

侯淑梅,张立,党文升.2009 年 5 月山东春季大暴雨落区诊断与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,2010,29(3):231-238

# 2009 年 5 月山东春季大暴雨落区诊断与中尺度特征分析

侯淑梅,张立,党文升

(山东省东营市气象局,东营 257091)

**摘要:**利用 NECP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  网格点数据资料以及卫星云图、雷达回波、区域加密自动站资料等,对 2009 年 5 月 10 日山东大暴雨过程进行诊断分析。结果表明:西太平洋高压加强西伸,与西风带系统结合,使中低层切变线稳定少动和降水持续,西太平洋高压外围的西南气流为暴雨区提供了充足的水汽来源;暴雨区出现在水汽通量大值区长轴方向前端、水汽通量辐合区、水汽通量矢量气旋式弯曲拐角处以及强上升速度中心区;低层辐合、高层辐散垂直结构的移动方向为水汽辐合中心的长轴方向,当其长轴前方辐合减弱时,这种垂直结构趋于减弱;地面风速辐合线在鲁西北黄河沿岸的稳定维持对大暴雨落区具有较好的指示意义,中尺度雨团位于风速辐合线西段 1 个纬距左右,中尺度对流云团与中尺度雨团有较好的对应关系;强回波位于 850 hPa 切变线东侧,与地面中尺度辐合线、中尺度雨带位置相同,回波移动方向与回波伸展方向一致,形成典型的列车效应,是造成强降水的重要原因之一。

**关键词:**大暴雨;落区;环流形势;物理量诊断;中尺度分析

**中图分类号:**P458.1+21.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2010)03-0231-08

## 1 引言

山东省暴雨多发生在夏季,尤以 7、8 月份居多<sup>[1]</sup>,春季暴雨相对较少。对以往山东境内春夏暴雨过程,其研究成果较多<sup>[2-8]</sup>。如赵宇等<sup>[2]</sup>利用湿位涡理论对山东一次罕见春季暴雨天气进行诊断分析,认为倾斜涡度发展和湿位涡扰动是暴雨及气旋形成的重要原因。杨晓霞等<sup>[3]</sup>分析 2003 年 4 月山东一次春季暴雨的形成机制,认为暴雨是在高温高湿和对流不稳定环境下、中尺度上升运动与大尺度上升运动叠加触发不稳定能量释放而产生的。梁卫芳等<sup>[5]</sup>使用雷达回波产品,分析台风“韦帕”造成的青岛大暴雨过程,指出中小尺度系统活跃,辐合带、中气旋的存在是强降水的主要特征。王西磊等<sup>[7]</sup>分析了山东省 2009 年 5 月 9—10 日大暴雨天气的成因,认为大暴雨是在稳定大尺度环流背景下、低层中尺度切变线在华北南部稳定少动造成的。然而,实际业务中,暴雨天气仍是预报中的难点,但随着气象业务现代化水平提高,自动站、加密雨量站、多普勒雷达、卫星云图等非常规资料为更深入研究暴雨发生发展规律和机理提供了新的手段。

2009 年 5 月 9—11 日山东省出现一次罕见春季暴雨过程,造成济南、淄博、德州、滨州、聊城等市严重灾情,直接经济损失约 8.0 亿多元。为了提炼山东春季

暴雨的前期征兆和预报着眼点,提高其预报能力和准确率,本文利用 NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  网格点数据资料,计算各种物理量场,分析暴雨发生前和发生时各种物理量场特征,试图找到暴雨落区预报指标。同时,为了揭示中小尺度系统在暴雨过程中的作用,利用卫星云图、雷达回波、区域加密自动站资料,分析了此次暴雨的中尺度特征。

## 2 暴雨过程及特点

受切变线和地面倒槽共同影响,2009 年 5 月 9 日 08 时至 11 日 08 时(北京时,下同),山东全省 123 个国家气象观测站 48 h 平均降水量 50.9 mm,全省有 42 站 24 h 雨量超过 50 mm,其中有 24 站雨量超过 100 mm,有 8 站降水量大于 150 mm,有 2 站降水量大于 200 mm,其中高青站降水量最大,达 225.5 mm。此次降水 9 日上午从鲁西北开始,到 11 日下午全省降水陆续结束。

此次降水过程具有持续时间长、降水时段和降水区域集中、降水量和降水强度大等特点。强降水主要集中在 9 日夜间到 10 日上午。大暴雨集中在鲁西北到鲁中北部地区(图 1),全省有 20 个国家气象观测站日降水量超过当地有气象记录以来 5 月份日最大降水量极值。

收稿日期:2010-05-11;定稿日期:2010-08-05

资助项目:山东省科技发展计划项目“山东省极端灾害性天气特征分析及临近预警技术研究”(2009GG10008001)和山东省东营市气象局自立课题“数值预报产品在精细化预报中应用”

作者简介:侯淑梅,女,1970 年生,高级工程师,主要从事天气预报及天气气候研究工作。E-mail: shmh0808@163.com

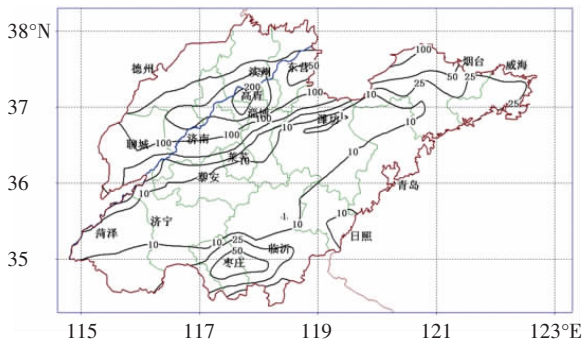


图 1 2009 年 5 月 9 日 08 时至 11 日 08 时山东省 48 h 累计降水量分布图(单位: mm)

### 3 大尺度环流背景与诊断分析

#### 3.1 高空环流背景

9 日 08 时, 500 hPa 中纬度欧亚环流形势为两高一低型, 乌拉尔山以东为一阻塞高压, 东亚地区沿 120°E 是一高压脊, 巴尔喀什湖东部有一低涡, 往南为一宽广低压区, 青藏高原东部有南支槽发展。这种“两高一低”环流形势持续到 10 日 20 时无明显变化, 有利于极地冷空气不断沿阻高东侧随西北气流扩散南下。由于此次强降水发生在春季, 从 584 dagpm 线所反映的西太平洋高压位置可知, 9 日 08 时到 20 时此线明显北抬西伸; 9 日 20 时此线与 120°E 的交点在 32°N(图 2), 其西侧西南暖湿气流随之北抬至华北南部; 至 10 日 08 时, 西太平洋高压最强, 此线西伸脊点到达 117°E 左右。在太平洋高压增强且稳定的形势下, 中低层切变线系统在一固定地区的活动受到制约<sup>[9]</sup>, 为这次降水持续创造了条件。太平洋高压稳定也有利于其西北侧西南气流向暴雨区域不断输送水汽。

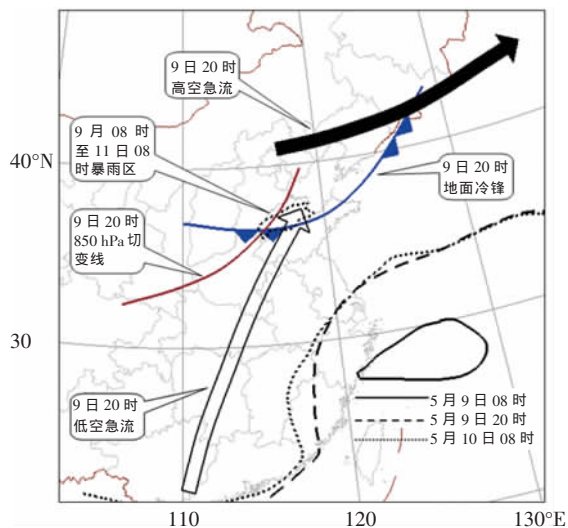


图 2 2009 年 5 月 9 日 08 时至 10 日 08 时 584 dagpm 线位置变化以及 9 日 20 时 200 hPa 高空急流、850 hPa 低空急流与切变线、地面冷锋系统综合图

天气尺度环流形势为区域性降水提供了必要的环流条件, 强降水发生的直接原因是中小尺度系统<sup>[10]</sup>。9 日 08 时, 850 hPa 图上, 有一切变线位于山东与河北交界处, 直到 10 日 08 时仍原地维持(图 2), 到 10 日 20 时切变线东移到鲁中地区; 700 hPa 切变线与 850 hPa 切变线在空间上几乎垂直; 山东省位于切变线南侧低空西南急流带内, 急流轴在济南、郑州到武汉一线, 急流中心风速大于  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 鲁西北、鲁中北部正好位于这支急流带左前方, 风速风向辐合明显, 不仅为大暴雨提供了充沛的水汽来源, 且在鲁北地区形成强烈水汽辐合<sup>[11]</sup>。此时, 低空急流出口区左侧的辐合区处于高空急流入口区右侧的辐散区, 高低空急流耦合作用产生高低空正的次级环流<sup>[12]</sup>, 有利于对流发展, 暴雨区正好位于高空急流轴右后方和低空急流轴左前方。9 日 20 时, 位于切变线西南部的山西、陕西、河南交界处形成一低涡环流, 使低层辐合加强, 加大了低层辐合上升运动, 促使低空急流加强<sup>[13]</sup>。低空急流源源不断将南海暖湿水汽输送至暴雨区, 为以上地区大暴雨发生提供了充足的水汽条件。10 日 20 时, 随着西太平洋高压南撤, 切变线逐渐移至山东中部, 山东中北部强降水基本结束。

#### 3.2 地面影响系统

地面图上(图略), 9 日 08 时, 地面倒槽从四川向东北方向伸向山东, 贝加尔湖到内蒙古东部为冷高压控制, 冷锋位于黑龙江中部、吉林北部、河北北部到陕西北部一带, 之后冷高压逐渐南压, 冷锋南移; 9 日 20 时, 冷锋南压到山东北部(图 2), 鲁西北地区转为东北风, 倒槽呈东北偏东—西南偏西方向从四川经湖北、河南伸向山东, 倒槽顶端位于黄海到山东半岛东部一带, 其顶端宽度较窄、曲率较大。冷空气从山东西部、河北东部向南侵入, 鲁西北地区降水强度开始增大, 强降水落区位于地面冷锋后部。到 10 日 08 时, 倒槽顶端伸向朝鲜半岛, 其顶端宽度增加、曲率减小, 冷高压向南伸至河北到山西一带, 冷锋南压到山东半岛南部至鲁中南部一线, 鲁西北处于倒槽与冷高压交界处, 此时降水强度仍较大, 但比 9 日夜有所减弱。10 日 14 时, 倒槽东移, 其顶端位于朝鲜半岛, 且其宽度较大、曲率较小, 倒槽长轴转为东北偏北—西南偏南方向, 鲁西北处于高压前部, 降水强度明显减弱, 暴雨结束。可见, 强降水出现在冷空气影响时, 位于冷锋后部, 当冷空气大举侵入鲁西北, 倒槽顶端曲率由大变小时, 强降水结束。

#### 3.3 水汽条件

水汽条件是影响降水发生的关键物理量, 持续性暴雨要求有天气尺度系统源源不断输送水汽。9 日 20

时,水汽通量图上(图 3a),一支明显的水汽输送带从西南地区伸向山东,有 2 个水汽通量大值中心分别位于重庆附近(中心值  $20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )和河南到山东一线(中心值  $15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ),其长轴呈东北—西南向,并伸至鲁西北地区。从水汽通量矢量方向看,水汽从西南方源源不断向山东输送,并在鲁西北地区汇聚,造成该处 9 日 20 时到 10 日 02 时出现暴雨(图略)。在鲁西地区,其矢量减小并分为两支,一支继续向东北方向伸展到山东半岛和渤海,另一支向西伸向河北,呈气旋式辐合。在长轴方向左侧,从河北中部到陕西南部均有气旋式弯曲,但有两处弯曲最明显,一是鲁西与河北交界处,二是陕西南部。这在等值线形状

上也有反映,水汽通量等值线呈东北—西南向带状,两个有明显气旋式弯曲处等值线均向北凸起,其中河北中南部存在一  $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  水汽通量次大值中心。10 日 02 时(图 3b),无论水汽通量长轴位置和方向,还是其矢量大小和方向,均与 9 日 20 时相似,但长轴左侧气旋式弯曲位置比 9 日 20 时略向北移,位于河北中东部与鲁西北交界处。9 日夜间,暴雨落区位于水汽通量大值区长轴前端鲁西到鲁西北地区,也是水汽通量矢量发生气旋式弯曲的拐角处。10 日 08 时(图 3c),水汽通量大值区长轴方向基本未变,位置略东移,其长轴前端位于鲁中北部,对应暴雨落区也相应东移到鲁中北部。

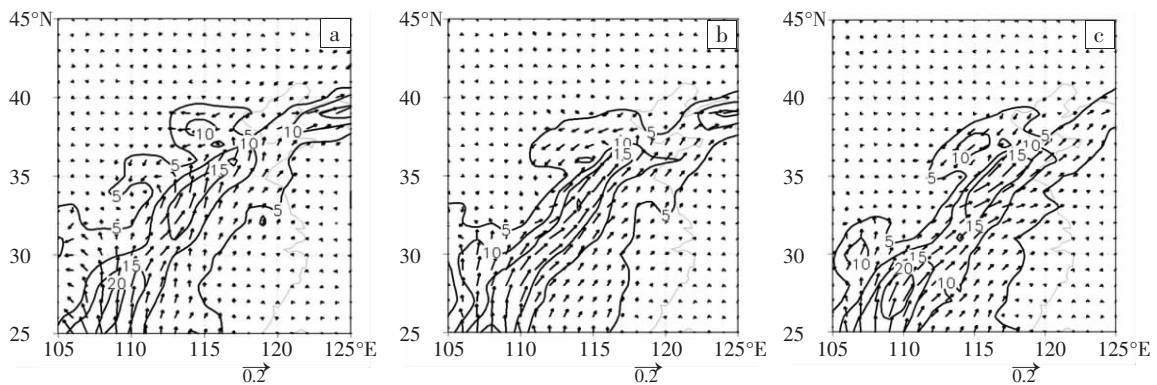


图 3 2009 年 5 月 9 日 20 时(a)与 10 日 02 时(b)、08 时(c) 850 hPa 水汽通量场(单位:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

水汽通量散度场上,9 日 20 时(图 4a),从鲁西经河南到陕南有一水汽辐合带,带中有两个大值中心,一个位于鲁西到鲁西南(中心值  $-50\times 10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ),一个位于河南西部到陕南(中心值  $-60\times 10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )。与图 3a 比较,这两个水汽辐合中心处于水

汽通量长轴的左侧,与长轴左侧呈气旋式弯曲处的两个凸起位置相吻合,也是长轴左侧两个气旋式弯曲最明显之处,这说明在水汽通量发生气旋式辐合的位置,水汽集中程度最高,也是暴雨落区之所在。10 日 02 时(图 4b),水汽通量散度负值中心略向北移,一个

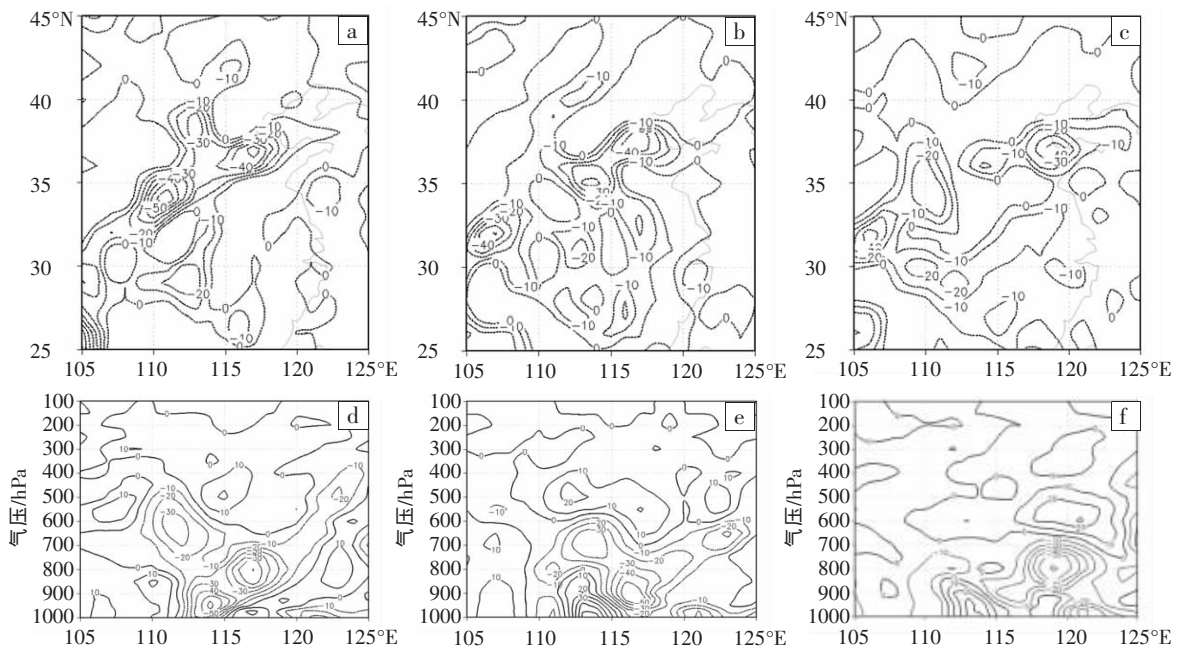


图 4 2009 年 5 月 9 日 20 时(a、d)与 10 日 02 时(b、e)、08 时(c、f) 850 hPa 水汽通量散度图及沿  $37^\circ\text{N}$  经暴雨中心的水汽通量散度纬向剖面图(单位:  $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

位于鲁西北到河北东部一带,另一个位于河南中部。比较图 4b 与图 3b 发现,位于鲁北的辐合中心也与图 3b 中气旋式弯曲处相对应。到 10 日 08 时,水汽辐合中心东移到鲁中到山东半岛一带(图 4c),其中心值为  $-40 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与图 3c 比较,正是水汽通量长轴前端,也是水汽通量矢量对头风的汇合处。由此可见,暴雨区出现在水汽通量散度辐合中心移动方向的前沿。

沿  $37^\circ\text{N}$  经暴雨中心作水汽通量散度纬向剖面图。从中可见,9 日 20 时(图 4d),在  $114^\circ\text{E}$  附近(河北南部到鲁西地区),800 hPa 以下为水汽辐合中心,最强中心( $-50 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )位于 925 hPa 左右,850 hPa 以上为弱辐合,到 600 hPa 以上为辐散区,属典型低层辐合、高层辐散配置。水汽辐合中心由低到高向东倾斜,到 800 hPa 在  $117^\circ\text{E}$  附近出现另一  $-50 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  辐合中心。10 日 02 时(图 4e),低层辐合、高层辐散的垂直结构沿此方向东移到  $117^\circ\text{E}$ ,此处由原来的低层辐散、高层辐合转为低层辐合、高层辐散,辐合中心( $-50 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )位于 925 hPa,700 hPa 以上为辐散,此时与暴雨发生时间对应,9 日 20 时到 10 日 08 时暴雨( $37^\circ\text{N}$ )出现在  $116^\circ-118^\circ\text{E}$  之间。水汽辐合中心由低到高仍向东倾斜,但其长轴东侧未出现另一强辐合中心。到 10 日 08 时(图 4f),低层辐合、高层辐散的垂直结构东移到  $122^\circ\text{E}$ ,但低层辐

合中心减弱,在  $120^\circ\text{E}$  以西边界层均转为辐散区, $120^\circ-122^\circ\text{E}$ (山东半岛北部)边界层(925 hPa 以下)为弱辐合,900—700hPa 为强辐合区,辐合中心( $-60 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )位于  $119^\circ\text{E}$ ,800 hPa 左右,700 hPa 以上为辐散,而此处低层为弱辐散区。这种垂直结构不利上升运动发展,因而半岛北部只有个别站出现暴雨,降水强度远小于鲁西北地区。

综上可知,暴雨区出现在水汽通量大值区长轴方向前端、水汽通量辐合区、水汽通量矢量发生气旋式弯曲拐角处;强降水易发生在水汽低层辐合、高层辐散配置区域,当这一配置破坏后,其降水强度趋于减弱。水汽通量散度场低层辐合、高层辐散垂直结构的移动方向与水汽辐合中心长轴方向一致,当长轴前方辐合减弱时,这种垂直结构不利上升运动发展。

### 3.4 动力条件

5 月 9 日 20 时(图 5a),850 hPa 散度场上,从鲁西北经鲁西南到陕西南部是一条带状东北—西南向负散度区,其中  $-40 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  辐合中心位于鲁西北到鲁西南。10 日 02 时(图 5b),该辐合中心略有北抬,位于河北东部到鲁西北地区,对应 9 日夜间鲁西北暴雨。10 日 08 时(图 5c),该辐合中心东移到鲁北到山东半岛北部一带,与 10 日 08—14 时暴雨中心东移到鲁北和山东半岛北部地区相吻合。

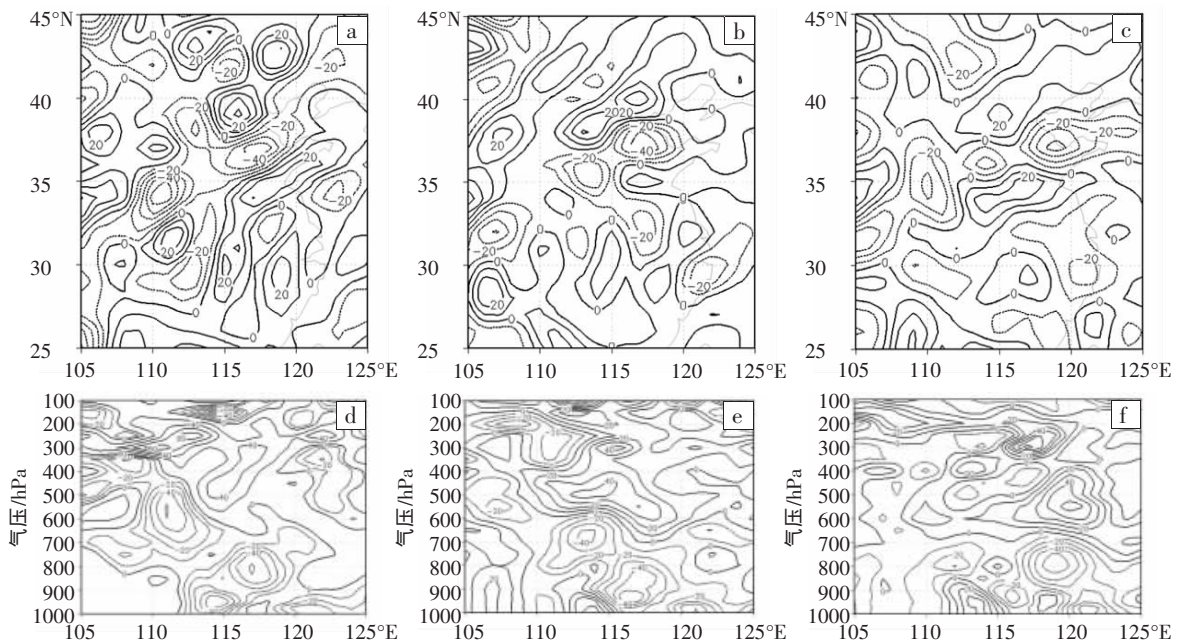


图 5 2009 年 5 月 9 日 20 时(a、d)与 10 日 02 时(b、e)、08 时(c、f) 850 hPa 散度场及沿  $37^\circ\text{N}$  经暴雨中心的散度纬向剖面图(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

从沿  $37^\circ\text{N}$  经暴雨中心的散度纬向剖面图上可见,9 日 20 时(图 5d),在  $114^\circ\text{E}$  附近(河北南部到鲁西地区),800 hPa 以下为辐合中心,最强中心( $-50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )位于 925 hPa 左右;850 hPa 以上为弱辐合,到 600 hPa

以上为辐散区,为典型的低层辐合、高层辐散结构。辐合中心由低到高向东倾斜,到 800 hPa 在  $117^\circ\text{E}$  出现另一  $-50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  辐合中心。10 日 02 时(图 5e),低层辐合、高层辐散的垂直结构东移动到  $117^\circ\text{E}$ ,上述辐合中

心( $-50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )位于 925 hPa 附近,此时前后鲁西北地区出现暴雨。10日08时(图5f),低层辐合区移到 122°E 一带,中心强度减弱,120°E 以西边界层均转为辐散区,不利于上升运动发展。对比图5和图4可见,这次大暴雨过程的散度场与水汽通量散度场的水平结构和垂直结构非常相似,低层辐合、高层辐散的特征与暴雨区配合较好。

从沿 37°N 经暴雨中心的垂直速度纬向剖面图上可见,9日20时(图6a),在 113°—115°E 由地面到 400 hPa 为上升运动,最大值为  $-9 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位于 700—

500 hPa 层;10日02时(图6b),上升运动中心东移并加强,在 115°—122°E 上升运动区从地面伸展到 300 hPa,强中心( $-12 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )仍位于 700—500 hPa(114°—116°E);9日20时到10日08时,37°N 暴雨区在 116°—118°E,位于强上升运动中心东侧,即其移动方向的前方;到10日08时(图6c),上升运动中心继续东移,其东西范围在 116°—125°E,强中心高度略有降低,位于 800—600 hPa(118°—120°E)。与之对应,10日08—14时,地面暴雨中心东移到山东半岛北部,降水强度比9日夜间要小。由此可见,暴雨区随强上升运动中心而移动。

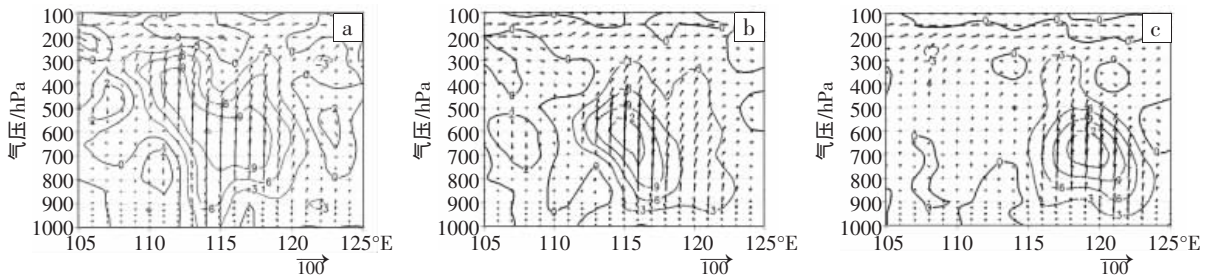


图6 2009年5月9日20时(a)与10日02时(b)、08时(c)沿 37°N 经暴雨中心的垂直速度纬向剖面图(单位:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

## 4 中尺度分析

### 4.1 中尺度雨团

将 1 h 降水量  $\geq 10 \text{ mm}$ 、生命史  $\geq 2 \text{ h}$  的雨区定义为中尺度雨团。从 2009 年 5 月 9—10 日全省区域自动站每小时雨量  $\geq 10 \text{ mm}$  雨团动态图上(图 7a)及同期山东境内中尺度雨团生命史一览表(表 1)中可见,从 5 月 9 日 19 时开始,山东境内黄河以北的西南方先后生成 6 个中尺度雨团,雨团大部分在西南气流引导下向东或东北方向移动。这些中尺度雨团在黄河沿岸排列成带状,组成一条中尺度雨带,该雨带刚好位于 850 hPa 切变线(图 2)东侧。其移动过程中有的合并发展,有的单个发展,给所经之地带来强降水。每个雨团的最大雨强均超过  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,其中雨团 E 生命史最长,历时 11 h,其最大雨强为  $37.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (高唐站),雨团 B 生命史最短,仅 4 h,最大雨强  $26.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (齐河站)。11 时之后,雨团全部减弱消失,全省 1 h 降水量减弱到 10 mm 以下。由此可见,中尺度雨团不断沿 850 hPa 切变线附近生成并向东北方向移动是造成鲁西北地区大暴雨的重要原因。

分析过程最大降水量高青站逐时降水量变化表明(图 7b),降水强度从 9 日 16 时开始逐渐增大,到 21 时雨团 C 在高青生成,使高青雨强达到最大,即  $26.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;之后,降水强度有所减弱,为  $5 \sim 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  不等,到 10 日 03 时雨团 D 移到高青,降水强度增大,达到  $21.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,此时对应中尺度雨团达到最强;到 09 时,降水强度维持在  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上(10 日 05 时除

外,仅  $8.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),其中 10 日 07 时雨团 E 移到高青,降水强度达到次大( $23.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),此时中尺度雨团强度和范围仍较大,与 06 时接近(图 7a);09 时后,随着中尺度雨团 E 逐渐移出高青并减弱消失,高青站降水强度趋于减弱。

### 4.2 地面中尺度辐合线

分析山东省区域加密自动站实况资料表明(图 8),5 月 9 日 15 时,风向辐合线位于鲁中北部到山东半岛北部地区,此时辐合较弱。随后,山东北部风速逐渐增大,到 20 时风向辐合线南移到鲁中到山东半岛中部一线,其以北地区吹  $4 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  东北风,以南地区吹小于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  偏南风。同时,鲁西北黄河以东风速在  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,黄河以西风速  $6 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,沿黄河形成一条风速辐合线。正是此风速辐合线造成 21 时中尺度雨团在鲁西北生成,并使鲁西北降水强度增大。之后,风向辐合线稳定在鲁中一带,黄河以东风速逐渐减小,风速辐合线沿黄河沿岸 1 个纬距内南北摆动。10 日 02 时,风向辐合线移到鲁中南部到鲁西南。风速辐合线位于黄河下游并跨河呈东北—西南向,其西侧东北风  $6 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,东侧偏北风  $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风速辐合较明显。对应地面中尺度雨团较强,高青站位于辐合线东侧,03 时降水量超过 20 mm。当冷空气深入山东境内时,风向辐合线南移,10 日 06 时全省大部转为偏北风,仅鲁东南仍是偏南风。沿黄河的风速辐合线略向东摆,位于高青站附近,造成该站降水强度再次增大,07 时降水量达  $23.6 \text{ mm}$ 。随风速辐合线上游风速开始减小,08 时以后风速为  $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其下游吹东北风,风速  $2 \sim 4$

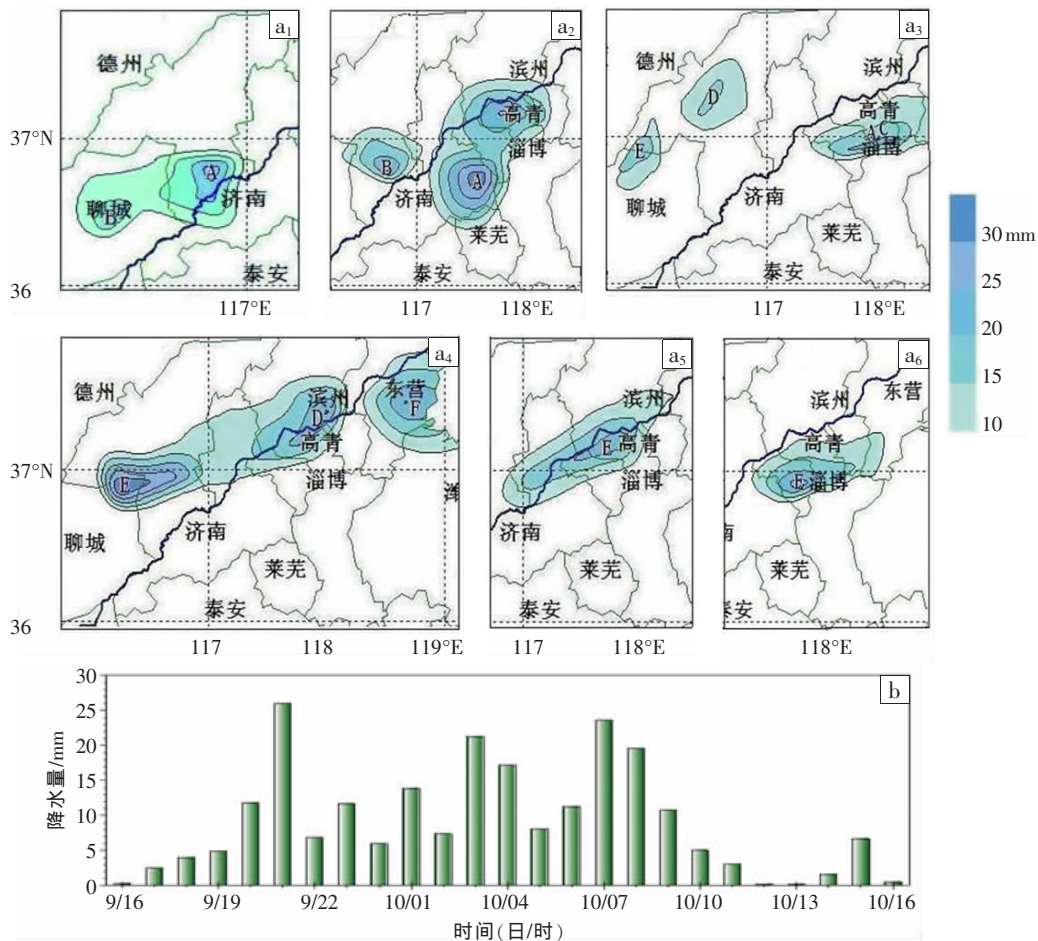


图 7 2009 年 5 月 9 日 19 时(a<sub>1</sub>)、21 时(a<sub>2</sub>)与 10 日 00 时(a<sub>3</sub>)、03 时(a<sub>4</sub>)、07 时(a<sub>5</sub>)、09 时(a<sub>6</sub>) ≥10 mm 雨团动态图(粗实线为黄河),以及高青站 9 日 16 时至 10 日 16 时逐时降水量直方图(b,单位: mm)

表 1 2009 年 5 月 9—10 日山东境内中尺度雨团生命史一览表

雨团	生成时间	生成地点	移动方向	结束时间	最大雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )
A	9 日 19 时	禹城	东、东北	10 日 00 时 A、C 合并,01 时消失	35.5
B	9 日 19 时	聊城	东北	9 日 23 时减弱消失	26.4
C	9 日 21 时	高青到滨州	东	10 日 00 时 A、C 合并,01 时消失	26.6
D	10 日 00 时	德州东部	东	10 日 05 时 D、F 合并,07 时消失	21.3
E	10 日 00 时	聊城西部	东北、南	10 日 11 时减弱消失	37.8
F	10 日 03 时	东营南部	东	10 日 05 时 D、F 合并,07 时消失	25.3

m·s<sup>-1</sup>,辐合强度减弱。待黄河以西风速逐渐减小,10 日 10 时后全省大多数站风速降至 4 m·s<sup>-1</sup> 以下,仅少数站风速维持在 6~8 m·s<sup>-1</sup>,风速辐合线范围减小,位置仍沿黄河两侧摆动,鲁西北降水强度随之减弱。14 时风速辐合线位于黄河西岸,之后减弱,到 18 时消失。

对比图 8 和图 2 可知,地面风向辐合线与冷锋位置一致,风速辐合线一直位于冷锋后部、850 hPa 切变线前部、地面倒槽后部冷空气侵入区。

对比图 7 和图 8 可知,中尺度雨团主要由风速辐合线造成,位于风速辐合线西段 1 个纬距左右。这与崔晶等<sup>[14]</sup>在对威海市 2004 年 8 月 5 日夜间中 β 尺度大暴雨过程研究后得到的“地面辐合是导致强降水再

次出现的主要触发机制”结论一致。

对比图 8 中的风向辐合线位置和 5 月 9 日 20 时至 10 日 14 时每 6 h 鲁西北降水区发现,降水区一般位于风向辐合线的后部,风向辐合线基本上与降水区前沿一致。

综上所述,对强降水过程,可由风向辐合线判断降水区范围,由风速辐合线判断强降水落区位置。

#### 4.3 中尺度对流云团

FY-2C 红外卫星云图上,9 日 18 时(图略)从河套到华北地区有大片降水云带,云带前沿的德州和济南分别形成两块小的对流云团,并在东移过程中发展成云团 A,云顶亮温( $T_{BB}$ )最低为-52 °C,20 时(图 9a)

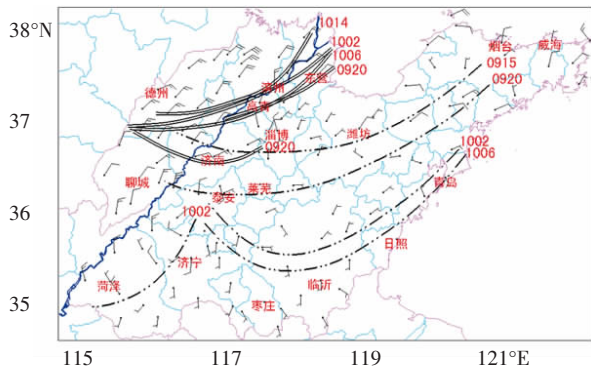


图 8 2009 年 5 月 9 日 15 时至 10 日 14 时地面中尺度辐合线动态图

双实线为风速辐合线;点画线为风向辐合线;  
数字表示时间,前两位为日期,后两位为时次;  
风场为 10 日 02 时实况

经高青站移到鲁北黄河入海口一带。济南附近有云团 B 发展加强,于 21 时移到高青至邹平附近。对流云团 A、B 相继经过高青站上空,使该站从 20 时开始降水强度增大,21 时 1 h 降水量超过 25 mm,出现降水峰

值。此后,山东西部继续有对流云团东移发展,到 10 日 01 时(图 9b),沿黄河大片降水云带内又生成两个对流云团 C、D,云团 C 位于惠民到高青一带,中心  $T_{BB}$  最低为  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,造成高青站降水强度超过  $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,云团 D 位于济南附近,中心  $T_{BB}$  最低为  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,于 04 时移到高青到邹平一带,使高青站 04 时降水强度仍大于  $15\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。之后,云团 E 在德州生成后于 06 时(图 9c)移到东营,云团 F 从聊城移到济南,08 时位于高青到桓台附近,中心  $T_{BB}$  最低为  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;造成黄河沿岸新的降水高峰,07、08 时高青站 1 h 降水量均大于 20 mm。此后云团 E、F 继续东北移,依次进入渤海,山东降水强度减弱。由此可见,新的对流云团不断在鲁西北黄河沿岸生成是造成鲁西北罕见大暴雨的重要原因,对流云团与中尺度雨团位置一致,二者具有较好的对应关系。这与于希里等<sup>[15]</sup>在分析山东半岛北部沿海一次局地暴雨得到的结论“暴雨的产生和加强与云团的合并及加强有密切关系”一致。

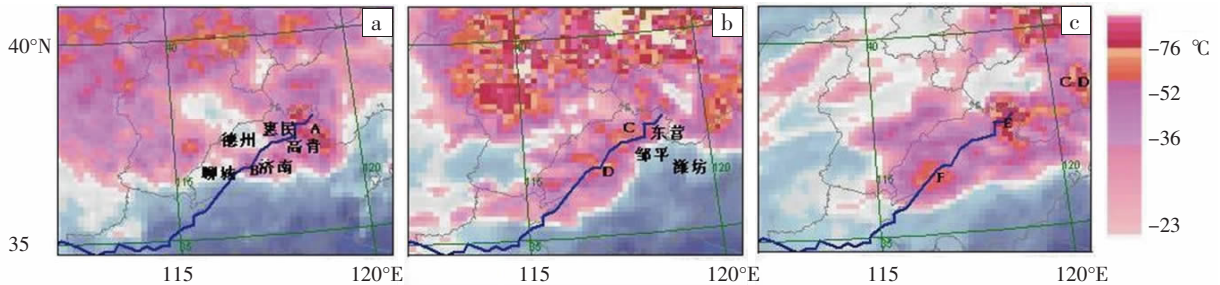


图 9 2009 年 5 月 9 日 20 时(a)与 10 日 01 时(b)、06 时(c) FY-2C 红外卫星云图(蓝实线为黄河)

#### 4.4 降水回波

济南多普勒雷达回波图上,5 月 9 日 20 时(图 10a),从西南向东北方向沿黄河有一带状强回波带,大范围 30~40 dBz 回波带中镶嵌小块 40~50 dBz 回波。高青站上空回波 40~45 dBz,对应 21 时雨强峰值。强回波带移动方向为 NEE,恰好与黄河走向一致。回波带在移动过程中强度和范围变化不大,>40 dBz 回波源不断从 SW 向 NEE 方向移动。10 日 02 时(图 10b),强回波带主要位于黄河以东地区。沿黄河一线回波强度多在 25~35 dBz,高青站及其上游为 30~35 dBz 回波区所覆盖,03 时高青站雨强仍大于 20 mm。04 时以

后,从济南方向有大于 40 dBz 回波向东北方向移动。06 时(图 10c),该强回波移到高青站上空,回波强度 35~40 dBz,对应高青站 07 时雨强达到次大值。该强回波带在黄河以东沿黄河向东北方向移动,07 时以后减弱到 25 dBz 以下,高青站强降水也趋于减弱。由此可见,此次强降水过程中,不断有 >30 dBz 回波从西南方向沿黄河两岸向东北方向移动,强回波位于 850 hPa 切变线东侧,与地面中尺度辐合线、中尺度雨带位置相同,回波移动方向与回波伸展方向一致,形成典型的列车效应,是造成这次强降水的一个重要原因。

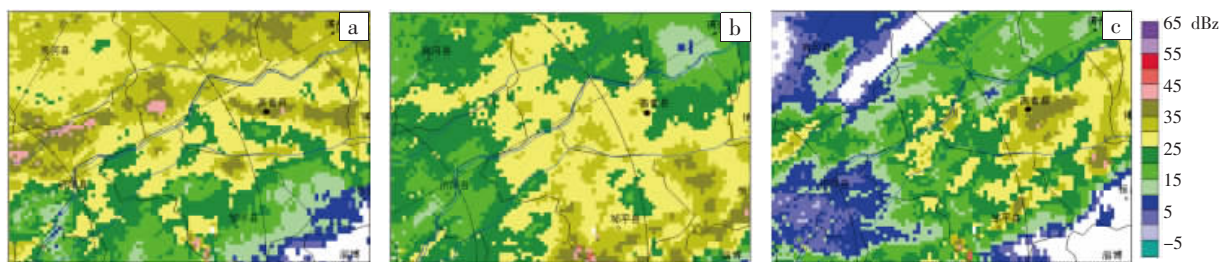


图 10 2009 年 5 月 9 日 20 时(a)与 10 日 02 时(b)、06 时(c)济南多普勒雷达基本反射率因子图  
双实线所示为黄河,黑圆点所示为高青站

## 5 结论

(1)西太平洋高压加强西伸,使切变线稳定少动和降水持续。西太平洋高压外围西南气流为暴雨区提供了充足水汽源。强降水出现在冷空气影响时,当其大举侵入鲁西北,倒槽顶端曲率由大变小时,强降水结束。

(2)暴雨区出现在水汽通量大值区长轴方向前端、水汽通量辐合区、水汽通量矢量气旋式弯曲拐角处。暴雨区随强上升运动中心而移动。

(3)强降水易发生在水汽低层辐合、高层辐散的区域。水汽通量散度场低层辐合、高层辐散垂直结构的移动方向为水汽辐合中心长轴方向,当长轴前方辐合减弱时,这种垂直结构趋于减弱。

(4)地面风速辐合线在鲁西北维持对大暴雨落区有较好指示意义,中尺度雨团位于风速辐合线西段 1 个纬距左右,中尺度对流云团与中尺度雨团对应较好。

(5)强回波位于 850 hPa 切变线东侧,与地面中尺度辐合线、中尺度雨带位置相同,回波移动形成典型的列车效应,是造成这次强降水的重要原因之一。

### 参考文献:

- [1] 曹钢锋,张善君,朱官忠,等.山东天气分析与预报[M].北京:气象出版社,1988:156.
- [2] 赵宇,张兴强,杨晓霞.山东省春季一次罕见暴雨天气的湿位涡分析

- [J].南京气象学院学报,2004,27(6):836-843.
- [3] 杨晓霞,赵宇,高留喜.山东省春季大暴雨天气的形成机制个例分析[J].气象科技,2005,33(1):46-47.
- [4] 王友强,李春光,王延贵.2004 年鲁西南两次台风低压暴雨过程对比分析[J].河南气象,2006,29(1):36-37.
- [5] 梁卫芳,耿敏,李庆宝.台风韦帕全区性大暴雨过程分析[J].气象,2009,35(1):74-79.
- [6] 侯淑梅,李灿,王月兰,等.一次暴雨过程预报的多模式 NWP 产品与物理参数的综合分析应用.暴雨灾害,2009,28(1):36-42.
- [7] 王西磊,吕淑芳,赵京峰,等.2009 年 5 月 9—10 日山东大暴雨天气分析[J].暴雨灾害,2009,28(2):173-178.
- [8] 康桂红,郝兰春,袁超,等.2009 年 7 月 8—9 日泰安市暴雨成因分析[J].气象与环境科学,2009,32(S1):221-22.
- [9] 孙淑清,马淑杰.西太平洋副热带高压异常及其与 1998 年长江流域洪涝过程关系的研究[J].气象学报,2001,59(6):719-729.
- [10] 赵玉春,王仁乔.一次致洪暴雨的中尺度分析[J].气象科技,2005,33(6):245-249.
- [11] 顾清源,肖递详,黄楚惠,等.低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用[J].气象,2009,35(4):59-67.
- [12] 杨晓亮,李江波,杨敏.河北 2007 年 7 月 18 日局地暴雨成因分析[J].气象,2008,34(9):47-56.
- [13] 徐海明,何金海,周兵.夏季长江中游大暴雨过程中天气系统的共同特征[J].应用气象学报,2001,12(3):317-326.
- [14] 崔晶,张丰启,吕守敏.连续暴雨过程中的中- $\beta$  尺度大暴雨的成因分析[J].气象,2005,31(10):72-75.
- [15] 于希里,闫丽凤.山东半岛北部沿海强对流云团与局地暴雨[J].气象科技,2001,29(1):39-41.

## Mesoscale Analysis and Area Diagnosis of a Spring Torrential Rain in Shandong Province in May 2009

HOU Shu-mei, ZHANG Li, DANG Wen-sheng

(Dongying Meteorological Bureau of Shandong Province, Dongying 257091)

**Abstract:** Using NCEP 6-hourly reanalysis data with resolution  $1^\circ \times 1^\circ$ , satellite images, Doppler-Radar data and the intensive observations of automatic weather stations, a torrential rain process in Shandong province on 10 May 2009 was diagnostically analyzed. The results show that the high over the West Pacific strengthening and extending westwards combining with westerly systems leads to the stability of shear in the lower and medium troposphere and the continuance of precipitation. The southwest airflow from the northwest side of the western Pacific high provides sufficient moisture for rain region. The torrential rain happens in the area including the top of long axis in the great positive value area of water vapor flux, convergence zone of water vapor flux, the turning of water vapor flux vector cyclonic and the central area of strong ascending velocity. The moving direction of vertical structure of convergence in the low-level and divergence in the upper level is consistent with the horizontal direction of long axis of moisture convergence center. This kind of the vertical structure tends to be weak when the convergence in front of weakens. The surface wind speed convergence stabilizing in the northwest Shangdong province along the Yellow River shows a significant indication to torrential rain areas, the mesoscale rain clusters are located one latitude space away from the west section of surface wind speed convergence line. The mesoscale convective cloud clusters have a better correspondence with rain clusters. The strong radar echoes distribute in the east of shear at 850 hPa has the same location with both surface mesoscale convergence line and mesoscale rain zone. The moving direction of echoes is consistent with that of the extending of echoes resulting in typical "train effect". It is one of key reasons to create severe precipitation.

**Key words:** Torrential rain; Rain region; Circulation situation; Physical diagnostic; Mesoscale analysis