized tropical cyclone [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (14): L14812, 6 PP, doi:10.1029/2007GL029876.