

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. 气象, 39(11):1422-1430.

# 城市热岛与海风锋叠加作用对 一次局地强降水的影响<sup>\*</sup>

东高红<sup>1</sup> 刘一玮<sup>1</sup> 孙蜜娜<sup>1</sup> 戴云伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 天津市气象台,天津 300074

<sup>2</sup> 中国气象局气象影视中心,北京 100081

**提 要:** 利用常规观测资料、天津 255 m 气象塔资料、多普勒雷达资料和 VDRAS 反演资料及中尺度 TJ-WRF 模式输出资料,对 2010 年 8 月 16 日天津城区出现的一次局地强降水过程进行分析,重点分析了城市热岛与海风锋叠加作用对此次局地强降水的触发机制。结果表明:此次局地强降水发生在低层槽后弱的反环流条件下,具有明显的  $\gamma$  中尺度对流降水特征;城市热岛效应能造成局地的热力不均匀,这对形成地面中尺度辐合线非常有利。海风锋由岸边向市区移动中与中尺度辐合线相遇,能激发局地不稳定能量的释放,从而产生强对流天气。城市热岛对海风锋的移动有明显阻挡作用;当海风锋移到城市热岛效应明显区域附近时,其后侧气流会出现明显分支绕流和爬升现象,而且两者相遇处的辐合上升运动会迅速加强,这为该地不稳定能量的释放及雷暴的发生发展提供了有利的动力热力条件。中尺度 TJ-WRF 模式可以很好地模拟出这一现象。

**关键词:** 城市热岛, 海风锋, 局地强降水, 中尺度 TJ-WRF 模式

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 11. 005

## Effect of Urban Heat Island and Sea Breeze Front Superimposition on a Local Heavy Rainfall

DONG Gaohong<sup>1</sup> LIU Yiwei<sup>1</sup> SUN Mina<sup>1</sup> DAI Yunwei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

<sup>2</sup> Huafeng Meteorological Media Group, CMA, Beijing 100081

**Abstract:** Using the data obtained by conventional observations, the data collected at a 255 m tower during an atmospheric boundary layer experiment in Tianjin, Doppler radar observations, VDRAS data and mesoscale TJ-WRF model data, we analyze the heavy rainfall which occurred on 16 August 2010 in the urban area of Tianjin and highlight the superimposition of urban heat island and sea breeze front and trigger mechanism of local heavy precipitation caused by it. The results show that the local severe precipitation occurs under weak anti-circulation conditions after low-level trough, and precipitation has obvious characteristics of meso- $\gamma$ -scale convection. Urban heat island effect can cause uneven distribution of local thermal, which is very favorable for the formation of the ground mesoscale convergence line. When moving from the shore to the urban, the sea breeze front encounters the ground mesoscale convergence line, being able to stimulate the local unstable energy release and resulting in severe convective weather. Urban heat island can block the movement of the sea breeze front. When the sea breeze front moves near the area with obvious urban heat island effect its rear airflow will be changed into branch flows, climbing. Meanwhile in the meeting place, the convergence and upward motion get strengthened rapidly, providing favorable dynamic

\* 北京城市所基金课题(UMRF201008)、国家科技支撑计划重点项目(2008BAC37B01, 2008BAC37B05), 中央级公益性科研院所专项(IUMKY201002)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006005)共同资助

2012 年 5 月 18 日收稿; 2013 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者:东高红,主要从事雷达气象及天气预报技术研究. Email:qwerty8825@sina.com

and thermodynamic conditions for unstable energy to release and thunderstorm to develop. The mesoscale TJ-WRF model can simulate this phenomenon very well.

**Key words:** urban heat island, sea breeze front, local severe precipitation, mesoscale TJ-WRF model

## 引 言

随着经济发展和城市化进程的加快,突发性、局地性强的异常天气事件越来越多地出现在一些大城市中,如 2001 年 8 月 5 日上海强降水(曹晓岗等, 2011)、2004 年 7 月 10 日北京局地强降水(孙继松等, 2006)等。有研究表明,城市热岛效应不仅造成城市及其周边地区气温的升高,还可能通过流场的作用,对冬夏季降水过程产生影响。Daniel(2000)研究认为,城市热岛效应将造成城市下游降水增加;毕宝贵等(2004)的研究指出城市化过程造成的地表特征变化也有可能对降水过程产生较大影响;孙继松(2005)、孙继松等(2007)针对北京地区,分析了地形与城市热岛及下垫面物理属性造成的热力差异对不同天气过程的作用。Thielen 等(2000)的数值试验表明,城市地表的感热通量、特别是降水发生前 4 h 内的感热通量变化对  $\gamma$  中尺度的对流降水有重要影响。Chen 等(2000)通过观测研究表明,在周边地区气温变冷的情况下,随着城市群的发展,长江三角洲地区的气温在迅速变暖;与此同时,该地区呈现出降水量增加的趋势。苗曼倩等(1998)通过数值模拟证实,长江三角洲地区的海(江、湖)风环流与城市热岛效应之间存在相互增强的过程。蒙伟光等(2007)则研究了城市化对珠江三角洲强雷暴天气的影响,他们的数值试验表明,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。

天津作为沿海大城市,随着经济发展和环渤海经济新区的开发建设,城区范围不断扩大、城市建筑群迅速增多,城市热岛也展现了扩大的趋势;同时天津地处渤海西岸,受海陆风环流的影响明显,地形地貌及下垫面不均匀性的差异使得天津降水的特征与北京等地有明显不同。已有统计表明,近十年来,天津地区出现的局地强降水次数和降水的强度明显高于北京及河北等地。针对北京地区近年来出现的局地强降水天气过程,孙继松等(2006)通过个例分析指出,城市与郊区下垫面物理属性造成的热力差异利于城市中尺度低空风场辐合线的形成、同时还可能造成边界层内中心城区风场垂直切变加强,触发暴雨的出现和持续。针对天津受海陆风影响的相关

研究也很多,于恩洪等(1987)、陈彬等(1989)研究表明,渤海湾海风锋对强对流天气有触发作用;何群英等(2011)、东高红等(2011)也注意到海风锋对天津局地强降水有触发和加强作用;而刘一玮等(2010)通过个例分析指出天津地区下垫面热力不均匀会对强冰雹天气造成影响。

事实上,城市热岛、海风锋之间必然存在相互作用过程,这种相互作用可能对局地强天气的发生、发展产生影响。天津新一代天气雷达位于渤海西岸,它既能探测陆地强对流天气,同时也可获得海洋气象信息,更重要的是还可捕获海-陆交界的大气边界层特征。2010 年 8 月 16 日下午天津城区出现局地强降水天气,其时间短、强度大、范围小,给我们的预报带来很大难度。本文充分利用各种观测资料、雷达观测资料与 VDRAS 反演资料及中尺度 TJ-WRF 模式输出资料,对其进行综合分析,重点分析城市热岛与海风锋二者叠加作用对局地强降水的触发机制,以期为发生在沿海城市局地强对流天气的短时临近预报提供参考依据。

## 1 资 料

由于本文重点研究的是城市热岛与海风锋叠加作用对天津城区一次局地强降水的触发机制,因此选取资料时间为 2010 年 8 月 16 日 00—12 UTC。

所用资料:常规观测资料、NECP/NCAR 再分析资料,天津逐时加密自动站观测资料,包括风向、风速、温度、相对湿度。

天津多普勒雷达低层仰角反射率资料,时间间隔为 6 min;利用变分多普勒雷达分析系统(VDRAS)反演得到的对流层低层热力、动力场分析资料;考虑到北京和天津 2 部雷达的有效探测范围,VDRAS 的运算范围设置为  $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ ,模式水平分辨率为  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 。由于利用 VDRAS 反演主要是获得低层(3 km 以下)的热动力三维结构分析场,因此将模式顶高设置为 5.4375 km,而且仅在 3 km 以下的雷达资料被同化,3 km 以上作为模式顶的海绵边界层处理;考虑到时空一致性,模式的垂直分辨率为 0.375 km,模式最低层为垂直分辨率的一半,即 0.1875 km。模式输出资料的时间间隔

为 12 min(陈明轩等,2011)。

天津 255 m 气象塔观测资料,气象塔位于天津市城区南部,海拔高度为 3.3 m,地理位置为 39.06°N、117.1°E。实验站周边为典型的城市下垫面条件,气象铁塔上安装有 15 层风、温度与相对湿度梯度观测,涡动相关观测仪采用美国 CAMP-BELL 公司生产的 CSAT3 型超声风温仪,安装在气象铁塔 40 m 高度的南伸臂顶端,采样频率为 10 Hz。

天津中尺度 TJ-WRF 模式输出资料(模式简介见后文)。

## 2 降水实况与天气形势

### 2.1 降水实况特征

2010 年 8 月 16 日下午,天津城区附近出现局地强雷雨、冰雹天气,降水从 07 时(文中时间为世界时,未特别说明,下同)开始,雨区自东向西移动,到 10 时结束,自动站最大降水量为 31.6 mm。图 1a 为降水量空间分布图,图 1b 为降水区自动站点降水量随时间的演变。从图上看到,此次降水的特点为:(1)降水落区范围小、局地性强,20 mm 以上的降水区域仅有几平方千米;(2)降水时间短、强度大,单站主要降水基本集中在 1~2 h 内。(3)降水首先出现在天津城区东面郊区,雨区向西移动到城区时,雨强突然加强,造成城区单站 1 h 29.8 mm 的短时暴雨。

### 2.2 天气形势分析

从 8 月 16 日 00 时 500 hPa 图上(图略)看到,在河北经河南至湖南一线有一高空槽,天津处于槽区前部,700 hPa 已处于槽后,850 hPa 高度以下京津附近为一弱的反气旋性环流;对比高低层槽区位置看该槽为明显后倾槽。应用 NECP/NCAR 再分析资料看到,到 06 时天津正好处于 500 hPa 高空槽槽区,700 hPa 为槽后西北气流,850 hPa 上弱的反气旋环流明显东移,天津处于反气旋环流后部的偏南气流里(图 2)。对应地面场天津地区由之前处于鞍形场的弱气压场转为处于高压后部弱的偏南气流里。

对比分析北京探空资料看,00 时 925 hPa 以上风随高度顺转为暖平流,925 hPa 以下风随高度逆转为弱冷平流,且整层大气的湿度都不大;到 06 时在 700~850 hPa 高度有一明显垂直风切变,850

hPa 以下为偏南风,700 hPa 以上为一致的西北风。从两时次各物理量参数变化看到:对流有效位能由 00 时的  $164.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  迅速增大到  $990.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,抬升指数由  $-1.39^\circ\text{C}$  降为  $-3.32^\circ\text{C}$ ,对流抑制由  $545.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  减小到  $0.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,对流温度保持为  $34^\circ\text{C}$ 。这说明降水前虽然天津处于后倾槽 500 hPa 槽前、低层槽后弱的反环流下,但该地区对流不稳定能量迅速增加,对流抑制迅速降低,该地如有好的触发抬升条件,只要克服较小的对流抑制,就能触发该地不稳定能量强烈释放,激发强对流的新生发展。

## 3 局地强降水发生前后城区下垫面特征分析

### 3.1 天津城区附近下垫面气象要素特征

从天津逐时加密自动站观测资料看到,16 日 00 时在天津市东面东丽—津南区有一南北方向、西

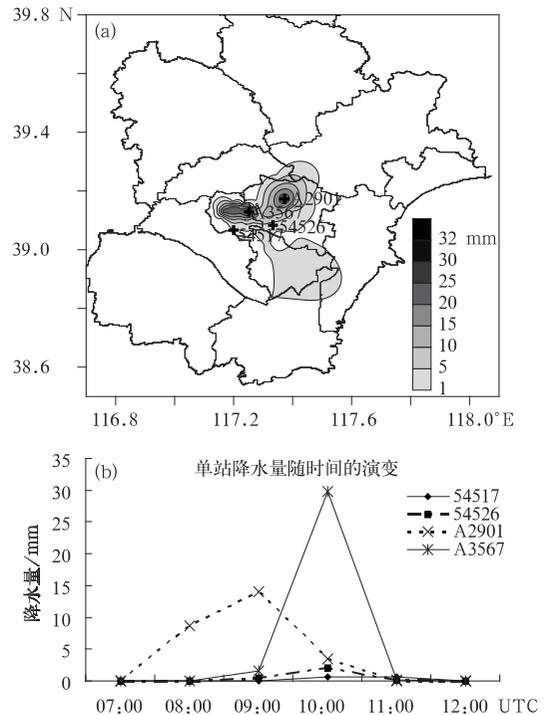


图 1 (a) 2010 年 8 月 16 日降水量分布;  
(b) 降水区自动站点降水量随时间的演变

[站点所在位置见(a)]

Fig. 1 (a) The precipitation distribution on 16 August 2010, and (b) its time evolution from 4 AWS stations

[Site locations shown in (a)]

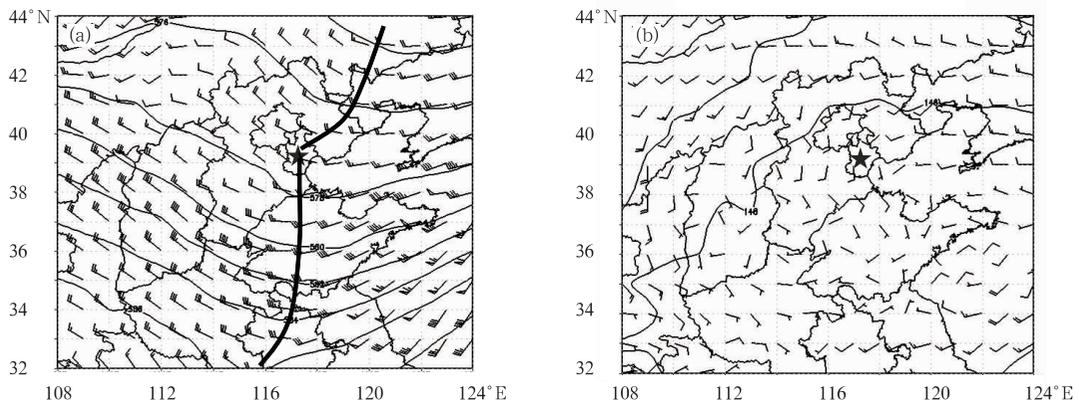


图 2 2010 年 8 月 16 日 06 时 500 hPa(a)与 850 hPa(b)形势场

(粗线为 500 hPa 槽线,五角星位置为天津市区)

Fig. 2 The 500 hPa and 850 hPa situations at 06:00 UTC 16 August 2010

(Thick lines show the trough at 500 hPa and the pentacle marks the position of Tianjin urban)

南—西北风的中尺度切变存在,市区为一个小的反气旋风场环流,对应 1000~850 hPa 各层天津上空均为弱的反气旋风场环流。随时间地面中尺度切变向西北方移动、范围扩大、方向逐渐转为西南—东北向,到 05 时中尺度切变压在宁河—东丽西北部至市区北部一线,此时市区的反气旋风场环流消失,转为一致西南风(图 3a)。随后,中尺度切变向西北方收缩、特征减弱,而市区南部逐渐出现向城区的风速辐合,并于 08 时前后在城区风场辐合处形成一条新的地面中尺度辐合线(图 3c)。

分析中尺度辐合线形成的原因,应和天津城区与郊区热力差异强迫有关。从上面的分析知,05 时前市区为一反气旋环流风场说明存在弱的冷下沉;之后由于城市下垫面物理属性的差异,太阳辐射造成该地区温度上升速度加快,气温明显高于郊区,城区附近出现城市热岛。从天津温度距平与自动站风场分布看到,城区附近的温度正距平为最大(图 3b),而且风场在此处出现辐合,辐合线走向与最大温度梯度方向基本一致。分析天津 255 m 气象塔观测资料也看到,05 时前 31℃ 温度的伸展高度在 70 m 以下,之后其高度迅速向上伸展,到 07 时 31℃ 温度的伸展高度达到近 160 m(图 3d)。从对应 40 m 高度垂直速度分布也看到,07 时之前垂直速度一直为负,而 07 时后垂直速度转为正值,并一直持续到降水前的 08:30(图 3e)。这说明随城区附近热岛效应的出现与加强,该地相对于暖空气得到抬升,因不断有气块被迫抬升,所以导致该地出现弱上升运动,上升运动又导致该地出现辐合,从而形成地

面中尺度辐合线。

### 3.2 渤海沿岸自动站气象要素特征

从渤海沿岸自动站气象要素随时间演变看,上午沿岸地区一直维持西南风,03 时后逐渐转为东南风,而且风速有所加大,并于 05 时在岸上离海岸线 20 km 处形成另一条辐合线(图 3a),辐合线前侧为西南风、后侧为东南风且温度相对较低、湿度较大,说明辐合线后侧为从东南海上吹来的相对湿冷空气。对应雷达观测,在相应位置处有一强度为 15 dBz 的窄带回波带随时间缓慢向西移动,所以这辐合线应是海风锋。分析沿岸站点风能塔资料也看到,在 04 时后沿岸(风能塔观测高度最高为 100 m)风向突转,由西南风转为东南风、风速最大加大到  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),海上相对湿冷空气随东南气流不断向陆地输送堆积从而形成辐合。

### 3.3 局地强降水前后自动站与雷达回波特征分析

海风锋形成后,形状为南北向弧状。其随时间不断向西移动,移动中其后侧东南风风速最大达到  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,雷达观测其回波强度也略有加强。从 06 时开始在海风锋后侧不断有雷暴生消发展,但雷暴的生命史都很短、持续时间大约仅半个小时(图 3b)。分析原因应为海风锋本身有一辐合抬升区,在其内一直有弱的对流发展,当海风锋移动到一大气层结不稳定和水汽条件适合区域时,海风锋的辐合抬升将会得到加强,从而触发雷暴新生和发展,这与作者之前的分析结论一致(东高红等,2011)。

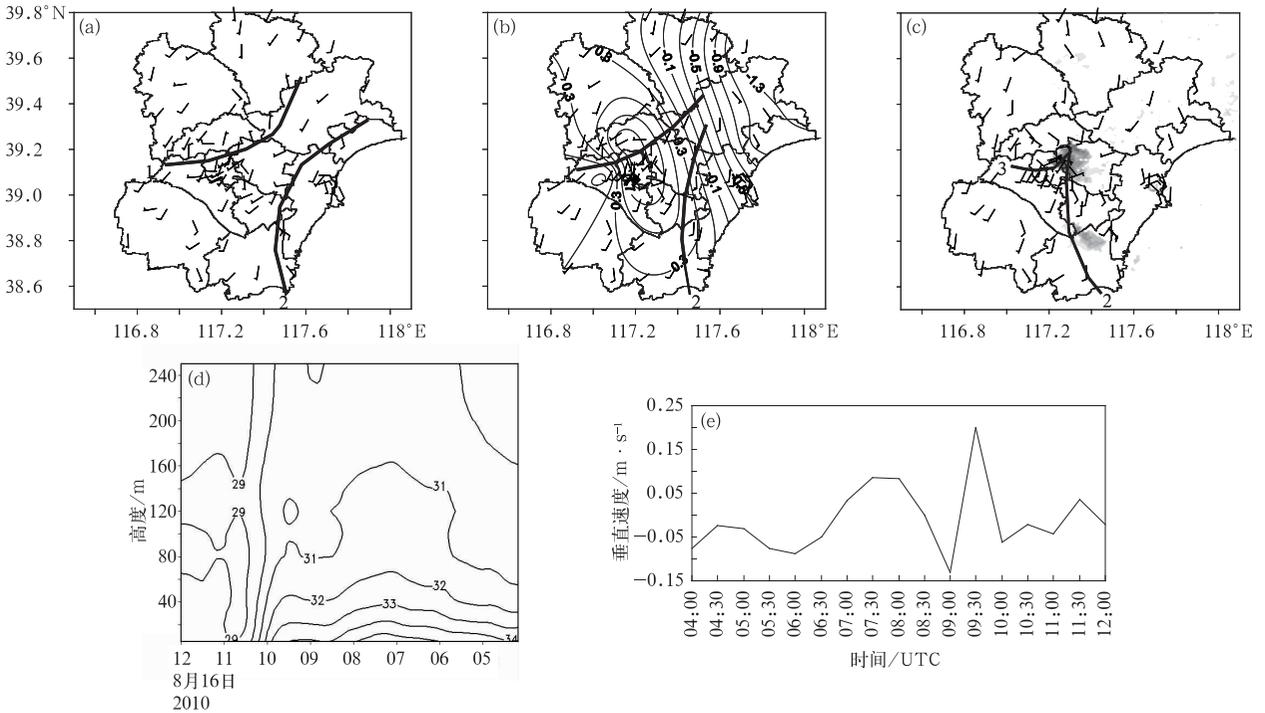


图 3 2010 年 8 月 16 日 05:00(a)、07:00(b)、09:00(c)地面自动站风场；(b)叠加同时刻天津地区温度空间距平（图中“◆”位置为气象观测塔位置）；(c)叠加同时刻 0.5°仰角雷达回波（图中线 1 为中尺度切变线、线 2 为海风锋、线 3 为城区附近的地面辐合线）；(d)气象塔观测温度垂直分布随时间变化；(e)气象观测塔 40 m 高度垂直速度随时间演变图（向上为正）

Fig. 3 The distributions of AWS wind field at (a) 05:00 UTC, (b) 07:00 UTC and (c) 09:00 UTC on 16 August 2010; (b) superimposed Tianjin area temperature space anomaly at 07:00 UTC and “◆” showing position for meteorological observation tower; (c) superimposed 0.5° elevation angle reflectivity (line 1 shows the mesoscale shear, line 2 shows the sea breeze front, line 3 shows the convergence line in the urban areas); (d) vertical distribution of temperature with time of meteorological tower observations; (e) 40 m high vertical velocity evolution with time of meteorological tower observations (upward is positive)

到 07:24 海风锋前端移到天津市东面,这时开始在其后侧有雷暴新生并迅速发展,两个体扫就发展成强度为 50 dBz 的雷暴单体。之后海风锋加速向西移动,雷暴单体也迅速发展、范围不断扩大,并与海风锋一直保持一定距离向西移动,08:36 以后回波的强度有所减弱,影响范围缩小,但当海风锋移到天津市上空时,处于其后侧回波的强度再次迅速加强、范围扩大,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。从铁塔资料也看到,降水开始前后,城区近地层出现明显的上升运动,最大垂直上升速度达到  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 3e),而且降水开始后 120 m 高度以下风向由西南风转为北风、风速略增加,同时相对湿度增大,气温由  $34^\circ\text{C}$  迅速降至  $30^\circ\text{C}$  以下(图 3d),这从 10 时自动站温度分布也能明显看出。降水后市区附近出现明显负距平区、降

水区温度与周围自动站温度相差最大达  $10^\circ\text{C}$  (图略),这应是由于强降水拖曳作用造成的冷池。

将雷达 1.5°仰角反射率因子图与自动站风场相叠加看到,新生雷暴单体正好位于地面辐合线与海风锋之间的区域。雷暴单体随海风锋缓慢向市区方向移动,当海风锋移到市区附近,其与位于城区的中尺度辐合线相遇,相遇处回波单体迅速加强发展,12 min 时间雷暴单体回波中心强度最强就达到 50 dBz(图 3c)。分析原因应是随海风锋移近,海风锋后相对湿冷的气团与位于城区的中尺度辐合线上相对暖干的气团这两种不同属性气团在天津城区附近相遇,城区附近相对暖干气团不断被抬升,致使此处辐合上升运动进一步加强,从而促发该地不稳定能量强烈释放,雷暴单体新生并迅速发展加强,而热岛效应造成城区附近热力不稳定加强,使该地辐合上

升运动加强,这对新生雷暴单体的加强发展起到增强作用。

### 4 利用雷达反演和数值模拟分析城市热岛与海风锋叠加作用对局地强降水的触发机制

#### 4.1 利用雷达反演资料分析局地雷暴发生地的低层热、动力特征

研究证实,VDRAS 能够从单(双)多普勒雷达资料反演低层大气三维风场、热力场和微物理场(许小永等,2004)。本文利用北京、天津两部多普勒雷

达资料及自动站资料进行反演,得到 VDRAS 反演的低层热力场资料,来分析此次发生在天津城区的局地强降水天气。

从 VDRAS 反演结果看到,中午前后天津城区附近出现中心值为 1.2℃ 的扰动温度大值区,说明城区附近存在城市热岛。随时间城市热岛效应明显加强,到 07:53 达到最强,过市区沿 39.15°N 做扰动温度与流场垂直剖面看到,此时城区附近扰动温度大于 1.4℃ 的水平范围大约为 15 km、垂直伸展高度接近 1.4 km,而且扰动温度大值区处对应有辐合抬升。随后城区附近扰动温度大值区范围有所减小西缩,但中心值却随时间明显增高(图 4a~4e)。配合图 4f~4h 看到城区附近扰动温度大值区对应着

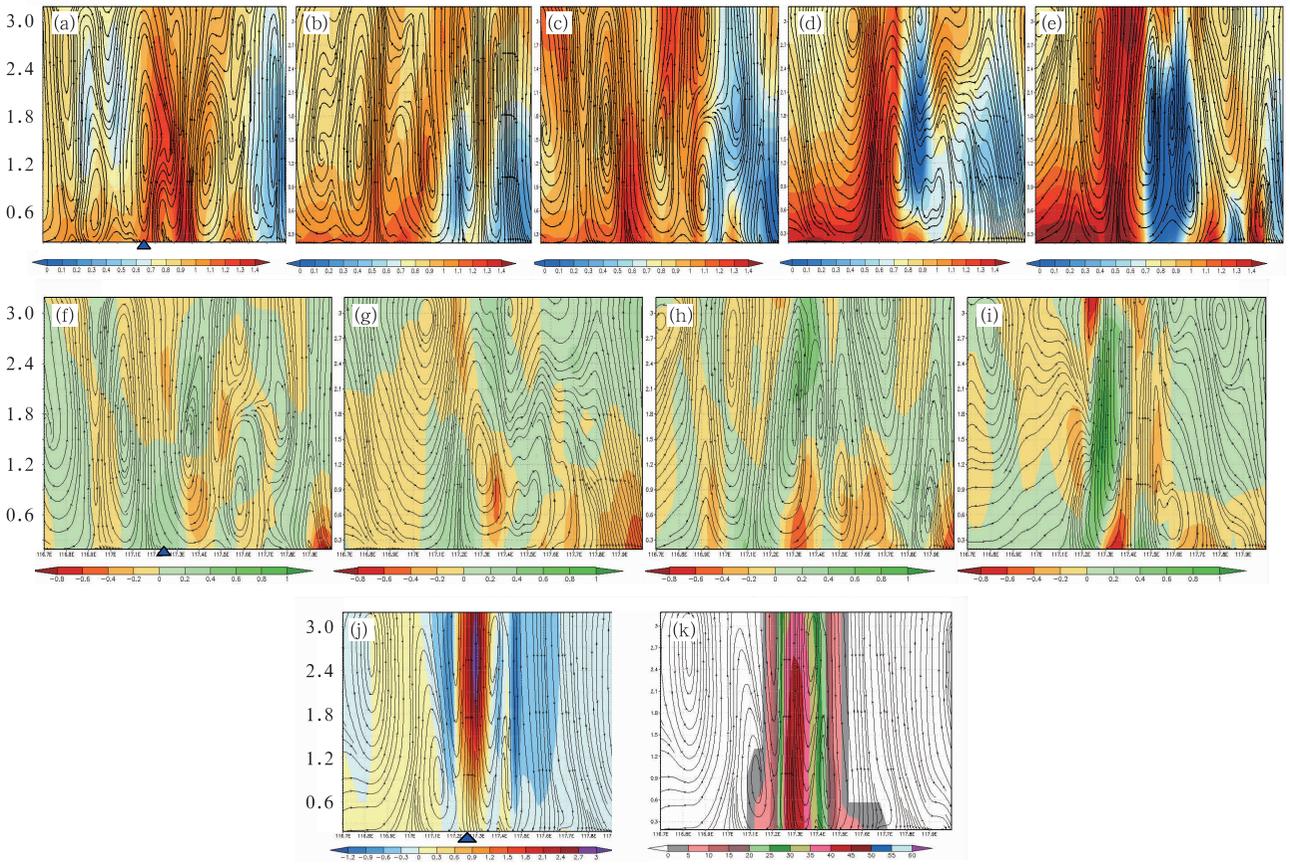


图 4 利用 VDRAS 反演资料过市区沿 39.15°N 的垂直剖面图  
 (a~e) 06:23 至 08:29 扰动温度与流场(间隔半小时), (f~i) 07:23 至 08:53 流场与散度场,  
 (j) 09:17 流场与垂直速度, (k) 09:17 流场与回波强度  
 (图中三角位置为天津城区、散度正值为辐合、垂直速度向上为正,单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

Fig. 4 Vertical profiles along 39.15°N through the city center using VDRAS inversion data  
 (a~e) the perturbation temperature and flow field from 06:23 to 08:29 UTC (interval for half an hour),  
 (f~i) flow field and divergence field from 07:23 to 08:53 UTC, (j) flow field and vertical  
 velocity field at 09:17 UTC, (k) flow field and echo intensity at 09:17 UTC  
 (Triangle location is the urban area of Tianjin; Positive value indicates convergence  
 and upward vertical velocity; unit:  $m \cdot s^{-1}$ )

辐合上升气流,在城区东西两侧为辐散下沉气流,城区附近的辐合上升与其两侧的辐散下沉相配合,在城区和近郊构成两个垂直环流,环流的垂直伸展高度为 2.7 km、中心位置在 1.5 km 高度附近。另外从图上看到市区东部沿海地区在近地层为偏东气流,前沿有弱的辐合抬升,而且与扰动温度低值区相对应,对比图 3b 知,近地层偏东风前沿辐合抬升区所在位置为海风锋锋区。随时间海风锋不断向市区方向推进,随其移近,城区附近扰动温度大值区范围有所缩小、但辐合抬升却有所加强(图 4)。随后海风锋前沿移到城区附近,海风锋自身的辐合抬升气流与城市热岛产生的辐合上升气流相遇,该处的辐合上升明显加强,最大上升速度达到  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位于 2.5 km 高度附近(图 4i~4j);而且强回波位置与垂直上升区相对应,大于 40 dBz 的强回波中心位于最大上升区中心右侧(图 4k)。这说明虽然海风锋对城市热岛效应有消弱作用,但二者相遇处的辐合却得到加强,低层辐合促使该地上升运动加强,从而触发该地不稳定能量释放导致局地强对流的新生发展,造成此次局地强降水的出现。

## 4.2 中尺度 TJ-WRF 数值模拟结果分析

### 4.2.1 中尺度 TJ-WRF 模式简介

中尺度 TJ-WRF 模式是天津气象科学研究所与北京大学合作引进本地化业务运行的一套数值预报业务化系统,该系统采用 ARPS-ADAS 数据同化系统,背景场资料使用 NECP 预报模式 GFS 资料(分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 3 h 一次)。TJ-WRF 模式的积分区域中心在北京附近( $40.0^\circ \text{N}$ ,  $115^\circ \text{E}$ ), X、Y 方向格点数分别为 401 和 369,垂直方向 51 层,边界层内大致有 11 层;水平分辨率 5 km,积分步长 30 s,预报时效 72 h,每 3 h 输出一次预报结果,对于降水量资料,每 1 h 输出一次预报结果(WRF 模式主要参数设置表略)。模式中的土地利用类型分类是依据美国地理测量土地利用系统提供的 24 类全球土地利用分布(戴俐卉等, 2008),其是利用 2008 年遥测资料得到的, WRF 模式中天津市区周围土地利用类型为城市建筑用地(见图 5)。

### 4.2.2 模拟结果可用性

本次过程模拟起始时间为 2010 年 8 月 15 日 12 时,将 TJ-WRF 模式模拟的降水出现时间、降水量与落区和降水实况进行对比看到,模拟降水出现的时间和观测实况基本相同,模拟的降水量相对实

况偏小而且降水落区范围偏大一些(图略);对比 07 时实况温度与 TJ-WRF 模拟的温度与风场分布看到(图 6), TJ-WRF 模式模拟的温度场与观测实况大体相同,这说明 TJ-WRF 模式模拟结果可以用于对此次天气过程发生发展机制的分析。

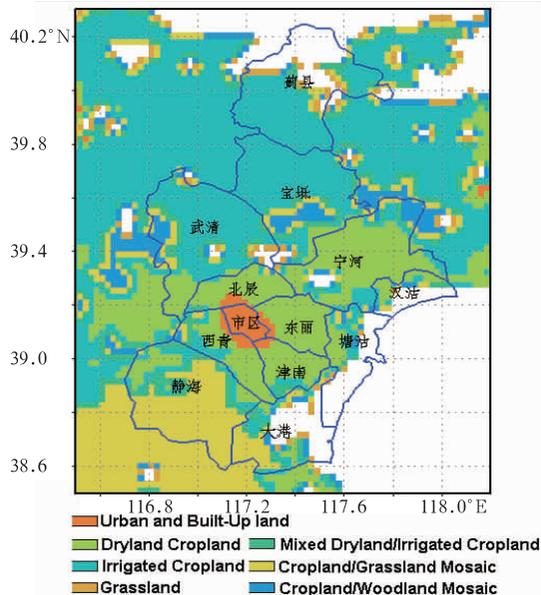


图 5 WRF 模式天津地区土地利用类型分布  
Fig. 5 Tianjin land use data in WRF model

### 4.3 城市热岛与海风锋叠加作用触发局地强对流的机制

分析 TJ-WRF 模式模拟结果看到, 16 日 04 时开始在天津城区附近出现明显高温区,到 07 时城区附近温度比周围郊区高出  $1^\circ \text{C}$  左右(图 7a),这与实况观测相一致(图 3b)。而且城区上空水汽含量较小,为一相对暖干区域,这说明天津城区附近热岛效应明显。从地面风场分布看到,城区附近为西南风,而且有弱的风速辐合。同时在天津东部有一辐合线,其前侧为暖干的西南气流、后侧为从海上来的相对湿冷的东南气流,对应前面分析知这是海风锋。过市区沿  $39.2^\circ \text{N}$  做流场与垂直速度剖面看到, 07 时低层西南风的偏西分量在城区上空出现向上爬升,而且在低层形成一垂直上升区。1 小时后垂直上升区范围明显扩大,最大上升速度由  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,上升区的高度也从 800 hPa 伸展到 700 hPa(图 7b)。另外海风锋上也有一垂直上升区,其中心强度略强于城区附近处的。随时间海风锋逐渐向市区方向移动,随其移近,城区附近高温

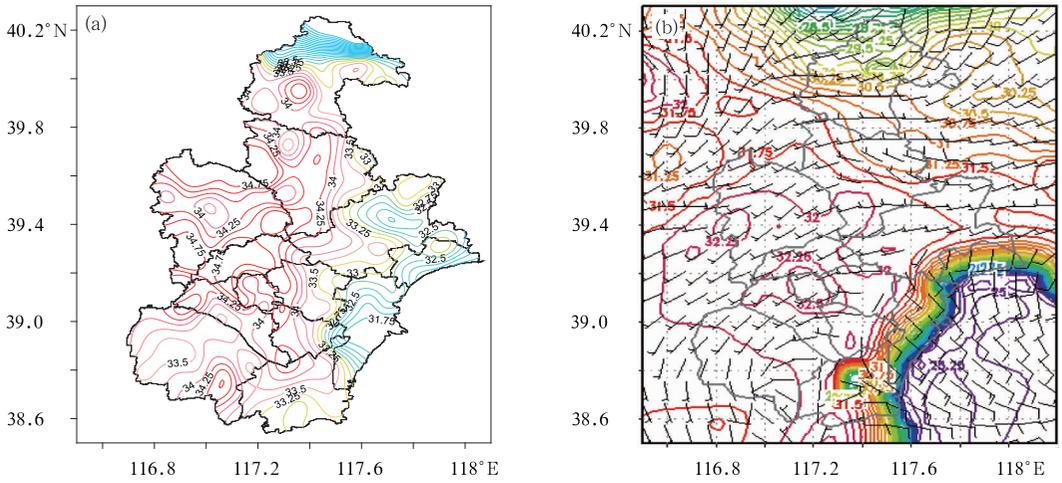


图 6 2010 年 8 月 16 日 07 时温度分布(a)和 TJ-WRF 模式模拟的 07 时温度场(b)  
 Fig. 6 (a) Temperature distribution at 07:00 UTC 16 August 2010, (b) TJ-WRF model simulation of the temperature field at 07:00 UTC

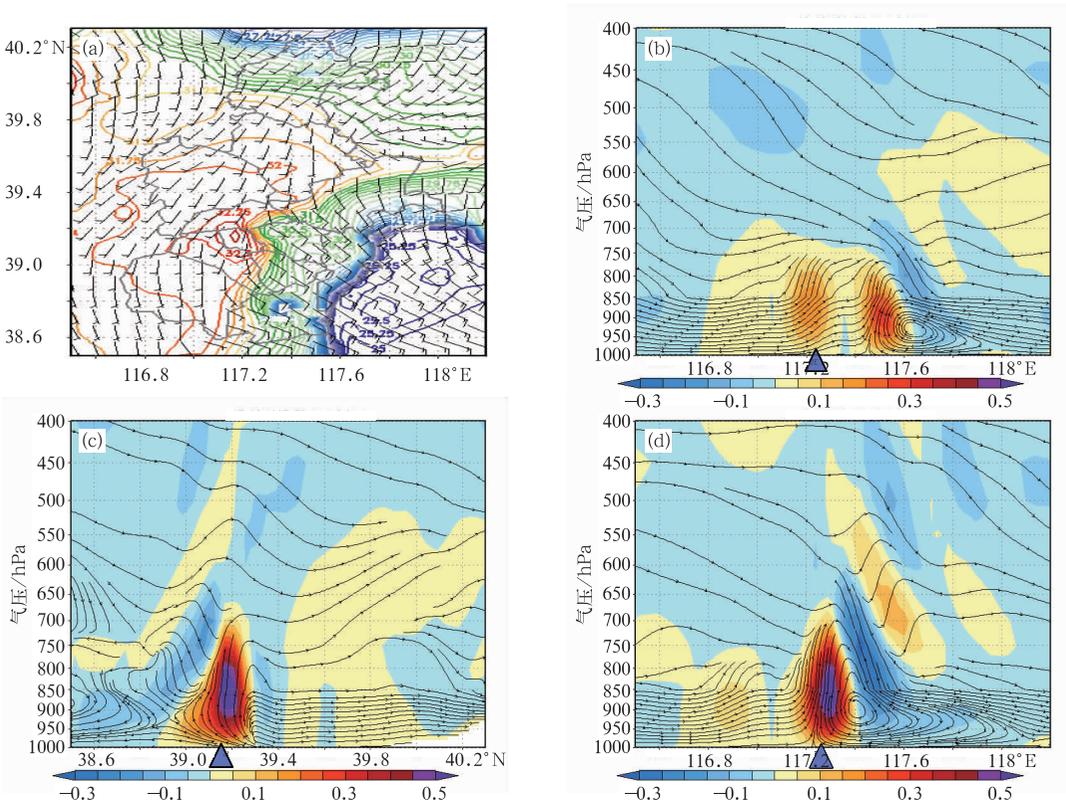


图 7 (a) 2010 年 8 月 16 日 09:00 风场与温度分布, (b) 过市区沿 39.2°N 做的 08 时流场与垂直速度剖面, (c) 过市区沿 117.3°E 做的 09 时流场与垂直速度剖面, (d) 过市区沿 39.2°N 做的 09 时流场与垂直速度剖面(图中三角位置为市区)  
 Fig. 7 (a) Wind field and temperature distribution at 09:00 UTC 16 August 2010, (b) flow field and vertical velocity profiles along 39.2°N through the city center at 08:00 UTC, (c) flow field and vertical velocity profiles along 117.3°E through the city center at 09:00 UTC, (d) flow field and vertical velocity profiles along 39.2°N through the city center at 09:00 UTC (triangle location is the urban area of Tianjin)

区范围略有缩小,但强度没有明显变化。但从图 7a 上看到,海风锋移近到城区附近时,出现明显的向后弯曲现象,其后侧的风场也出现明显绕流。

过市区沿 117.3°E 做流场与垂直速度剖面看到(图 7c),低层流场在城区附近出现分流绕流现象,气流被分为三支:一支气流流向北、一支气流流向南、还有一支沿垂直方向向上爬升;而在远离市区的南北两侧郊区处的剖面上则没有气流分流现象(图略),这说明城市热岛对海风锋有明显的阻挡,海风锋所带气流在经过城区附近时出现了明显的气流绕流现象。在过市区沿 39.2°N 的流场与垂直速度剖面图上看到(图 7d),在低层有南北两支气流在市区处相遇产生辐合,强的辐合导致强的上升运动,对比图 7b 知这一强辐合上升区为海风锋自身的辐合上升区与城市热岛造成的局地辐合上升气流相遇合并加强造成的。从图 7d 看到上升气流的高度接近 650 hPa,明显高于之前海风锋与城市热岛相遇前各自的上升区高度;而且最大上升速度也由之前的 0.25 及 0.15  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  合并加强达到 0.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上。这说明由于城市热岛的存在,当海风锋移动到城区附近时,其后侧气流在城区附近出现弯曲绕流和爬升现象;同时海风锋与城市热岛自身的辐合上升区在二者相遇处得到合并加强,而加强的上升运动又为雷暴的发生发展提供了有利的动力热力条件,从而触发了该地不稳定能量的强烈释放,导致强对流天气的出现。

## 5 结 论

(1) 2010 年 8 月 16 日下午出现在天津城区的局地强降水天气时间短、强度大,具有明显的  $\gamma$  中尺度对流降水特征。降水发生在后倾槽低层槽后弱的反环流下,降水前该地不稳定能量迅速增加,大气处于明显不稳定状态,如有触发抬升条件,只要克服较小的对流抑制,就能触发该地不稳定能量强烈释放、激发强对流的新生发展。

(2) 天津市附近城市热岛效应明显,扰动温度大值区处的低层有辐合抬升;海风锋自身也有一辐合抬升区,海风锋由岸边向西移动过程中,当其移动到城区附近时,与城市热岛效应产生的辐合抬升气流相遇,相遇处的辐合上升运动明显加强;大于 40 dBz 的强回波位置正好位于强上升中心的右侧。

(3) 城市热岛对海风锋的移动有明显阻挡作

用,海风锋移到热岛效应明显的城区附近,其后侧低层气流会出现明显分支绕流和气流爬升现象。两者相遇处的辐合上升运动会明显加强,从而为该地不稳定能量的释放及雷暴的发生发展提供了有利的动力热力条件。中尺度 TJ-WRF 模式能很好地模拟出这一现象。

**致谢:**非常感谢天津市气象科学研究所正研级高工解以扬的悉心指导。

## 参考文献

- 毕宝贵,李泽椿,李晓莉,等. 2004. 北京地区降水的特殊性及其预报方法. 南京气象学院学报, 27(1): 79-89.
- 曹晓岗,王慧,邹兰军,等. 2011. 上海“010805”特大暴雨与“080825”大暴雨对比分析. 高原气象, 30(3): 739-748.
- 陈彬,于恩洪. 1989. 渤海湾西部海陆风的天气气候特征. 海洋通报, 8(1): 23-27.
- 陈明轩,王迎春,高峰,等. 2011. 基于雷达资料 4DVar 的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析. 气象学报, 69(1): 64-78.
- 戴丽卉,洪景山,庄秉洁,等. 2008. WRF 模式台湾地区土地利用类型之更新与个案研究. 台湾大气科学, 36: 43-61.
- 东高红,何群英,刘一玮,等. 2011. 海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用. 气象, 37(9): 1100-1107.
- 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. 气象, 37(3): 291-297.
- 刘一玮,寿绍文,解以扬,等. 2010. 热力不均匀对一次冰雹天气影响的诊断分析. 高原气象, 30(1): 226-234.
- 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. 大气科学, 31(2): 364-376.
- 苗曼倩,唐有华. 1998. 长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化影响. 高原气象, 17(3): 280-289.
- 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. 大气科学, 3(2): 221-234.
- 孙继松. 2005. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响. 高原气象, 24(1): 62-69.
- 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. 大气科学, 31(2): 311-320.
- 许小永,郑国光,刘黎平. 2004. 多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演的模拟研究. 气象学报, 62(4): 410-422.
- 于恩洪,陈彬. 1987. 渤海湾西部海陆风的空间结构. 气象学报, 45(3): 379-381.
- Chen Longxun, Zhu Wenqin, Zhou Xiuji. 2000. Characteristics of environmental and climate change in Changjiang Delta and its possible mechanism. Acta Meteor Sin, 14(2): 129-140.
- Daniel Rosenfeld. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. Science, 287(10): 1793-1796.
- 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. Atmos Res, 54(1): 15-39.