

# 天津一次突发性局地大暴雨中尺度分析

何群英<sup>1</sup> 东高红<sup>1</sup> 贾慧珍<sup>1</sup> 孟冬梅<sup>2</sup> 于莉莉<sup>1</sup> 朱男男<sup>1</sup>

(1. 天津市气象台, 300074; 2. 天津市气象科学研究所)

**提 要:** 利用加密自动气象站、天津 MM5、NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 6 小时再分析资料以及多普勒雷达等资料,对 2007 年 8 月 26 日出现在天津东部地区的局地大暴雨进行了天气学、动力学诊断和中尺度分析。结果表明,暴雨是在大尺度环流形势由经向调整为纬向时期产生的,中低层西风槽、切变线以及地面中尺度辐合线是其主要影响系统;强降水的时空分布有明显的中尺度特征;暴雨区上空形成的斜升气流,有利于强雷暴云的稳定发展;低空东南急流和地面偏东风为暴雨区输送了大量的水汽;地面中尺度辐合线的存在和维持不仅增强了地面的辐合抬升,同时也是造成此次局地大暴雨的中尺度系统和触发条件。多普勒雷达图中明显的列车效应以及强回波伸展的高度与当天  $0^{\circ}\text{C}$  层高度的对应关系也是产生强降水的主要原因。

**关键词:** 大暴雨 动力学诊断 中尺度辐合线 列车效应

## Mesoscale Analysis of a Sudden Heavy Rain in Tianjin

He Qunying<sup>1</sup> Dong Gaohong<sup>1</sup> Jia Huizhen<sup>1</sup> Meng Dongmei<sup>2</sup> Yu Lili<sup>1</sup> Zhu Nannan<sup>1</sup>

(1. Tianjin Meteorological Observatory, 300074; 2. Tianjin Meteorological Institute)

**Abstract:** The intensive observations of automatic weather station, Tianjin MM5 model products, the NCEP  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  of 6 hours analyzed data as well as conventional Doppler radar information are used in the weather diagnosis and mesoscale analysis for the process of a heavy rainstorm on the August 26, 2007 in the eastern region of Tianjin. The results show that heavy rains occurred in the large-scale circulation to the zonal adjustment period. The affecting systems are the trough on 500 hPa, the shear line on 700 hPa and 850 hPa and ground mesoscale convective line. The main reason of the uneven heavy rainfall distribution is obvious scale in various physical characteristics. Ramps were formed over air flow of the storm zone which led to stable development of a strong thunderstorm cloud, at the same time the easterly storm on ground transmitted a lot of water vapor. The existence and maintenance of

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目《城市群高影响天气预报系统的集成和业务示范》(2008BAC37B05)

收稿日期: 2008 年 3 月 12 日; 修定稿日期: 2009 年 4 月 27 日

the ground-mesoscale convergence line not only enhance the convergence uplift, but also cause the current to the large-scale storm in the system and trigger conditions. The obvious train effects in Doppler radar map, as well as correspondence between extended height of heavy echo and intraday zero height are the main reasons for the heavy rainfall.

**Key Words:** heavy rain dynamical diagnosis mesoscale convergence line train effect

## 引言

暴雨是天津乃至华北夏季的主要灾害性天气。世人瞩目的“63.8”(1963年8月)和“86.8”(1986年8月)致洪暴雨均发生在华北的盛夏季节。多数暴雨,特别是大范围的致洪暴雨,除了有利的大型环流背景外,无一不与中尺度天气系统相关。而中尺度雨团或雨带又总是在一定的天气尺度背景下生成的<sup>[1-4]</sup>。近年来,许多人利用各种模式对暴雨过程的中小尺度特征进行模拟研究<sup>[5-7]</sup>,并利用模式输出的高分辨率的结果对相关物理量进行诊断分析,以揭示暴雨过程的中尺度系统演变特征。如程麟生等<sup>[8]</sup>采用MM5模式模拟了“9817”暴雨,发现特大暴雨与700hPa上的一个 $\beta$ 中尺度低涡的生成和强烈发展直接关联。周兵等<sup>[9]</sup>用中尺度模式进行数值实验,探讨了天气系统之间的相互作用,分析了北京大暴雨的触发机制。杜秉玉等利用多普勒天气雷达探测资料,研究了梅雨锋暴雨的边界层中尺度涡旋系统和中小尺度对流回波系统的结构和特征<sup>[10-11]</sup>。刘洪恩利用C波段多普勒天气雷达资料,分析了暴雨过程中尺度系统的雷达回波特征<sup>[12]</sup>。夏文梅等分析研究了低空急流的单多普勒速度特征<sup>[13]</sup>。郭林对福建的短时暴雨按天气形势进行分类,初步分析了不同天气形势下短时暴雨的雷达回波特征<sup>[14]</sup>。

天津暴雨具有华北暴雨的典型特征,暴雨的次数虽少,但降水强度较强,且分布极不均匀,暴雨的中尺度特征非常明显,其发生发展带有很大的突发性和局地性,预报难度

较大,尤其是精细化水平不高。本文利用多种资料对2007年8月26日发生在天津东部的局地大暴雨过程从背景条件、物理量诊断、遥感图像识别等进行了分析研究,在揭示一些物理特征的同时也加深对中尺度对流系统的认识,探索这种突发性、局地性很强的大暴雨天气的可预报性。

## 1 天气概况

受高空切变线的影响,2007年8月25—26日天津东部地区出现了一次暴雨、局部大暴雨天气过程。强降水主要集中在26日凌晨前后。降水量的分布极不均匀,从25日20时到26日20时的24小时雨量统计来看,在13个国家气象观测站中有6个站降雨量超过50mm,其中最大降雨出现在东丽,为149.0mm达到大暴雨,最小雨量出现在蓟县,只有6.5mm。从全市228个自动气象雨量站统计的数据显示,54个站次达到暴雨,25个站次达到大暴雨,其中东丽区的军粮城24小时降雨量为283.6mm,达到特大暴雨量级,而同时有41个站的降水量不足10mm(图1)。这次强降水是东丽区气象局建站52年以来最强的一次局地大暴雨天气过程。强降水造成东丽区全区农田和城区大面积积水,平均积水深度30~40cm,最深处达1m,全区受灾面积4945.4hm<sup>2</sup>,受灾人口33036人,直接经济损失4495万元。

## 2 大型环流形势演变及影响系统

此次暴雨发生在大气环流由经向型向纬

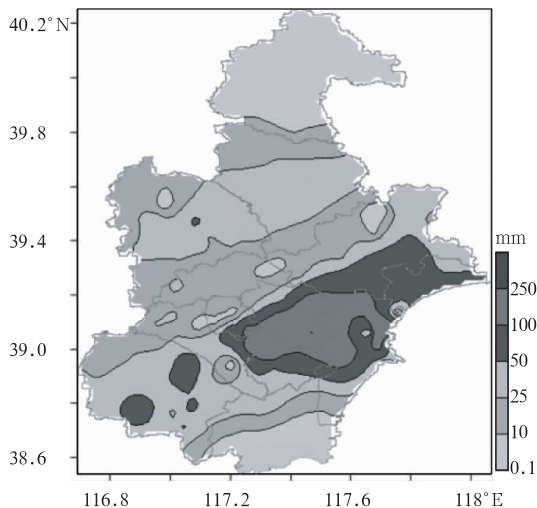


图1 2007年8月25日20时至26日20时降水量

向型调整时期。8月中旬末,500hPa 中高纬度的形势为一槽一脊型,乌拉尔山为一阻塞高压,巴尔喀什湖附近为一切断低涡,从巴尔克什湖到东亚地区为宽广的低槽区,副热带高压呈带状稳定在长江以北地区,副高脊线在 $35^{\circ}\text{N}$ 附近,华北大部地区受副高控制,高温高湿。23日乌拉尔山阻高强度迅速减弱,环流型逐渐由经向调整到纬向, $40^{\circ}\text{N}$ 附近为偏西气流并有短波槽东移,副热带高压仍呈带状稳定少动。24日,处于副热带高压控制下的天津市最高气温升至 $35.1^{\circ}\text{C}$ ,高温闷热。25日,西风带短波槽携带着从新疆北部分裂南下的冷空气东移至河套附近,与稳定少动的副热带高压形成了东高西低的环流形势。26日,受东移高空槽的影响,一直稳定少动的副热带高压开始减弱东退,冷暖空气在华北东部交绥,造成天津地区普降雷阵雨,局部暴雨、大暴雨天气。在低层,850~700hPa从河北西北部到甘肃中南部有一条东北—西南向的切变线,切变北侧为冷平流,南侧从陕西、山西到河北京津地区为暖平流,在副高西南侧边缘有一支东南风急流,将东海的水汽向内陆输送,到副高脊线附近汇入

到切变南侧的西南气流中,从而加强了暖湿气流的向北输送,也使位于华北东部的天津在暴雨前处在大气不稳定状态下。随着高空槽的东移,槽前正涡度平流产生的辐散使低层减压,增强了低层切变线附近的辐合上升和地面的辐合系统。从地面加密自动站的资料来看,26日00—06时在天津的中东部有一条中尺度辐合线,在辐合线北侧有弱锋面,当锋面伴随着中尺度辐合线南压时,其北侧冷空气的渗透激发了本地区的不稳定能量释放和辐合上升运动的发展,也导致了强降水的产生。因此,本次降水是在有利的大尺度环流背景下,高空槽、低空切变线和地面辐合线共同作用下所产生的。

### 3 中尺度系统发生发展的动力、热力条件

#### 3.1 热力条件

##### 3.1.1 温湿的垂直分布

图2是根据MM5计算出的蓟县和东丽站的 $T\text{-}\log p$ 图。很清楚在出现强降水的东丽区图2a,降水前期25日13时近地面层有浅薄的逆温层,并在800hPa以下有明显的上干下湿特点,不稳定能量CAPE值为 $45\text{J}$ ,K指数为 $24^{\circ}\text{C}$ ,大气呈对流不稳定,从高空风的垂直变化来看,在700hPa以下风向随高度急速顺转,具有强风向切变的暖平流结构<sup>[15]</sup>。上述这些特征是有利于对流性强降水发生前能量的积累而形成强降水的。相反,在降水最小的蓟县图2b,降水前25日12时的 $T\text{-}\log p$ 图上,首先没有逆温层存在,其次湿度随高度的变化也不明显,没有上干下湿的结构特征,不稳定能量CAPE值很小为0,K指数为 $17^{\circ}\text{C}$ ,大气层结稳定,800hPa以下的风切变也比东丽小,具有弱风向切变的暖平流结构,这样的特征不利于能量的积累和对流性强降水的产生,因此蓟县的降水也较东丽弱得多。

### 3.1.2 稳定度分析

我们利用加密自动站的逐小时资料,得到了强降水前期 25 日 14 时地面  $\theta_{sc}$  的分布情况(图略),从图中可看到,在天津  $\theta_{sc}$  分布的不均匀性,其值自东南到西北逐渐降低,也就是东南部为高能区,能量锋区基本上位于天津的中部,并且随着时间的推移能量在积累增强并逐渐向西北方向发展,至 26 日 02 时天津大部分地区尤其是东部和南部都处在高能区中,这为不稳定能量的积聚和对流不稳定层结的建立奠定了基础。为了进一步揭

示暴雨区上空大气的的不稳定性,我们过大暴雨区沿 39.07°N 和 117.46°E 分别做了  $\theta_{sc}$  的经向和纬向空间剖面图,从经向剖面图(图 2c)中我们看到在低层暴雨区及南侧为高能区,北侧为相对低能区,能量锋区就在暴雨区上空偏南一侧,稳定维持达数小时。从过大暴雨区所作的  $\theta_{sc}$  垂直廓线图中也能清楚地看到,随高度的升高  $\theta_{sc}$  迅速减小,大约在 850hPa 附近减弱到最小,  $\Delta\theta_{sc}$  接近 20K (图 2d),表明近地面层大气呈对流不稳定,这为强降水的发生提供了重要的条件。

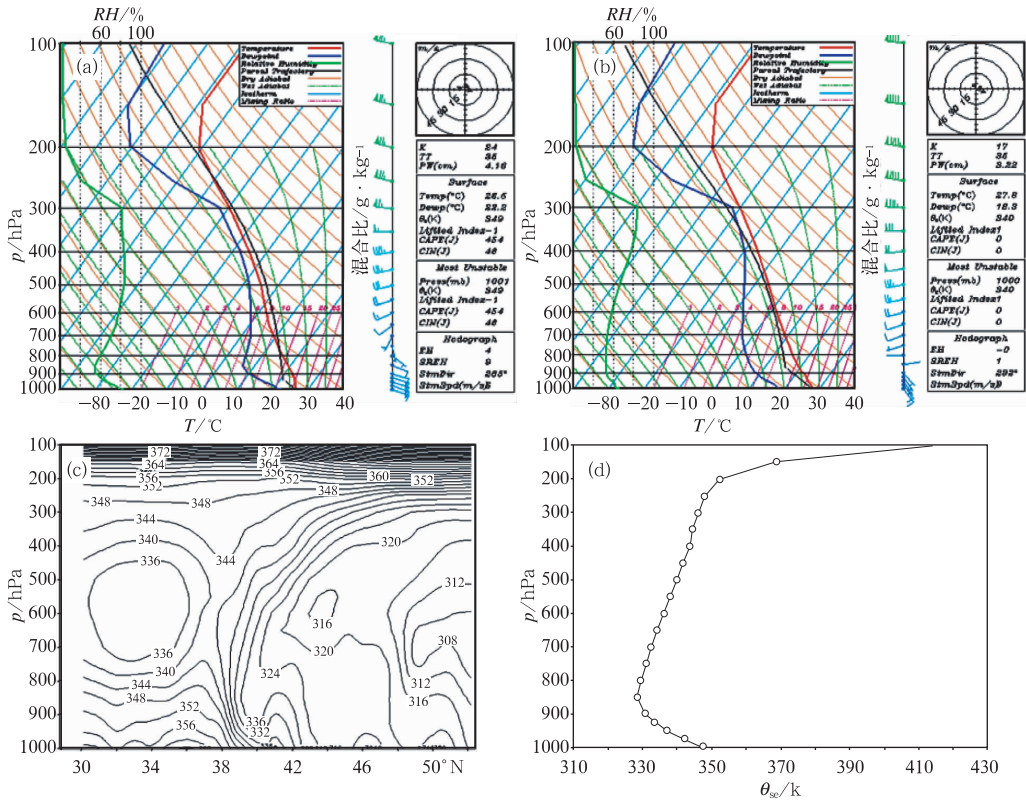


图 2 由 MM5 计算的东丽(a)、蓟县(b)2007 年 8 月 25 日 13 时 T-logp、20 时沿 117.46°E 的  $\theta_{sc}$  经向空间剖面(c,单位:K)及 39.07°N,117.46°E  $\theta_{sc}$  廓线(d)

### 3.2 水汽条件

由加密自动站的逐时资料得到的水汽通量诊断分析结果来看,在暴雨前夕天津地区

的水汽通量的分布也是极不均匀的,东南部水汽通量值高,西北部低。在地面绝对湿度和流场的综合图中可清楚地看到,从黄海经山东半岛、渤海到天津的东南部为高湿区,而



天津的西北部为相对的干区,并且在天津的东南部为流场的辐合区,来自黄海和渤海的水汽在偏东气流的作用下源源不断地输送到暴雨区,使该地区低层水汽十分充沛,为大暴雨的产生提供了十分有利的条件。

从 GPS 水汽资料图上(图略),看到了暴雨区整层水汽的情况。在暴雨出现前 6 个小时,表征大气整层湿度条件的相对湿度和可降水量是逐渐增大的,也就是说在强降水前整个大气有一个增湿的过程,最大相对湿度出现在 25 日 23 时左右,达 96%。这个过程对强降水的出现是十分重要的。

### 3.3 动力条件

#### 3.3.1 地面流场的特点

从加密自动站的逐小时资料分析得到的地面流场(图 3a)和温度场的分布情况可见,从 25 日 23 时开始,天津市东部地区开始出现辐合,26 日 00 时在中部偏南地区形成一条中尺度辐合线,辐合线的东部有强烈的流场辐合,辐合线以北为东北气流,以南为东南气流,而从温度场看天津市大部分地区为暖区控制,暖中心在东南部,锋区在西北部边缘,南北部温差达  $5^{\circ}\text{C}$ ,此时正处于锋生和能量积聚阶段,暖平流强于冷平流。26 日 02 时,随着北方锋区的南压,冷空气逐渐渗透下来,冷暖空气交汇于辐合线上,激发了边界层的辐合上升运动,使得积蓄已久的不稳定能量得以释放,辐合线西部先出现降水,而后在东部由于前期的能量聚集、辐合强度都强于西北部,因此东部降雨也明显强于西部,东丽的军粮城竟出现了 10min 雨量超过 30mm 的降水强度,1 小时雨量已超过 100mm,是东丽建站以来罕见的大暴雨。图 3a 是 8 月 26 日 02 时地面加密自动流场和 02—08 时的 6 小时暴雨点,从图中可看到暴雨和大暴雨都出现在地面由 NW、NE、SW 三股气流形成的中尺度辐合线附近,由此可见地面中

尺度辐合线的存在和维持不仅增强了地面的辐合抬升,同时也是造成此次局地大暴雨的中尺度系统和触发条件。

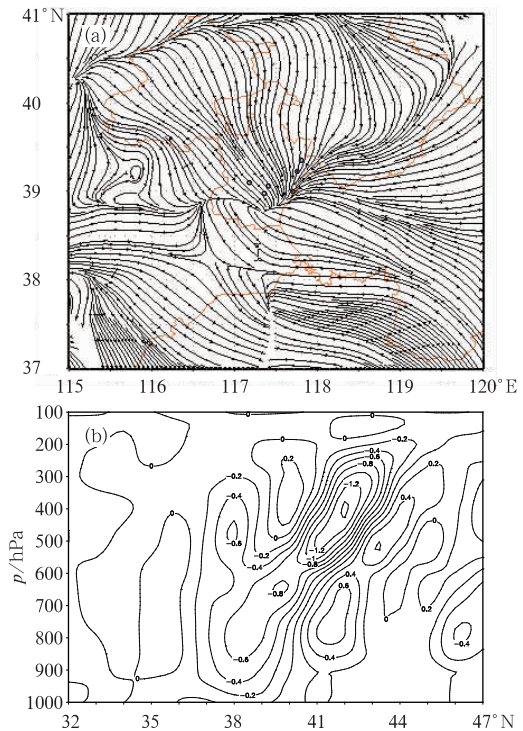


图 3 2007 年 8 月 26 日 02 时地面流场和 02—08 时的 6 小时暴雨点(小圈为暴雨点)(a); 26 日 02 时沿  $117.46^{\circ}\text{E}$  的垂直速度经向-空间剖面图(单位:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )(b)

#### 3.3.2 暴雨区垂直速度的发展和变化

为了揭示暴雨区上空垂直上升运动的情况,我们过大暴雨区( $39.07^{\circ}\text{N}, 117.46^{\circ}\text{E}$ )做了垂直速度的纬向和经向的空间剖面图,分析发现从 25 日 14 时到 26 日 02 时暴雨区上空的垂直上升运动经历了从无到有、由弱到强的发展阶段。25 日 14 时,从高空到地面为一致的弱下沉运动,此时对应的地面流场也是辐散的;25 日 20 时下沉运动开始转变为弱上升运动,地面图上已出现中尺度辐合线;26 日 02 时,此刻正是地面辐合线受冷空气影响触发对流性暴雨之时,暴雨区上空 500hPa 以下为一致的上升运动,上升运动最

强出现在 600~700hPa 之间,为  $-0.7\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3b),强烈的上升运动将低层的水汽、能量、热量抬升到高空,形成了发展旺盛的对流云,造成了这次大暴雨的出现。同时从图 3b 中还发现,上升运动随高度的增高是向北倾斜的,形成了斜升气流,这种斜升气流使得降水物降落时可以很快脱离上升气流,因此上升气流不至于遭到削弱,从而使得强对流得以维持较长时间,形成稳定状态的风暴云<sup>[2]</sup>,这也是出现强降水的原因之一。

#### 4 多普勒天气雷达特征

从地面加密自动站 10 分钟雨量看,本次降水主要集中在两个阶段,第一阶段从 26 日 2:50 到 4:00,雨量为 175.3mm,其中 10min 最大雨强达到 33.9mm,为特大暴雨强度;第二阶段从 4:50 到 6:20,雨量为 62.4mm,其中 10min 最大雨强达到 9.9mm,为大暴雨强度。图 4a(见彩页)是第一阶段强降水时  $1.5^\circ$  仰角多普勒天气雷达回波的演变情况。从图中明显看到,2:12 天津东南部仅有几个强度为 45dBz 的初生小回波单体,之后回波迅速发展加强,到 2:36 已发展成一条多个强度中心为 50dBz、东北—西南向的强回波带,对应实况,这时东丽的强降水已经开始且雨强达到最强。随着回波带向东北方向移动,回波带上强回波中心的范围不断扩大,同时在回波带的后面不断有新生的强回波单体发展加强,在 3:30 沿回波带方向做回波垂直剖面可以看到(图 4b,见彩页),回波带上依次排列着 5 个强度为 50dBz 的强回波中心,东丽区位置正好位于第四个强回波中心前(图中三角位置),到 4:00 共有 5 个中心强度为 50dBz 回波单体依次经过东丽地区,造成该地 70min 175.3mm 的特强降水,可见回波列车效应非常明显<sup>[16]</sup>。而从天气系统的演变来看,这一阶段正是 700hPa 切变南压、地面

辐合线维持和加强、非常有利于上升运动发展的时期。第二阶段的降水是与高低空系统的进一步东移、南压并逐渐减弱的过程相对应,降水强度较第一阶段有了明显的减弱。另外从图中还可看到,虽然各强回波单体的高度均伸展到 8km 以上,但 45dBz 强回波的高度基本在  $0^\circ\text{C}$  层以下(当天的  $0^\circ\text{C}$  层高度为 4.5km),这说明  $0^\circ\text{C}$  层以下 45dBz 以上的强回波基本上是对流云中液态雨滴散射的结果,因此雨强应该较大。对应实况没有出现冰雹,而出现强降雨,这说明 45dBz 强回波高度始终处于  $0^\circ\text{C}$  层以下,也是造成此次特强降水的主要原因。之后强回波迅速东移,影响此地的降水回波强度减弱,第一阶段强降水结束。从对应的径向速度图看(图略),随降水回波迅速发展加强,在速度图上出现了明显的辐合,并在 2:30—2:48 时出现一明显中尺度逆风区,其位置正好与强度图上 50dBz 强回波位置相对应。逆风区的出现说明此地将有强降水出现<sup>[17-18]</sup>,而降水实况显示,这一时段正好是东丽区降水雨强达到最大时段。随后中尺度逆风区逐渐消失,但辐合区位置始终与强度图上强回波位置相对应。可见正是由于速度图上辐合区的出现并维持,特别是中尺度逆风区的出现,造成了东丽地区第一阶段的特强降水。50min 后第二阶段强降水开始,这一阶段回波强度虽然仍维持在 45dBz 上下,但较之第一阶段回波强度还是偏弱。从对应的径向速度剖面图(图略)上看到,辐合层高度明显降低、辐合强度也明显减弱。同时降水回波东移的速度比较快,列车效应不很明显,再加上本地能量的释放,因此这一阶段的降水强度明显减弱。从天气系统分析来看,此时地面中尺度辐合线伴随着高空槽、切变线的东移已南压并逐渐移出本市,因此降水强度逐渐减弱并停止。

以上分析说明:强回波对应强降水,回波列车效应明显,回波强度的变化与天气系统

的加强和减弱和变化密切相关。速度图上辐合区的出现并维持,是造成此次特大暴雨的关键,而速度图上中尺度逆风区的出现使降水雨强达到最强。另外 45dBz 强回波高度始终处于 0℃层以下,这也是造成此次特强降水的主要原因。

## 5 结论

(1) 此次局地大暴雨是在大尺度环流形势由经向调整为纬向时期产生的,主要影响系统为 500hPa 高空槽、700 和 850hPa 的切变线以及地面中尺度辐合线。

(2) 强降水分布极其不均匀,其主要原因是各种物理量的中尺度特征非常明显:其一是前期能量、稳定性和水汽输送均表现为东部地区强于西部;其二是地面中尺度辐合线东部强于西部。

(3) 在暴雨区 500hPa 以下为一致的上升气流,并随高度的增高向北倾斜,形成了斜升气流,这种斜升气流有利于强雷暴云的稳定发展。

(4) 强回波对应强降水,速度图上辐合区的出现并维持、降水回波列车效应明显,是造成此次特大暴雨的关键;而速度图上中尺度逆风区的出现使降水雨强达到最强。另外 45dBz 强回波高度始终处于 0℃层以下,这也是造成此次特强降水的主要原因。

## 参考文献

- [1] 李延香. 华北地区区域性暴雨综合预报技术[J]. 气象, 1997, 23(11): 22-26.
- [2] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 383-405.
- [3] 陆汉城, 杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [4] 杨晓霞, 李春虎, 李昌义. 2006 年 7 月 2-3 日淮河流域致灾暴雨的成因分析[R]. 天气轨道 2006 年灾害性天气预报技术高层研讨会.
- [5] 段海霞, 毕宝贵, 陆维松. 2004 年 9 月川渝暴雨的中尺度分析[J]. 气象, 2006, 32(5): 75-78.
- [6] 陈艳, 宿海良, 寿绍文. 华北秋季大暴雨的天气分析与数值模拟[J]. 气象, 2006, 32(5): 88-93.
- [7] 毛冬艳, 周雨华, 张芳华, 等. 2005 年初夏湖南致洪大暴雨中尺度分析[J]. 气象, 2006, 32(3): 63-69.
- [8] 程麟生, 冯伍虎. “9817”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟[J]. 大气科学, 2001, 25(4): 465-478.
- [9] 周兵, 葛明. “9417”北京大暴雨的数值分析[J]. 气象, 1995, 21(10): 39-42.
- [10] 杜秉玉, 陈钟荣, 张卫星, 等. 梅雨锋暴雨的 Doppler 雷达观测研究: 边界层中尺度涡旋系统[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 201-207.
- [11] 杜秉玉, 陈钟荣, 张卫星, 等. 梅雨锋暴雨的 Doppler 雷达观测研究: 中尺度对流回波系统的结构特征[J]. 南京气象学院学报, 1998, 22(1): 47-55.
- [12] 刘洪恩. 单多普勒天气雷达在暴雨临近预报中的应用[J]. 气象, 2002, 27(12): 17-22.
- [13] 夏文梅, 王凌震, 张亚萍, 等. 低空急流的单多普勒速度特征[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 489-495.
- [14] 郭林, 陈礼斌, 施碧霞, 等. 闽南地区短时区域暴雨的天气及多普勒雷达资料概念模型[J]. 气象, 2003, 29(5): 41-45.
- [15] 许爱华, 应冬梅, 郭艳, 等. “2006. 04. 11-12”强风雹和暴雨环境条件与遥感图像特征分析[R]. 天气轨道 2006 年灾害性天气预报技术高层研讨会.
- [16] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 气象出版社, 2006: 170-177.
- [17] 伍志方, 叶爱芬, 胡胜, 等. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20(4): 391-400.
- [18] 夏文梅, 张亚萍, 汤达章, 等. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析和数值模拟[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 788-794.

# 何群英等：天津一次突发性局地大暴雨中尺度分析

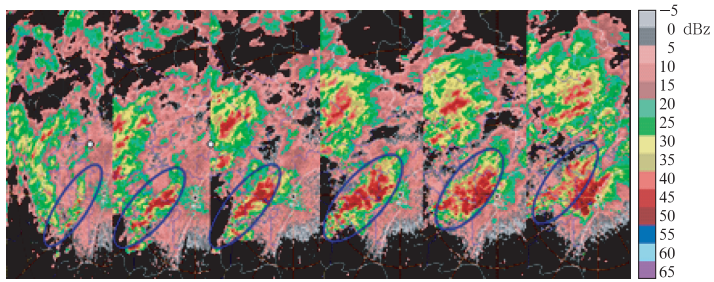


图 4a 强降水阶段多普勒天气雷达回波的演变

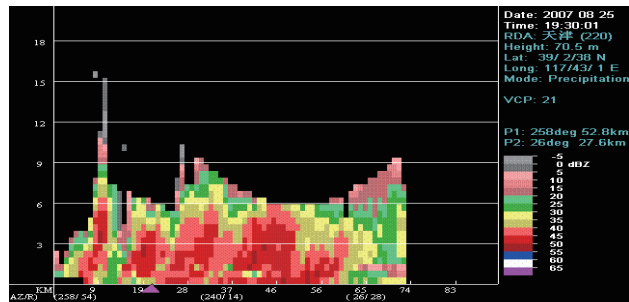


图 4b 2007年8月26日3:30强降水阶段多普勒天气雷达反射率因子剖面图  
图中三角位置为东丽区位置