

多普勒雷达回波在一次大暴雨中的应用分析^{*}

宿海良¹, 陈 艳¹, 吴 洪², 张晓东¹, 白春燕³, 袁雷武¹, 马前进¹

(1. 河北省唐山市气象局, 河北 唐山 063000; 2. 中国气象局培训中心, 北京 100081;

3. 河北省沧州市气象局, 河北 沧州 061001)

摘 要: 利用多部新一代天气雷达资料结合常规探空资料和逐小时的自动站资料, 对2007年7月18日发生在河北省东部平原(以下简称冀东平原)的一次区域性暴雨过程进行分析。结果发现: 低层中 α 尺度切变线的南压、东移及“人”字形辐合线是本次降水过程的主要影响系统; 降水发生前西南暖湿气流和冀东平原近地层偏东风是“人”字形辐合线形成的直接原因; 在不稳定层结存续条件下, 急流方向上上游雷达站中尺度低空急流的脉动对下游台站的短时暴雨预报具有一定时效的指示意义。

关键词: 雷达回波; 大暴雨; 应用分析; 冀东平原

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)01-0064-05

0 引言

河北是我国暴雨多发的区域之一, 近几年, 气象工作者对大的环流背景下引发的暴雨过程研究比较多^[1-4], 随着新一带天气雷达的投入使用, 对突发性中小尺度暴雨的研究也逐渐增多^[5-7]。2007年6月29日承德、秦皇岛新一代天气雷达开始投入业务试运行, 此外我们从区域中心得到了天津、北京的新一代天气雷达共享资料, 这使我们对冀东地区的区域性暴雨过程进行全面的中尺度分析成为可能。2007年7月18日的区域性暴雨天气过程, 是承德、秦皇岛新一代天气雷达有观测资料以来, 观测到的最强的一次降水过程。本文利用天津、承德、秦皇岛三部多普勒雷达的资料并结合逐小时的自动站资料过程进行了分析。

受低层冷切变线影响, 从7月18日早晨开始到中午结束, 冀东平原自西向东先后出现强降水天气。天津的宝坻、河北的香河、玉田、遵化、迁西、丰润、唐山、丰南、滦县、卢龙、秦皇岛十一个县市的降雨量达到50 mm以上(图1), 其中香河、玉田、丰润雨量超过100 mm, 丰润的水务局降雨量最大达到191.8 mm。这次降水过程有四个明显特点: ① > 50 mm的短时强降水落区集中在香河到秦皇岛一线约200 km范围内, 具有明

显的中 β 尺度天气特征; ②降水时间短, 强度大, 由强对流云团造成的强降水从06时香河开始出现到12时在秦皇岛结束, 历时仅有6 h, 丰润站08-10时降水量达到136 mm; ③短时强降水落区具有明显的自西向东移动发展的时空变化特征; ④50 mm以上降水区集中在燕山山脉南麓的平原地带, 地形作用明显。

1 天气形势分析

7月17日08时-18日08时, 西太平洋副热带高压逐渐增强西伸, 与中纬度大陆高压脊在115°E度附近的华东沿海同位相叠加, 使得中纬度环流经向度增大(图略)。7月17日20时-18日08时700 hPa天气图上贝湖低涡南掉至东北北部, -8℃的冷中心也随之南掉, 但始终落后低涡中心10个经度左右, 以致长时间向华北、东北地区输送强冷平流。同时17日20时河套中部有一西风带浅槽不断东移发展, 四川盆地有西南涡维持少动, 二者东部存在一个暖中心, 形成指向华北地区的西南向暖平流。500 hPa与700 hPa天气形势大致相同, 但冷平流不如700 hPa强。

200 hPa天气图上, 17日08时在新疆至内蒙古东部初步形成一条西风带急流, 最强中心在新疆东部达 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 到20时急流带向东加强延伸至

* 收稿日期: 2009-07-10

基金项目: 河北省气象局科研基金项目资助(2008ky20)

作者简介: 宿海良(1971-), 男, 河北滦南人, 高级工程师, 主要从事天气气候预报及研究. E-mail: tshlsu@tom.com

内蒙古中东部，最大风速加强到 $56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，此时冀东地区刚好处于急流出口的右侧，为暴雨落区提供了高空辐散场，其抽吸作用为中低层强对流的发生发展创造了有利条件。

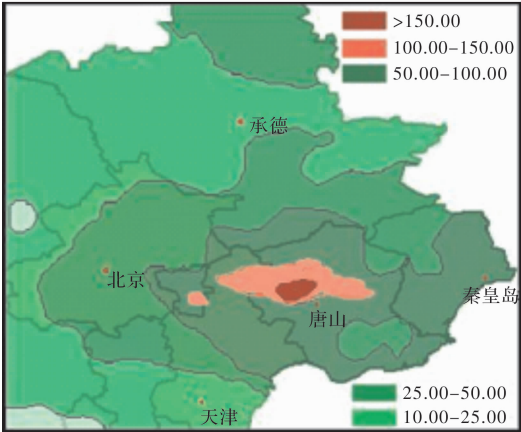


图1 2007年7月18日06–12时降水量分布图

7月17日20时850 hPa流场和全风速分析图(图2)上东北北部和四川盆地中部各有一低涡维持，在西南涡和东北涡两低之间从河套中部沿山西、河北与内蒙的交界至承德北部形成一条WSW–ENE向的中 α 尺度切变线，在西南涡、切变线和副高之间存在一条最大风速达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南低空急流带，为华北中东部输送了大量的暖湿空气，初步形成了中高层干冷低层暖湿的不稳定层结，之后随副高减弱切变线的东移南压触发了河北东部、南部和山东大部的强降水天气。

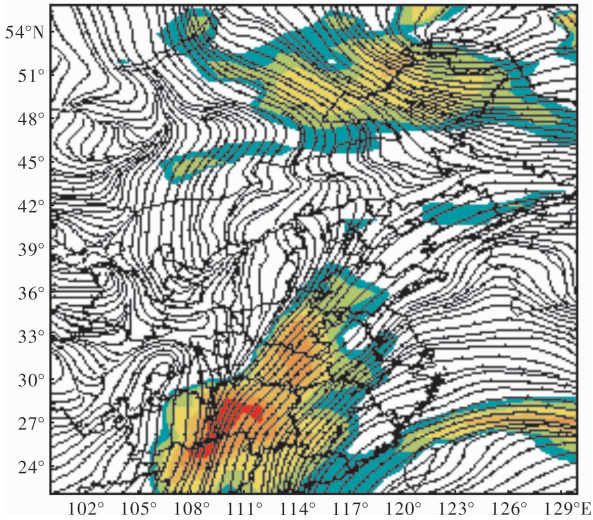


图2 7月17日20时850 hPa全风速和流场分析
(阴影区为风速 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域)

由以上天气尺度的分析可见，高低空急流的耦合作用以及高空辐散低层辐合的气压场配置为这次暴雨过程提供了有利的动力条件，而中层强冷平流

与低层西南暖湿气流在华北东部的交汇触发了强对流降水的发生。然而这些都只是大暴雨产生的前提条件而非必然条件。事实上，在整个降水期间从天气尺度上中低层并不能发现明显的低值系统和强风速辐合区，这也正是在这种有利的天气条件下河北并没有出现大范围暴雨的重要原因。以下利用多部新一代天气雷达的高时空分辨率资料进行分析，结合逐小时的自动站降水资料，试图从中尺度系统找出冀东平原出现大暴雨的可能原因。

2 中尺度对流系统的多普勒雷达图特征分析

2.1 回波演变特征与强降水的关系

从雷达反射率因子图上可以看到，这次过程属混合云降水。从大于 45 dBz 以上回波带的演变特征看，本次降水过程大致经历“人”字形回波和“弓”状回波两个阶段。

7月18日08:18在 1.5° 仰角的天津多普勒雷达反射率因子(以下简称 $\text{PPI}(Z)$)图上(图3a)，在雷达站西北约 80 km 处和雷达站东北 100 km 处各出现一条SW–NE走向和SE–NW走向的带状回波，两条带状回波带在雷达站正北约 110 km 处交汇形成“人”字形回波，回波最强区位于两条回波交界处。08:18至10:00 SW–NE走向回波在东移过程中， 55 dBz 以上的强回波区向东北方向传递并增强(图3a–c)，开始向“弓”形演变，造成了玉田–丰润的强降水，丰润站08–10时2 h雨量达 136 mm 。同时SE–NW走向回波向东北方向移动，逐渐减弱断裂成多个短带回波(图3d、3e)，造成09–10时卢龙 $26\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和秦皇岛 $36\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时暴雨。

此后人字形东支迅速减弱东移消散，SW–NE走向回波逐渐转成“弓”状回波(图3b–3d)，并开始出现转竖的趋势。“弓”状回波继续东移，回波带上不时有回波单体生消发展(图3d、3e)，给下游的大部分地区造成了 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 二次降水，至12:03 45 dBz 以上回波移出秦皇岛强降水结束。

2.2 中尺度低空急流

陶诗言指出^[8]：暴雨区中的低空急流是一种中尺度现象，不要与低压前面和副高西北侧见到的天气尺度的低空急流相混淆。为此刘洪恩^[9]给出了一个可供多普勒雷达径向速度分析中参考的中尺度低空急流判断标准：急流中心的水平距离 $\geq 80\text{ km}$ ，高度在 3 km 以下，时间尺度 $\geq 2\text{ h}$ ，存在水平风速 $\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 且风向一致的低空强风速区。

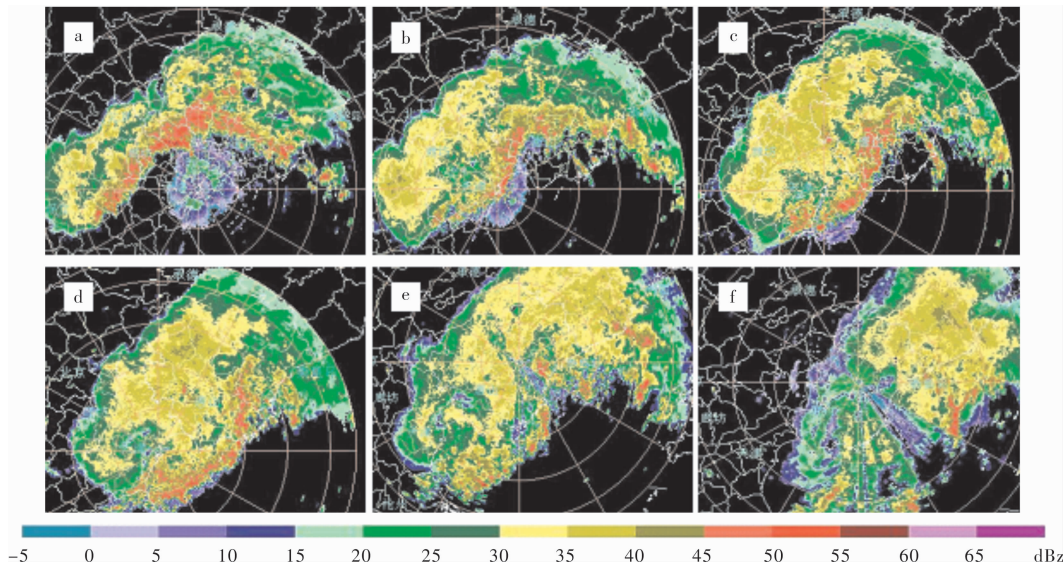


图3 2007年7月18日新一代天气雷达1.5°仰角反射率因子
(a. 天津08:18; b. 天津09:24; c. 天津10:00; d. 天津10:30; e. 秦皇岛11:03; f. 秦皇岛12:03)

在18日06:00天津1.5°仰角的多普勒径向速度平显(以下简称PPI(V))(图4a)上,雷达站东北和西南两侧对称出现正、负速度大值($10\sim15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)区,覆盖范围从距雷达站10 km延伸到距雷达站50 km处,此后覆盖范围进一步扩大延伸,06:42雷达站东北30~60 km处出现了 $15\sim20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 正径向速度大值区(图4b),到07:42大值区覆盖范围从15 km一直延伸到90 km处(图4c),根据标准大气折射下的测高公式推算,强风速区达到700 hPa(3 km左右)高度。据此判断雷达站上空显然存在一支正在向上传递的中尺度低空西南急流。由低空西南急流的流出方向推断急流刚好指向燕山山脉雾灵山北侧的承德雷达站,而承德雷达(此时850 hPa切变线尚未经过雷达站)PPI(V)(图略)虽表明中低层维持着西南气流但并没有对称的出入流速度大值区出现,说明燕山山脉对该支中尺度低空急流具有一定的阻挡作用,致使该中尺度西南急流携带的大量暖湿空气在燕山山脉南部的冀东平原形成堆积,为08~10时丰润站2 h 136 mm强降水前在中低层形成了深厚的暖湿层结,积蓄了大量不稳定能量。

对05:42秦皇岛PPI(V)(图4d)分析发现,该地区有两支急流存在但不如天津-玉田的急流深厚。表现在PPI(V)图上雷达站正北偏东和正南偏西10~50 km处有对称的正、负速度大值区出现,正负径向速度最大值达到 $10\sim15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明850 hPa以下有SSW-NNE向低空急流存在。此外在雷达站东北和西南100 km处有另一对正负速度大值区出现,正负径向速度极大值达到 $15\sim$

$20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明该区700 hPa高度层存在一支SW-NE向的急流。

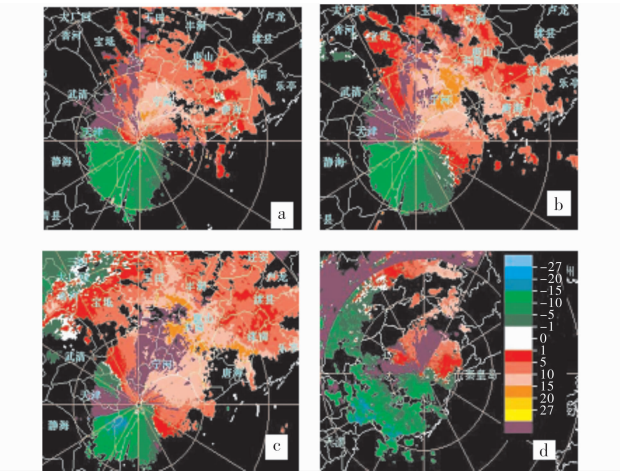


图4 2007年7月18日新一代天气雷达径向速度图(1.5°)
(a. 06:00 天津; b. 06:42 天津; c. 07:42 天津; d. 05:42 秦皇岛)

以上分析表明,冀东平原的西北部是低空西南急流,而东南部700 hPa高度上是西南急流,850 hPa以下是偏南低空急流。低空急流的存在为暴雨的产生提供了水汽、有利于不稳定层结的建立,并触发了冀东平原对流不稳定能量的释放,使中尺度上升运动加强。

2.3 垂直风廓线产品

2.3.1 中尺度低空急流的脉动

由以上分析可以看出丰润位于天津雷达站东北90 km处正径向速度大值区内。我们以水平风速 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 并假设在中尺度西南低空急流存续期间急流区风场变化是连续的,推算天津雷达站低层的风场变化大约在2 h后传递至丰润。下面我们分

析塘沽站 30 min 间隔的垂直风廓线产品，以推断强降水发生前丰润—塘沽的垂直风场变化。

刘淑媛等对华南暴雨的研究发现中尺度低空急流的脉动对本地区强烈天气和强降水有一定的指示意义^[10]。从图 5 可以看出从 05 时到 09 时降水发生前从 300 ~ 2700 m 高度有西南低空急流存在，这与对 PPI(V) 上关于低空急流的分析是一致的。进一步分析又可以发现这支急流整层从 6 时开始发生脉动，而后向上。这种中尺度低空急流在垂直方向上的脉动传递到丰润时，扰动引起强对流，造成了大暴雨。

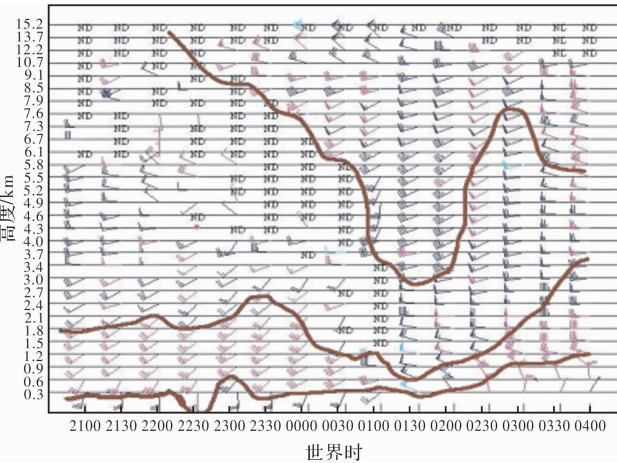


图 5 2007 年 7 月 18 日 05 时 -12 时天津雷达站(塘沽)间隔 30 min 的垂直风廓线图(粗实线为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风廓线)

2.3.2 高空急流动量下传和近地面偏东风

分析秦皇岛雷达站(位于卢龙)的垂直风廓线的变化(图 6)可以看出，高空急流在 08:38 和 09:33 分别出现两次较强的下传，从 06:30 到 08:00，高空急流从 6.1 km 下传到了 5.2 km，而在 08:00 到 08:38 迅速加强下传到 2.4 km，在短时间减弱收缩到 3.0 km 后又于 09:33 加强下传至 2.1 km。两次下传分别引起了两时段 $26\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $29\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水强度，说明高空急流下传引发的垂直层面上的动量下传对降水具有增幅作用。

此外从图 6 还可看出，在 300 m 以下近地面层一直维持具有很大偏东分量的东南风，说明降水以前冀东平原上盛行偏东风，这从 04 时至 10 时 1 h 一次的地面自动站资料可以得到充分的证实。近地面偏东风的形成和长时间维持与冀东平原南临渤海北靠燕山山脉的特殊地形有关。分析表明，近地面偏东风的存在使降水初期冀东平原上出现了除了西北干冷气团和西南的湿暖气团外的第三种性质的气团，即弱冷的相对中性气团。正是这三种不同性质的气团在冀东平原上相遇产生了

“人”字形的中尺度辐合线(图 7)。而后因为第三种性质的气团相对较弱且只存在于近地面的边界层，致使“人”字形的中尺度辐合线的东支相对较弱在 NW 向冷平流加强，被“西风”压倒后迅速减弱消失，“人”字形的辐合线变成“弓形”。

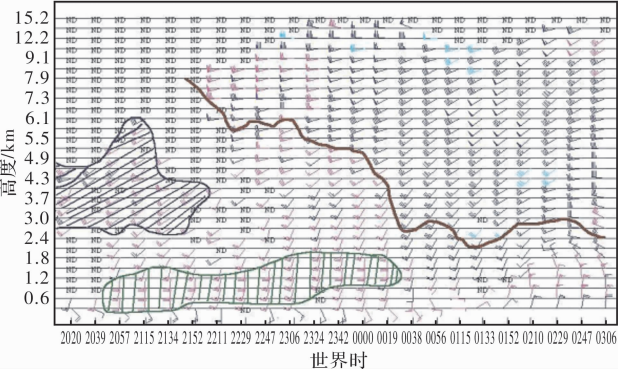


图 6 2007 年 7 月 18 日 04 时至 11 时秦皇岛雷达站间隔 18 分钟的垂直风廓线图(棕色粗实线为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风廓线，蓝色和绿色阴影分别对应前文在 PPI(V) 图上分析出的西南向和偏南向的两支急流)

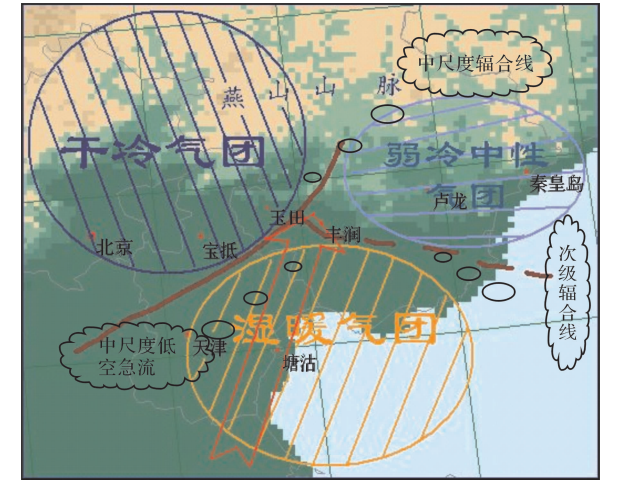


图 7 “人”字形中尺度辐合线形成示意图

“人”字形回波的形成和发展、东移并演变成“弓”状回波，是造成本次区域性暴雨的主要天气系统。

3 结论

- (1) 850 hPa 中 α 尺度切变线的南压、东移及“人”字形辐合线是本次降水过程的主要影响系统。
- (2) 中尺度低空急流对大暴雨的产生起到了关键作用，为暴雨区积蓄了大量水汽和不稳定能量，触发了冀东平原对流不稳定能量的释放。
- (3) 在不稳定层结持续条件下，急流方向上上游雷达站中尺度低空急流的脉动对下游台站的暴

雨预报具有 T_0 ($T_0 = R_i/V_r$, R_i 是预报台站到雷达站的直线距离, V_r 是 VWP 产品上的中尺度低空急流速度) 时间的预报时效。

参考文献:

- [1] 陈艳, 宿海良. CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用[J]. 气象, 2005, 31(10): 56–60.
- [2] 陈艳, 宿海良. “麦莎”台风造成冀东大暴雨的数值模拟和诊断分析[J]. 应用气象学报, 2008, 19(2): 209–217.
- [3] 陈艳, 宿海良. 华北秋季大暴雨的天气分析与数值模拟[J]. 气象, 2006, 32(5): 87–93.
- [4] 宿海良, 陈艳. 一次大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 河

- 北气象, 2007, 26(4): 16–21.
- [5] 伍志方, 曾沁. 短时大暴雨的多普勒雷达探测及暴雨预警信号发布[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 59–63.
- [6] 郑祚芳, 王迎春. 一次局地灾害性强降水过程的数值模拟分析[J]. 灾害学, 2004, 19(2): 7–12.
- [7] 伍志方, 胡东明, 梁玉琼. 气象雷达新技术及其在防灾减灾中的应用[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 36–40.
- [8] 陶诗言. 有关暴雨分析预报的一些问题[J]. 大气科学, 1977, 1(1): 64–72.
- [9] 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, 2001, 27(12): 17–22.
- [10] 刘淑媛. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨的关系[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 285–289.

Analysis on an Application of Doppler Radar Echo in a Heavy Rain

Su Hailiang¹, Chen Yan¹, Wu Hong², Zhang Xiaodong¹, Bai Chunyan³,
Yuan Leiwu¹ and Ma Qianjin¹

(1. Tangshan Meteorological Bureau, Tangshan 063000, China; 2. CMA Training Center, Beijing 100081, China; 3. Cangzhou Meteorological Bureau, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Based on the Doppler radar echo data and conventional sounding data as well as hourly rainfall data, a regional heavy rain event occurred in eastern Hebei plain on July 18, 2007 is analyzed. The results show that the southward and eastward moving of a meso- α -scale shear over low-level and the convergence line are the main influential systems. The convergence line is caused by both the maintaining southwest-moist-jet before the rainfall and the surface layer easterly airflow over eastern Hebei plain. Under the unstable stratification condition, the perturbation of meso-scale low-level jet of upstream radar stations is of significance for downstream stations' rainfall forecasting.

Key words: radar echo; rainstorm; application analysis; eastern Hebei plain