

李英华,刘丽丽,邱晓滨,等,2020.天津城市环境对一次局地降水过程影响的模拟研究[J].气象,46(7):926-937. Li Y H, Liu L L, Qiu X B, et al, 2020. Simulation study of the impact of urban environment on a local precipitation process in Tianjin[J]. Meteor Mon, 46(7):926-937(in Chinese).

# 天津城市环境对一次局地降水过程影响的模拟研究<sup>\*</sup>

李英华<sup>1,2</sup> 刘丽丽<sup>1</sup> 邱晓滨<sup>1,2</sup> 东高红<sup>3</sup> 宋 薇<sup>4</sup> 吴彬贵<sup>1</sup> 王雪莲<sup>1</sup>

1 天津市气象科学研究所,天津 300074

2 天津市海洋气象重点实验室,天津 300074

3 天津市气象台,天津 300074

4 天津市人工影响天气办公室,天津 300074

**提 要:** 采用中尺度气象模式 WRF 结合自动站观测资料,对天津城区及附近发生的一次局地降水过程进行数值模拟和敏感性试验,研究了城市环境(城市地表、城市大气污染)对降水发生发展的影响。结果表明:城市地表引起的热岛环流,叠加海风环流后,改变了辐合线的位置和强度,直接影响了对流降水的发生及落区。城市大气污染状况可影响对流发展后的强度及降水量,敏感性试验结果显示气溶胶浓度增大后区域平均降水量增加约 25%;气溶胶的增雨效应主要表现在可增进对流云中液态水和冰相物质含量,增多的液态水物质被强的上升气流抬升到较高处冻结形成冰晶,这一过程中增多的凝结潜热又可促进对流发展,最终导致地面总降水量增多,研究个例中气溶胶浓度增加可使潜热加热率最大增加  $110 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

**关键词:** 城市地表,城市大气污染,局地降水,WRF,数值模拟

**中图分类号:** P456,P49

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.005

## Simulation Study of the Impact of Urban Environment on a Local Precipitation Process in Tianjin

LI Yinghua<sup>1,2</sup> LIU Lili<sup>1</sup> QIU Xiaobin<sup>1,2</sup> DONG Gaohong<sup>3</sup>

SONG Wei<sup>4</sup> WU Bingui<sup>1</sup> WANG Xuelian<sup>1</sup>

1 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074

2 Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074

3 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

4 Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074

**Abstract:** Using mesoscale numerical prediction model WRF combined with dataset from automatic weather stations, focused on a local convective precipitation process which occurred in and near Tianjin urban area, this paper conducts numerical simulations and sensitivity test to investigate the impact of urban environments (surface features, urban air pollution) on the convective precipitation. The results show that the heat island circulation caused by urban surface changed the position and intensity of convergence line after superimposing sea breeze circulation, which directly affected occurrence and falling area of convective precipitation. Once convection develops, the air pollution over cities can affect the intensity and rainfall. The sensitivity test shows that the increase of aerosol concentration makes the regional average precipitation

<sup>\*</sup> 天津市自然科学基金项目(17JCQNJC08200、16JCYBJC21500)、国家自然科学基金项目(41675018)和环渤海区域海洋气象科技协同创新基金重点项目(QYXM201901)共同资助

2019 年 1 月 25 日收稿; 2020 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者:李英华,主要从事城市气象数值模拟研究. E-mail:liyinghua05@163.com

通讯作者:邱晓滨,主要从事数值模拟及资料同化研究. E-mail:qiuxiaobin.tj@gmail.com

increased by about 25%. The increase of precipitation is related to the formation of more liquid water in convective clouds. The enhancement effect of aerosol is mainly manifested in enhancing the content of liquid water and ice phase substances in convective clouds. The increased liquid water is transported to a higher level by strong updraft and froze to form ice crystals. The increased latent heat release during this process can also enhance the ascending motion and eventually lead to the increase of total precipitation on the surface. In this experiment, the increase of aerosol concentration can increase the latent heating rate by  $110 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$ .

**Key words:** urban land surface, urban air pollution, local precipitation, WRF, numerical simulation

## 引言

城市的出现和发展,使得混凝土、沥青等建筑材料取代了自然植被,改变了地表能量平衡和大气边界层结构,引起了局地天气、气候及环境的变化(寿亦萱和张大林,2012;谈建国和顾问,2015)。Horton(1921)指出城市环境更容易触发暴雨,1971—1975年在圣路易斯地区开展的城市气象综合观测试验(Metropolitan Meteorological Experiment Project, METROMEX)结果证实,城市对暖季降水有增雨效应,在城区及其下风方向50~75 km处降水较背景值增多5%~25%,而且在这些地区雷暴发生频率可增多40%,持续的时间也增长(Changnon, 1979);研究还发现降水增加的范围和量级与城市规模相关(Changnon et al, 1981)。随后世界各地不断有新的观测(Shepherd et al, 2002; Mote et al, 2007; 江志红和唐振飞, 2011)和模拟结果(van den Heever and Cotton, 2007; 蒙伟光等, 2012; 陈卫东等, 2015)都发现了城市对降水的触发、强度及分布会产生一定影响。

大多数学者认为(Changnon et al, 1981; Shepherd, 2005)城市对降水的影响主要通过以下三个方面体现:城市热岛效应、城市地表特征和城市凝结核效应。城市热岛作为大气低层的热源促进了气层不稳定性的发展,有利于激发或增强对流降水,使得城市中心及其下风向地区降水增多(Han and Baik, 2008; 蒙伟光等, 2014)。城市地表较大的粗糙度产生的摩擦拖曳作用,减小了城区的平均风速,易引起低层气流从郊区向城区辐合,湿空气在上空堆积,容易发生强降水事件(Inamura et al, 2011; 徐蓉等, 2013);但城区的扩张又导致植被覆盖减少,从而减弱了地表蒸发及相应大气水分供应,形成城市干岛

并造成城区对流有效位能减少,不利于局地降水的发生、发展(张朝林等, 2007; 张珊等, 2015)。相对而言,城市大气污染对降水造成的可能影响目前还没有得到一致的结论,一些城市污染大气中云凝结核浓度增加后引起抢食水汽,导致小云滴数浓度增加,降低云滴的碰并增长,从而抑制暖云降水过程(Rosenfeld, 2000; 段婧和毛节泰, 2008);但却延长云滴在空中的滞留时间,如遇较强的上升气流,这些滞留的云滴被抬升到更高层冻结形成冰晶,此过程伴随的凝结潜热释放又可促进对流发展,最终使地面总降水增加(Andreae et al, 2004)。另一些城市受排放的大粒径污染物影响,云凝结核较大,大凝结核加速水滴碰并增长,有利于降水的生成(肖辉和银燕, 2011)。总的来说,污染物浓度增大对城市降水的影响受周围环境(湿度、风切变和热不稳定性)、云的类型及城市的地理位置等诸多因素的影响(Khain et al, 2005)。

天津地处渤海西岸,是我国快速发展的城市之一。陈彬和于恩洪(1989)、何群英等(2011)研究发现渤海湾海风锋对该地强降水有触发或加强作用,而京津城市效应影响海风的发展和向内陆推进,能够减缓海风的推进速度,增强海风环流强度(张亦洲等, 2013; 东高红等, 2018),热岛环流与海风环流相遇处迅速加强的辐合上升运动,能促进局地不稳定能量的释放,有利于强对流天气发生(东高红等, 2013; 2015),可见城市效应和海陆差异是该地对流天气频发的原因之一。以往研究大多侧重于城市热岛对局地降水的影响,尚未考虑城市气溶胶的影响,不能很好地分析整个城市发展对局地降水的影响。基于此,本文利用中尺度气象模式(WRF),对发生在天津城区及附近地区的一次局地强降水过程进行了模拟研究,以期了解城市地表特征和城市大气污染对局地对流降水的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 资 料

选取 2010 年 8 月 16 日的降水天气过程进行模拟研究,研究中使用的资料有常规观测资料、天津地区加密自动气象站观测资料、天津多普勒雷达资料、NCEP/NCAR 提供的  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料 FNL 以及中尺度模式 WRF 提供的气象场(模式简介见下文),其中自动站观测到的温度、风、降水等资料用来分析选取个例的观测特征,FNL 资料用来描述对流系统发展的天气尺度环流,WRF 模式提供气象场用于讨论分析城市环境对降水的影响。

### 1.2 研究方法

本文利用 WRF 3.8.1 模式进行模拟试验,模拟区域中心为  $39^\circ\text{N}$ 、 $117^\circ\text{E}$ ,水平分辨率为 2 km,格点数为  $551(\text{东西}) \times 486(\text{南北})$ ,模式层顶为 50 hPa,垂直分为 51 层,采用上疏下密分层。初始场和侧边界由 Global Forecast System(GFS)的预报场提供,模拟从 2010 年 8 月 16 日 08 时(北京时,下同)开始,积分 18 h,时间步长为 12 s。采用的物理参数化方案包括 RRTMG 长波/短波辐射方案、YSU 边界层方案、Monin-Obukhov 近地层方案、Noah 陆面方案,由于模式水平网格分辨率较细,未采用积云参数化方案。

为分析城市大气污染对降水的影响,采用 NS-SL 2-mon 微物理方案,该方案为双参数方案。方案中考虑了云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)的活化过程,活化过程主要发生在云底、云的侧边界,当凝结速率不足以维持云内过饱和度低于云底值时,云内也会发生核化。云滴粒子数浓度表示为:  $C_N = CkS_w^{k-1}V \cdot \nabla S_w$ ,其中  $C_N$ (单位:  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )为云滴粒子活化率,  $C$ (单位:  $\text{cm}^{-3}$ )为假定的 CCN 浓度,  $k$  为常数 0.6,  $V$ (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )为风速,  $S_w$ (单位: %)为对于水面的过饱和度。

文中假设大气气溶胶增加可导致云凝结核浓度增大,通过改变 NSSL 2-mon 方案中 CCN 浓度来分析气溶胶对降水的影响。所选降水过程当天,天津大气边界层观测站( $39.1^\circ\text{N}$ 、 $117.2^\circ\text{E}$ ,位于天津中心城区)观测到的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度日均值为  $57.36 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,相应空气质量指数为良(中华人民

共和国环境保护部,2012),该站观测到的气溶胶数浓度在  $188.92 \sim 2030.21 \text{ cm}^{-3}$ 。根据 Ramanathan et al(2001)的研究结论,整个大气中 30%~50%左右的气溶胶粒子能通过成核作用活化成云凝结核,考虑到气溶胶浓度随高度增加会减少,因此,用地面气溶胶浓度代替整层大气气溶胶浓度,可以近似估算出天津地区当天的 CCN 数浓度范围,最低值约为  $50 \sim 94 \text{ cm}^{-3}$ ,最高值约为  $600 \sim 1015 \text{ cm}^{-3}$ 。参考这一观测,设计了两类 CCN 浓度的敏感性试验,分别对应清洁大气(Urban-C)和污染大气(Urban-P),见表 1。

为考察城市地表对降水的影响,在清洁大气和污染大气的条件下,分别设计了 NoUrban-C 和 NoUrban-P 数值试验,主要是用农田替换原有试验中天津地区的城市建设用地,以消除城市地表的影响(图 1b)。研究中地表资料采用最新的 MODIS 21 种分类土地利用资料,图 1a 为天津地区的原始土地利用分类,可以看出天津大部分地区为农田,市区及沿海一带是城市与建设用地。

表 1 数值试验方案

Table 1 Numerical experiment schemes

模拟试验名称	下垫面	CCN/ $\text{cm}^{-3}$
城市清洁型(Urban-C)	城市	50
城市污染型(Urban-P)	城市	600
非城市清洁型(NoUrban-C)	农田	50
非城市污染型(NoUrban-P)	农田	600

## 2 个例实况分析

### 2.1 天气尺度环流

个例选取于 2010 年 8 月 16 日 15—20 时,是一次局地降水天气过程。高空形势分析表明 14 时(图 2)500 hPa 高度上高空槽东移到天津至安徽一带,天津地区正好处于槽区,700 hPa 已处于槽后西北气流,850 hPa 为东移入海弱反气旋后部的偏南气流,对应地面天津由 08 时的弱气压场静风转为高压后部偏南气流影响。对流有效位能和地面抬升指数变化显示(图 2 阴影),08—14 时天津地区的对流有效位能迅速增大到  $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上,地面抬升指数降至  $-4 \text{ K}$  以下,说明该地午后大气层结逐渐变得不稳定。对流正是在这样一个低空槽后弱反气旋条件下发生在天津中心城区及附近。

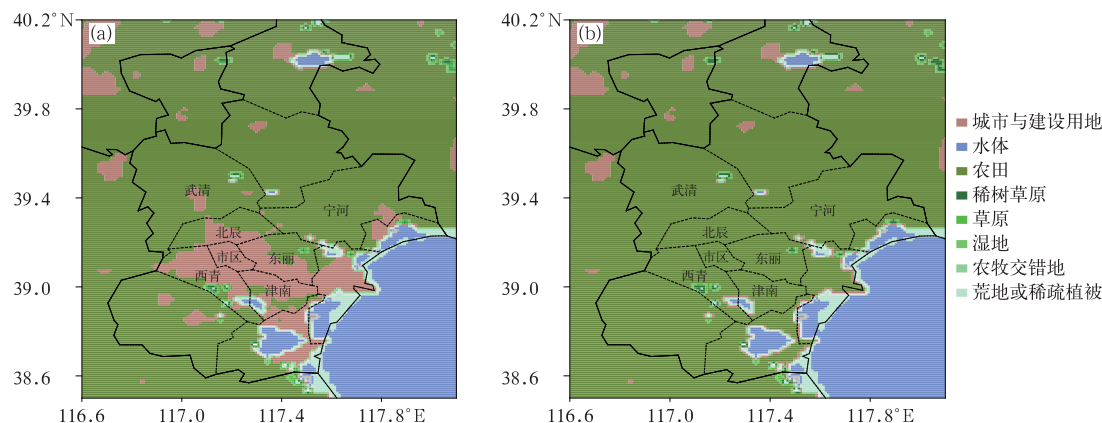


图 1 城市地表(a)和非城市地表(b)的天津地表类型分布

Fig. 1 Distribution of urban surface (a) and non-urban surface (b) of Tianjin surface types

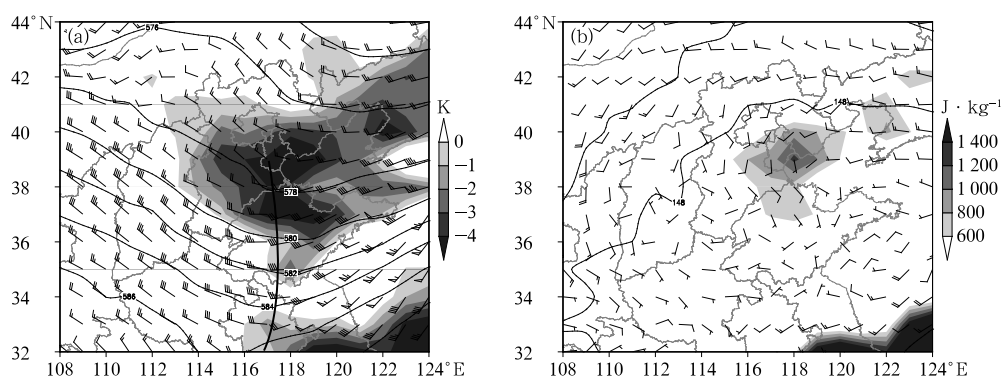
图 2 2010 年 8 月 16 日 14 时(a)500 hPa 形势场(等值线,单位:dagpm;阴影:抬升指数),  
(b)850 hPa 形势场(等值线,单位:dagpm;阴影:对流有效位能)

Fig. 2 Isobaric circulation at 14:00 BT 16 August 2010

(a) 500 hPa (contour line, unit: dagpm; shaded areas: lift index),

(b) 850 hPa (contour line, unit: dagpm; shaded areas: convective available potential energy)

## 2.2 对流系统发展

由天津逐时加密自动气象站观测资料分析的地面温度场和风场看到,至 16 日 13 时(图 3a)由于地表升温导致的城市热岛特征变得明显,并造成局地流场发生改变而在天津城区北部至宁河一带形成 NW—SW 风的中尺度辐合带。沿海站点 11 时转为东南风,之后风速有所加大并持续向内陆推进,至 13 时在离海岸线约 20 km 处形成一 SW—SE 风的辐合线,随后辐合线向西移动,并于 16 时左右与城区的辐合线相遇(图 3b)。对应时间段的雷达回波观测显示,对流系统 15 时开始发展于天津市东面,之后向西移动,16 时移到天津市区附近时,回波范围扩大,强度迅速增强,中心最强达到 50 dBz(图 3b)。从对流发展旺盛时段(16—17 时)雷达回波沿 39.1°N 的纬向垂直剖面(图略)发现回波顶伸

展到 10 km,对流发展的比较高。受这一对流系统影响,15 时降水先出现在天津城区东面郊区,后向西移至城区时雨强突然加强,造成天津城区部分地区出现  $29.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的短时强降水,整个过程单站强降水主要集中在 1~2 h,过程累积降水量在 20 mm 以上的区域仅集中于市区及东丽部分地区(图 4a)。观测分析表明,城市环境对降水的加强有明显的影 响,具体影响需要通过数值敏感性试验进一步讨论和研究。

## 3 城市环境对降水的影响

### 3.1 模拟与观测对比

降水当天空气质量良好,选取城市清洁型大气试验(Urban-C)的模拟值和实况进行对比,从逐时

降水来看(图略),模拟雨区是自东向西移动,降水从15时开始,19时结束,区域强降水集中在1~2 h,模拟降水的发展及落区与实况基本接近,但模拟降水量偏小。分析模式模拟的地面逐时风温场(图略)及天津地区沿海A点和城区附近B点的10 m风羽序列、2 m温度差(图5b),发现WRF模拟要素场能较好地反映天津城区及附近热岛特征的出现、加强,以及因此引起的地面风场辐合(图5a),尽管A、B两

点的风向与实况相比,部分时次有 $15^{\circ}$ 左右的偏差,温差较实况小,但风向和温差变化趋势与实况基本一致,模拟值能反映出沿海东南风的出现(A点13时转为东南风,实况略滞后)、向内陆推进(B点17时转为东南风)及与城区附近地面辐合线的相遇(图5a)。总体来看,WRF模拟结果与实况接近,基于此进行的数值敏感性试验可用来分析城市环境对降水的影响。

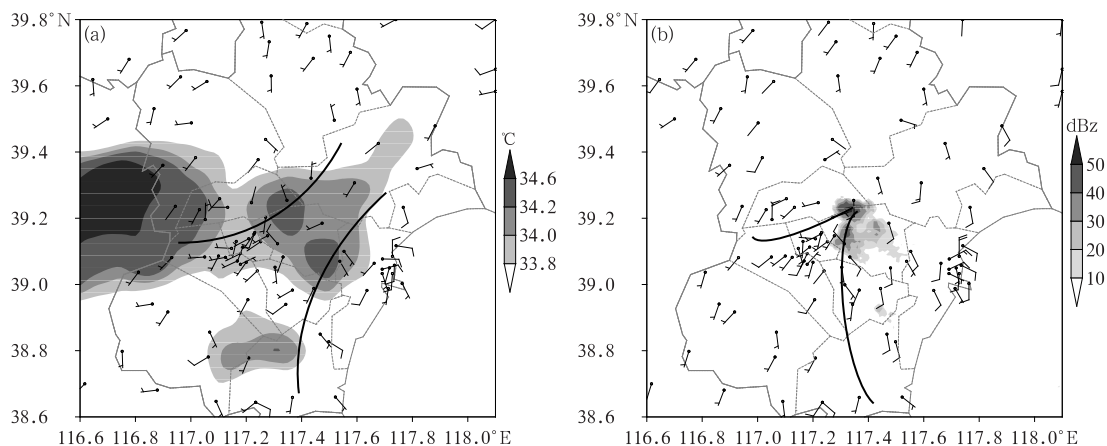


图3 2010年8月16日地面自动气象站观测要素场

(a)13时风场、温度场(阴影),(b)16时风场、雷达回波反射率因子(阴影)

Fig. 3 Meteorological elements from automatic weather station on 16 August 2010

(a) wind filed, temperature filed (shaded) at 13:00 BT,

(b) wind filed, radar echo reflectivity (shaded) at 16:00 BT

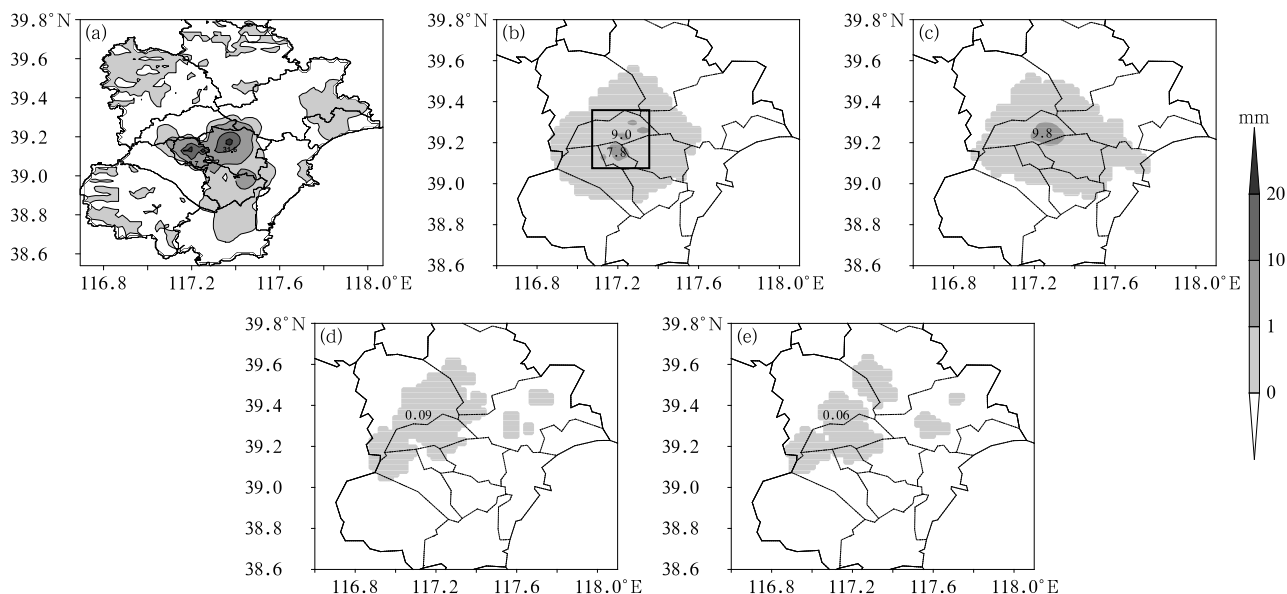


图4 2010年8月16日14—20时不同试验模拟的6 h累积降水量分布

(a)实况,(b)Urban-C(矩形区为文中定义的降水集中区),(c)Urban-P,(d)NoUrban-C,(e)NoUrban-P

Fig. 4 The 6 h accumulated precipitation during 14:00–20:00 BT 16 August 2010 simulated in different experiments

(a) observation, (b) Urban-C (Rectangular area is the main convection zone defined in the paper),

(c) Urban-P, (d) NoUrban-C, (e) NoUrban-P

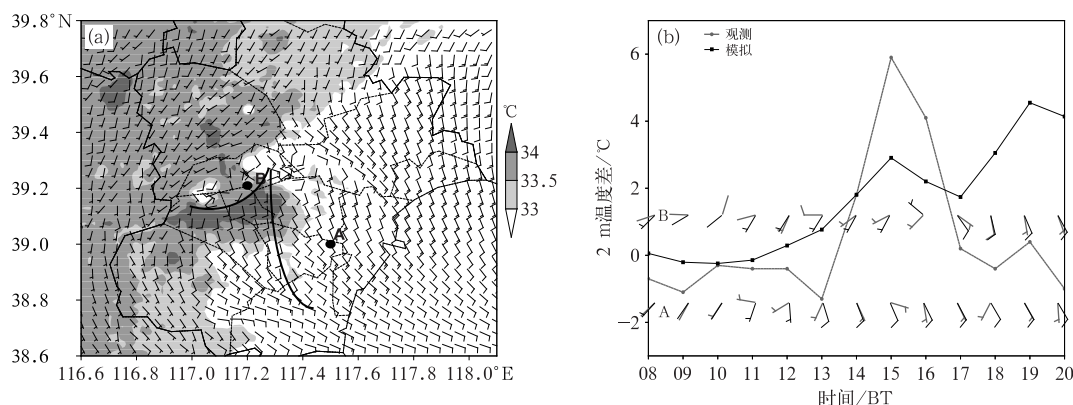


图 5 2010 年 8 月 16 日(a)16 时地面风场和温度场(阴影)和(b)图 5a 中 A、B 两点 10 m 风羽序列和 2 m 温度差的 Urban-C 试验模拟地面要素场

Fig. 5 Simulated meteorological elements from Urban-C Experiment

(a) wind field, temperature field (shaded) at 16:00 BT, (b) wind barb series at 10 m of A and B in Fig. 5a and temperature difference between A and B at 2 m on 16 August 2010

图 4 给出了降水时段(14—20 时)实况和四个数值试验的累积降水量分布,尽管四个试验模拟的降水量均偏小,但其落区与实况基本一致,降水主要集中在天津城区及附近地区。其中 Urban-C 试验(图 4b)模拟的降水中心与实况最接近,天津城区及附近郊区的降水中心均有体现,城区降水中心和实况接近,附近郊区的降水中心略偏西;Urban-P 试验漏报了天津城区的降水中心,仅模拟出了天津城区东部的降水中心,位置略偏西;NoUrban-P 和 NoUrban-C 试验模拟的降水落区和强度基本一致,雨区较小且向西北偏离城区,强度较弱。四个数值试验相比,同样是污染大气或清洁大气,当去除城市地表影响后降水落区和强度均发生了改变。

从图 4 观测和模拟的降水分布可以看出,降水

主要发生在市区、东丽、津南等地,因此,进一步分析城市环境对降水集中区内(见图 4b,  $39.1^{\circ}\sim 39.32^{\circ}\text{N}$ 、 $117.1^{\circ}\sim 117.4^{\circ}\text{E}$ )降水的影响。从该区域的平均降水量(图 6a)来看,城市污染大气使得区域平均降水量增大约 0.18 mm,增加约 25%。降水强度(图 6b)显示,除 NoUrban-C 试验外,其他三个试验降水开始时间均为 15 时,Urban-C 试验模拟的降水从第二个时刻就增强,降水于 19 时结束;Urban-P 试验模拟的降水从第三个时刻开始增强,且小时最大降水强度较 Urban-C 减弱 0.06 mm,减弱约 15%,降水于 20 时结束,Urban-C 和 Urban-P 试验模拟的强降水时间均为 3 h;NoUrban-P 和 NoUrban-C 试验模拟的降水一直没有增强,过程降水量很小,降水于 18 时提前结束。

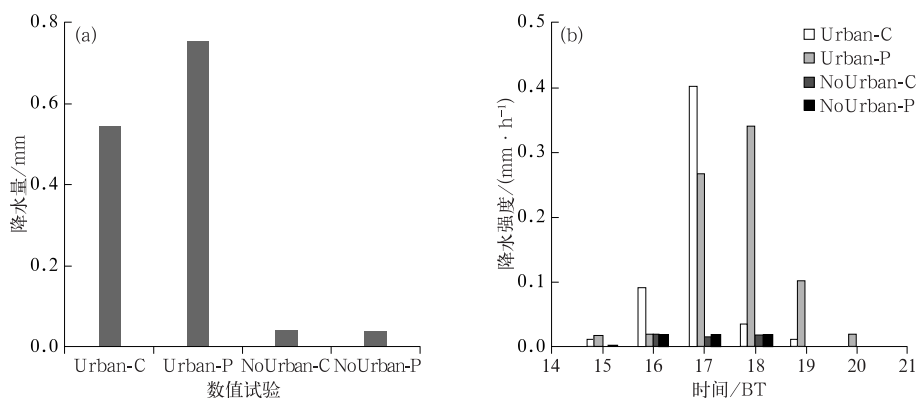


图 6 2010 年 8 月 16 日不同试验模拟的区域平均降水量(a)和降水强度(b)

Fig. 6 Regional average rainfall (a) and rainfall intensity (b) simulated in different experiments on 16 August 2010



对比分析看出,此次降水过程中气溶胶浓度增大后,降水延迟 1 h 增强,降水的持续时间延长 1 h,小时最大降水强度也有所减弱;而去除城市地表影响后,同样是污染大气,平均降水量却很小。这反映出城市地表影响了本次对流降水的发生及落区,而城市气溶胶则主要影响对流发展后的降水强度、持续时间及降水量。四个数值试验模拟结果的差别说明城市环境对局地降水有较大的影响,下文将分别讨论城市地表和城市气溶胶浓度对降水的影响。

### 3.2 城市地表的影响

由以上分析看出,污染大气和清洁大气在去除城市地表后,降水强度和落区变化相似,故本节只选取有无城市地表的污染型大气试验做分析。对比 Urban-P 和 NoUrban-P 试验模拟的地面要素场(10 m 风、2 m 温度、比湿)的逐时演变(图 7),可以看到城市地表的存在使得天津城区及附近的温度比周边高,湿度比周边低,形成了一个比较明显的热岛、干岛。Urban-P 试验中 13 时城区热岛特征开始变得明显,随后热岛逐渐增强,至 15 时(图 7a)发展最强盛,热岛中心位于天津市区及周边西青、东丽、北辰等部分地区,强度达到  $3^{\circ}\text{C}$ (图 5 中 A、B 两点温度差),16 时降水加强后热岛范围有所缩小(图 7a 和 7b)。两个试验模拟结果的差异(图 7c 和 7d)表明天津城区是差异最大区,降水开始时城区比湿差达到  $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,温度差达到  $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ ,这说明了城市地表对近地层温度和湿度场造成了很大影响。

沿  $39.2^{\circ}\text{N}$  做垂直速度和流场、辐合辐散的垂直剖面,发现 13 时开始 Urban-P 试验在天津城区和东部沿海海风环流前沿均有明显的辐合上升运动(图略),随着城区热岛的发展,热岛环流明显增强,至 16 时(图 8a)最大上升速度达到  $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,上升高度延伸至 500 hPa 附近,低层辐合达到  $-70\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ (图略)。而无城市地表时(NoUrban-P 试验),城区附近上空没有出现垂直上升运动,仅在天津东部沿海存在海风环流。

两个试验中天津东部沿岸的海风环流在向内陆推进过程中逐渐增强, Urban-P 试验中 16 时(图 8a)环流移至城区东部,前沿上升速度加大到  $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,上升高度伸展至 725 hPa 附近,17 时(图 8c)海风环流与热岛环流在城区相遇,两环流的辐合上升区合并且迅速增强,此时上升速度为  $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,上升高度向上伸展至 620 hPa 附近,低层

辐合达到  $-200\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,相应高层辐散为  $150\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ (图略),18 时环流移动至天津西部,城区及其附近完全受偏东风的影响。NoUrban-P 试验中环流于 15 时就已到达城区,此时前端上升速度仅加大到  $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,上升高度在 700 hPa 附近,16 时(图 8b)环流移至城区西部,强度略有减弱,17 时(图 8d)海风达到天津西部,在整个海风推进过程中,其前沿辐合上升运动较弱,低层辐合在  $-80\times 10^{-5}\sim -60\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,辐合区的高度一直在 850 hPa 以下(图略)。

对比分析两个试验的海风推进速度和环流的强度,发现有城市地表时海风环流推进较慢、强度相对较强,当海风环流和热岛环流相遇叠加后,风场的水平辐合和垂直上升均迅速加强,模拟的降水和回波在此时开始增强,可见对流正是在两环流耦合加强后发展起来的,说明城市地表直接影响对流的形成及发展位置。

### 3.3 城市气溶胶的影响

Urban-C 和 Urban-P 试验模拟的降水集中区最大上升速度随时间变化(图 9a)显示,降水开始时(15 时)两个试验的最大上升速度相比不大,分别为  $1.3$  和  $1.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,随着对流的发展,污染大气环境中最大上升速度增大较快,至对流发展旺盛时(17 时),Urban-P 试验模拟的最大上升速度为  $8.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而 Urban-C 试验模拟的最大上升速度仅为  $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这可能是在城市污染情况下的对流发展过程中,云滴含量增多致使凝结增长加强,释放更多的凝结潜热,促进上升气流发展。从两个试验模拟的降水集中区潜热加热率差异来看,对流发展初期,潜热加热差最大为  $9.1\text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ ,大值中心在 700 hPa 附近,之后最大加热差异区迅速上升且差值快速增大,至 17 时差异大值区上升至 500 hPa,中心值高达  $110\text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ ,且与上升运动差值最大中心对应(图 9b)。

从降水集中区平均水凝物整层含量随时间的变化看出(图 10),两个试验大气中水汽含量相对来说差异不大。对流发展初期(16 时)Urban-C 试验模拟的雨水含量大,达到  $0.24\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,明显高于 Urban-P 试验,后期迅速减小,二者的对比差异也与降水时序差异一致(图 6b)。两个试验的云水含量在 16 时相差不大,分别为  $0.18$  和  $0.23\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,随着对流的发展 Urban-P 试验中形成了更多的云

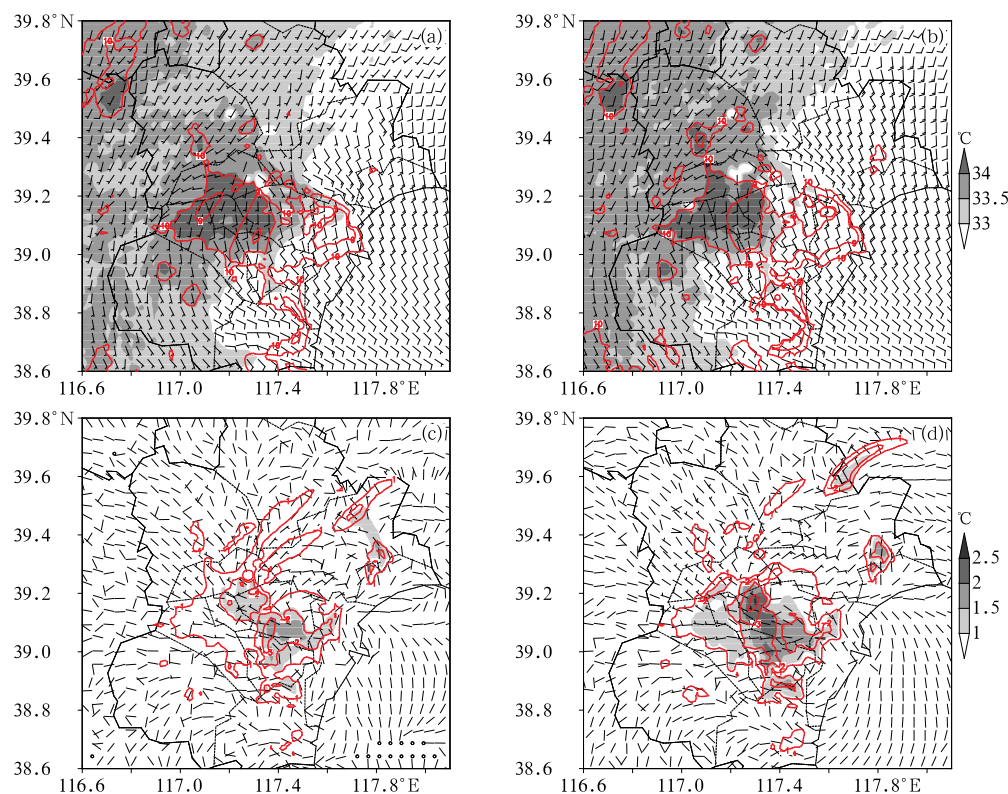


图 7 2010 年 8 月 16 日 15 时(a,c)和 16 时(b,d)的 2 m 温度(阴影)、  
比湿(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、10 m 风(风羽)

(a,b)Urban-P 模拟值,(c,d)Urban-P 和 NoUrban-P 模拟结果差异

Fig. 7 The 2 m temperature (shaded), 2 m specific humidity (contour line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  
10 m wind (barb) at 15:00 BT (a, c) and 16:00 BT (b, d) 16 August 2010  
(a, b) simulated by Urban-P experiments,  
(c, d) differences between Urban-P and NoUrban-P

水物质。另外,整个对流降水时段污染大气环境中(Urban-P)有更多的云冰、雪、霰等冰相物质形成,其中含量最高的是霰,最多时为  $0.085 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,雪的含量次之,最多时为  $0.06 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,冰的含量最小,最多时为  $0.006 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。出现这种现象可能是对流发展初期,污染大气中增多的云粒子浓度引起争夺水汽源,不易形成雨滴,而随着对流的发展,这些增多的云滴通过碰撞增长引起云中液态水含量增多,其中 Urban-P 试验中最大时云水含量为  $0.43 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,Urban-C 试验最大仅为  $0.18 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,云水含量增多 58%,雨水含量也增多 38%左右。

图 11 是对流发展旺盛时(17 时)降水集中区平均水凝物垂直分布,可以看到,大气气溶胶浓度对云

中水凝物的垂直分布有明显的影响,Urban-P 试验中在冻结层( $0^\circ\text{C}$ 层)上下都有更多的液态水物质,尤其是云水含量是清洁大气(Urban-C 试验)的 15 倍。这些增多的云水和雨水物质被强的上升气流抬升到高层,致使更多的冰相物质在对流发展过程中形成,因此霰主要位于  $700 \sim 400 \text{ hPa}$  高度层,雪和冰晶则在更高的位置。

由以上分析推测,污染大气环境下,对流云中形成的更多液态水及冰晶物质影响了降水的增多。对流云中增多的液态水物质被强的上升气流抬升到较高处冻结形成更多的冰晶物质,并伴随凝结潜热释放,增多的潜热又可促进上升运动的增强,使得对流发展维持,进而使地面总降水增多。



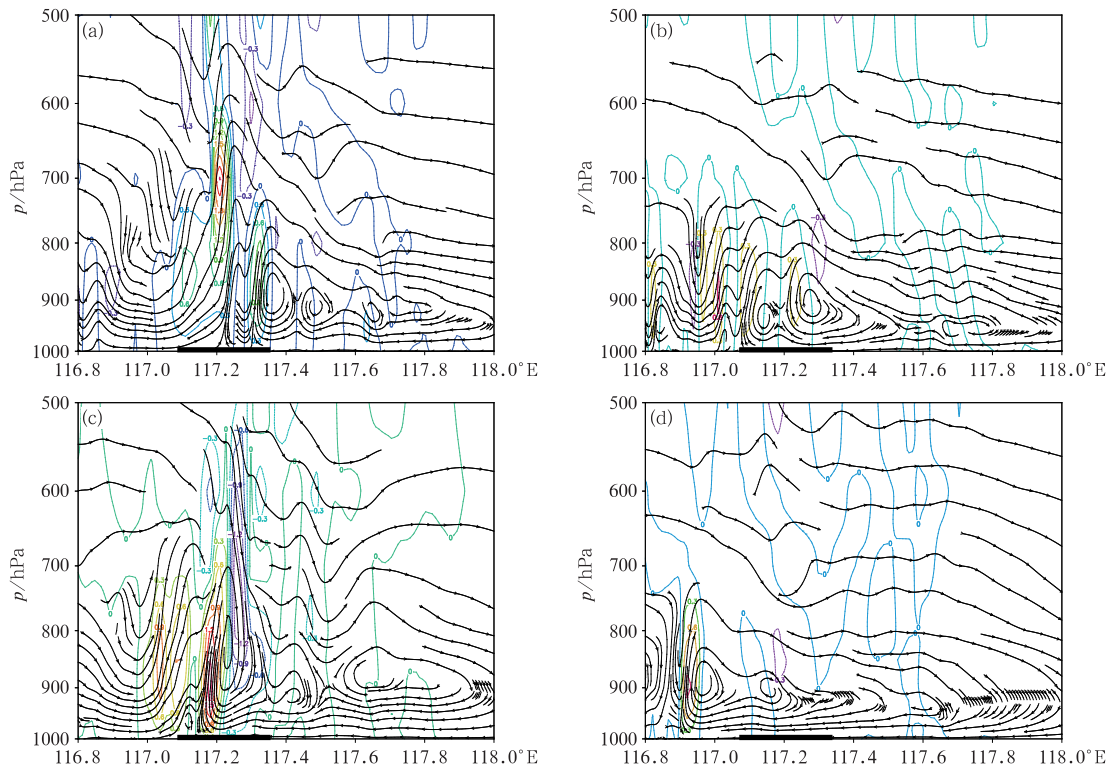


图 8 2010 年 8 月 16 日 16 时(a,b)和 17 时(c,d)的 Urban-P(a,c)和 NoUrban-P(b,d)模拟的纬向流场和垂直速度(彩色等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(黑色粗线:城区)

Fig. 8 Simulated zonal stream and vertical velocity (colored contour line, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
by Urban-P (a, c) and NoUrban-P (b, d) at 16:00 BT (a, b)  
and 17:00 BT (c, d) 16 August 2010  
(black thick line: urban area)

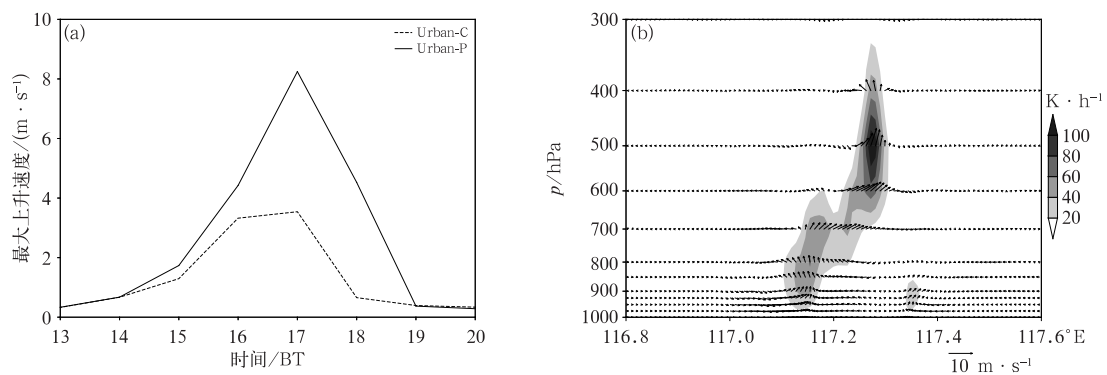


图 9 2010 年 8 月 16 日降水集中区最大上升速度(a)和 17 时两组试验模拟的凝结潜热加热率差(阴影)及垂直流场差垂直剖面(b)

Fig. 9 Simulated maximum vertical velocities (a) and latent heating difference (shaded) and vertical stream field difference at 17:00 BT (b)  
in precipitation concentration area on 16 August 2010

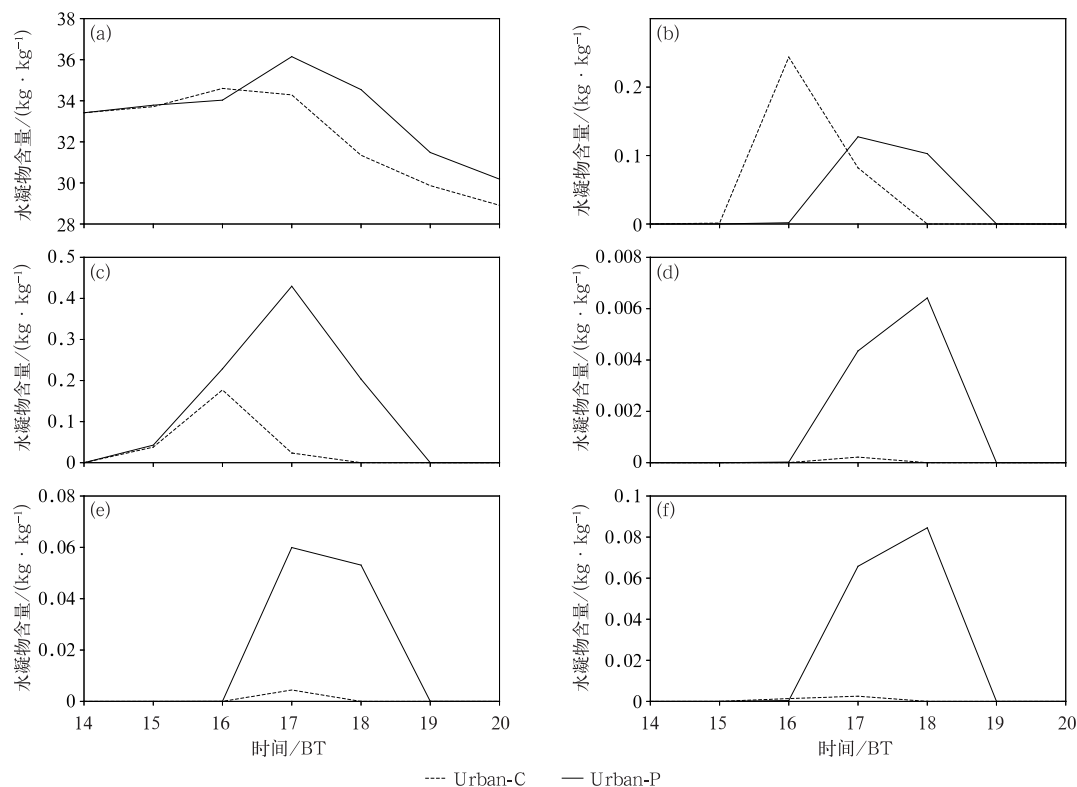


图 10 2010 年 8 月 16 日降水集中区平均水凝物整层含量随时间变化

(a) 水汽, (b) 雨水, (c) 云水, (d) 冰晶, (e) 雪, (f) 霰

Fig. 10 The whole layer of averaged hydrometeors in the main precipitation zone changed with times on 16 August 2010

(a) water vapor, (b) rain water, (c) cloud water, (d) ice crystal, (e) snow, (f) graupel

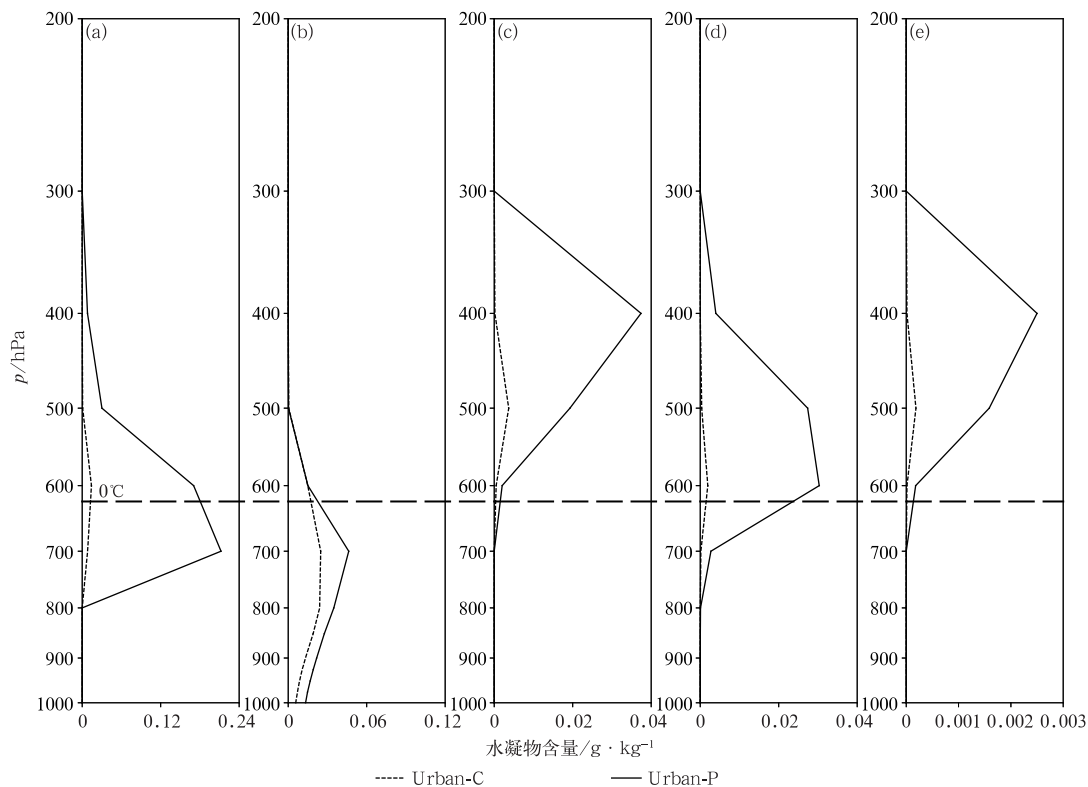


图 11 2010 年 8 月 16 日 17 时降水集中区平均水凝物垂直分布

(a) 云水, (b) 雨水, (c) 雪, (d) 霰, (e) 冰晶

Fig. 11 Vertical distribution of averaged hydrometeors in the main precipitation zone at 17:00 BT 16 August 2010

(a) cloud water, (b) rain water, (c) snow, (d) graupel, (e) ice crystal

## 4 结论与讨论

针对城市发展对沿海局地降水产生的可能影响,本文通过数值敏感性试验结合自动站观测资料,对一次发生在天津城区及附近地区的降水天气过程进行了模拟研究,重点探讨了城市地表及城市大气污染对降水发生发展的影响。主要结论如下:

(1)城市地表可引起城市热岛和干岛,形成热岛环流,进而减缓海风环流推进速度,并加强海风环流,海风环流叠加城市热岛效应后,改变辐合线的位置及强度,直接影响对流降水的发生及落区。无城市地表时,同样是污染大气环境,模拟降水落区偏离主要城区,强度较弱且雨区小。

(2)城市大气污染状况可影响对流发展后的降水强度、持续时间及降水量。同样城市地表条件下,气溶胶浓度的增大延迟了降水的增强,减弱小时最大降水强度,延长降水的持续,最终使得模拟区域降水量增加约25%。

(3)污染大气环境形成的更多液态水和冰相物质影响了降水的增多。降水集中区各类水凝物整层含量表明,污染大气使得云水含量最大时可增多58%左右,雨水含量也达到38%左右,位于冻结层(0℃)附近增多的云水被强的上升气流抬升到较高处冻结形成冰晶,并伴随凝结潜热释放,最大潜热加热率差可达 $110\text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ ,增多的潜热又可促进上升运动的增强,使得对流得以持续,进而导致地面总降水增多。

本次的研究只是针对个例的模拟分析,城市大气污染对降水影响的模拟只是在假定云凝结核浓度变化的前提下进行的,没有考虑气溶胶的时空变化及输送情况,得到的结论是初步的,有待后续更多个例验证。

## 参考文献

- 陈彬,于恩洪,1989.渤海湾西部海陆风的天气气候特征[J].海洋通报,8(1):23-29. Chen B, Yu E H, 1989. The weather and climate characteristics of the sea land breeze in the western Bohai Bay [J]. Mar Sci Bull, 8(1):23-29(in Chinese).
- 陈卫东,付丹红,苗世光,等,2015.北京地区城市环境对云和降水影响的个例数值模拟研究[J].地球物理学进展,30(3):983-995. Chen W D, Fu D H, Miao S G, et al, 2015. Numerical simulation of urban environment impacts on clouds and precipitation in Beijing[J]. Prog Geophys, 30(3):983-995(in Chinese).
- 东高红,李英华,刘一玮,等,2018.天津城市热岛效应对海风(锋)环流影响的数值模拟试验[J].气象,44(6):825-836. Dong G H, Li Y H, Liu Y W, et al, 2018. Numerical simulation test of Tianjin urban heat island effect on sea breeze(front) circulation[J]. Meteor Mon, 44(6):825-836(in Chinese).
- 东高红,刘一玮,孙蜜娜,等,2013.城市热岛与海风锋叠加作用对一次局地强降水的影响[J].气象,39(11):1422-1430. Dong G H, Liu Y W, Sun M N, et al, 2013. Effect of urban heat island and sea breeze front superimposition on a local heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 39(11):1422-1430(in Chinese).
- 东高红,尉英华,解以扬,等,2015.天津地区城市热岛环流与海风环流相互作用的研究[J].气象,41(12):1447-1455. Dong G H, Wei Y H, Xie Y Y, et al, 2015. Research on the interaction of Tianjin urban heat island circulation and sea breeze circulation [J]. Meteor Mon, 41(12):1447-1455(in Chinese).
- 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 J, Mao J T, 2008. Aerosols impact on regional precipitation over North China[J]. Chin Sci Bull, 53(23):2947-2955(in Chinese).
- 何群英,解以扬,东高红,等,2011.海陆风环流在天津2009年9月26日局地暴雨过程中的作用[J].气象,37(3):291-297. He Q Y, Xie Y Y, Dong G H, et al, 2011. The role of sea-land breeze circulation in local convective torrential rain happening in Tianjin on 26 September 2009[J]. Meteor Mon, 37(3):291-297(in Chinese).
- 江志红,唐振飞,2011.基于CMORPH资料的长三角城市化对降水分布特征影响的观测研究[J].气象科学,31(4):355-364. Jiang Z H, Tang Z F, 2011. Urbanization effects on precipitation over the Yangtze River Delta based on CMORPH data[J]. J Meteor Sci, 31(4):355-364(in Chinese).
- 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. Meng W G, Li H R, Zhang Y X, et al, 2012. A modeling study of the impacts of Pearl River Delta urban environment on convective precipitation [J]. Chin J Atmos Sci, 36(5):1063-1076(in Chinese).
- 蒙伟光,郑艳萍,王宝民,等,2014.热岛与海风相互作用对珠三角午后强降水影响的观测和模拟研究[J].热带气象学报,30(6):1011-1026. Meng W G, Zheng Y P, Wang B M, et al, 2014. Observational and numerical study of impacts of interactions between heat island and sea-breeze on the late-afternoon severe precipitation over Pearl River Delta[J]. J Trop Meteor, 30(6):1011-1026(in Chinese).
- 寿亦萱,张大林,2012.城市热岛效应的研究进展与展望[J].气象学报,70(3):338-353. Shou Y X, Zhang D L, 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):338-353(in Chinese).
- 谈建国,顾问,2015.城市化降水效应研究进展[J].气象科技进展,5(6):17-22. Tan J G, Gu W, 2015. Research progress on urban-induced rainfall effect[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(6):17-22(in Chinese).

- 肖辉,银燕,2011. 污染气溶胶对山西一次降水过程影响的数值模拟[J]. 大气科学, 35(2): 235-246. Xiao H, Yin Y, 2011. A numerical study of polluted aerosol effects on precipitation in Shanxi Province[J]. Chin J Atmos Sci, 35(2): 235-246(in Chinese).
- 徐蓉,苗峻峰,谈哲敏,2013. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟[J]. 大气科学, 37(6): 1235-1246. Xu R, Miao J F, Tan Z M, 2013. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface characteristics on thunderstorm in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci, 37(6): 1235-1246(in Chinese).
- 张朝林,苗世光,李青春,等,2007. 北京精细下垫面信息引入对暴雨模拟的影响[J]. 地球物理学报, 50(5): 1373-1382. Zhang C L, Miao S G, Li Q C, et al, 2007. Impacts of fine-resolution land use information of Beijing on a summer severe rainfall simulation[J]. Chin J Geophys, 50(5): 1373-1382(in Chinese).
- 张珊,黄刚,王君,等,2015. 城市地表特征对京津冀地区夏季降水的影响研究[J]. 大气科学, 39(5): 911-925. Zhang S, Huang G, Wang J, et al, 2015. Impact of urban surface characteristics on summer rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei Area[J]. Chin J Atmos Sci, 39(5): 911-925(in Chinese).
- 张亦洲,苗世光,戴永久,等,2013. 北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟[J]. 地球物理学报, 56(8): 2558-2573. Zhang Y Z, Miao S G, Dai Y J, et al, 2013. Numerical simulation of characteristics of summer clear day boundary layer in Beijing and the impact of urban underlying surface on sea breeze[J]. Chin J Geophys, 56(8): 2558-2573(in Chinese).
- 中华人民共和国环境保护部,2012. 环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行): HJ633-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社. People's Republic of China Ministry of Environmental Protection, 2012. Technical Regulation on Ambient Air Quality Index (on trial) HJ633-2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press(in Chinese).
- Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al, 2004. Smoking rain clouds over the Amazon[J]. Science, 303(5662): 1337-1341.
- Changnon S A Jr, 1979. Rainfall changes in summer caused by St. Louis[J]. Science, 205(4404): 402-404.
- Changnon S A, Semonin R G, Auer A H, et al, 1981. METROMEX: a review and summary[J]. Boston: American Meteorological Society.
- Han J Y, Baik J J, 2008. A theoretical and numerical study of urban heat island-induced circulation and convection[J]. J Atmos Sci, 65(6): 1859-1877.
- Horton R E, 1921. Thunderstorm-breeding spots[J]. Mon Wea Rev, 49(4): 193.
- Inamura T, Izumi T, Matsuyama H, 2011. Diagnostic study of the effects of a large city on heavy rainfall as revealed by an ensemble simulation: a case study of central Tokyo, Japan[J]. J Appl Meteor, 50(3): 713-728.
- 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.
- Mote T L, Lacke M C, Shepherd J M, 2007. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: a case study for Atlanta, Georgia[J]. Geophys Res Lett, 34(20): L20710.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al, 2001. Aerosols, climate and the hydrological cycle[J]. Science, 294(5549): 2119-2124.
- Rosenfeld D, 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution[J]. Science, 287(5459): 1793-1796.
- Shepherd J M, 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future[J]. Earth Interact, 9(12): 1-27.
- Shepherd J M, Pierce H, Negri A J, 2002. Rainfall modification by major urban areas: observations from space borne rain radar on the TRMM satellite[J]. J Appl Meteor, 41(7): 689-701.
- van den Heever S C, Cotton W R, 2007. Urban aerosol impacts on downwind convective storms[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(6): 828-850.