

2007年7月18—19日山东省 大暴雨天气分析

杨晓霞¹ 王建国² 杨学斌³ 孙 军⁴ 杨成芳¹ 盛春岩¹

(1. 山东省气象台, 济南 250031; 2. 山东省气象局;
3. 山东省德州市气象局; 4. 国家气象中心)

提 要: 应用常规观测资料、中尺度站资料、卫星云图、雷达回波和 T213 数值预报产品, 对 2007 年 7 月 18—19 日山东省大范围对流性暴雨天气的成因进行了分析。分析了产生暴雨的天气系统特征, 大气垂直稳定度和对流有效位能, 产生暴雨的水汽条件和动力触发机制, 给出了产生暴雨的对流云团演变特征。研究表明, 对流性大暴雨是由东北冷性低涡、前倾槽、副热带高压边缘西南暖湿气流和冷空气的共同影响产生的。低层强盛的偏南气流建立起水汽通道, 把水汽源源不断地向暴雨区输送。前倾槽结构和低层增温增湿使得大气强烈的对流不稳定和对称不稳定。低层较强的东北气流与强盛的西南暖湿气流侧向汇合, 垂直涡度增大, 辐合上升运动增强, 对流不稳定能量释放, 产生中尺度对流云团。地面冷锋前生成中尺度低压, 加强了辐合上升运动。高层辐散与低层辐合相配合, 有利于上升运动发展和维持。卫星云图中显示两个对流云团合并发展形成中尺度对流复合体(MCC)。雷达回波中表现为两个东西向的带状强降水回波相衔接, 缓慢南移; 暴雨区上空东北气流、西北气流和西南气流相汇合; 低层东北气流逐渐增大, 冷空气从低层侵入。

关键词: 水汽输送 大气不稳定 冷空气侵入 中尺度对流复合体 对流性暴雨

Analysis of Rainstorm Event over Shandong Province During 18—19 July 2007

Yang Xiaoxia¹ Wang Jianguo² Yang Xuebin³ Sun Jun⁴ Yang Chengfang¹ Sheng Chunyan¹

(1. Shandong Meteorological Observatory; 2. Shandong Meteorological Bureau;
3. Dezhou Meteorological Office; 4. National Meteorological Center)

Abstract: By using routine observational data, meso-scale observatioal data, satellite cloud image, radar echo, T213 model products and diagnosis analysis means, the rainstorm event over Shan-

资助项目: 国家气象中心科研开发课题“2007 年极端暴雨个例分析研究”

收稿日期: 2007 年 11 月 2 日; 修定稿日期: 2008 年 2 月 1 日

dong province during 18—19 July, 2007 is analyzed. The weather system, vertical stability of atmosphere, convective available energy, water vapor condition and dynamically triggering mechanism were discussed. The characteristic of convective clouds was worked out. The result shows that the rainstorm was caused by the interaction of the cold vortex over northeast China, westerly trough, the southwest warm and wet airflow on the edge of subtropical high over the west Pacific and the cold air from the north. The strong southwest airflow set up the water vapor channels where the water vapor can flow to Shandong province. The forward-tilting trough and increase in the temperature and humidity in the low level atmosphere caused the intensively convective instability and symmetrical instability, which provide sufficient water vapor and energy for the rainstorm. The strong northeast winds converged with strong southwest airflow on low level atmosphere, so that the vertical vorticity increased, the convergence and ascending motion augmented, which trigger the instability energy released, produced meso-scale convective cloud mass and heavy precipitation. Meso-scale low pressure formed before the ground cold front, so the convergence and ascending motion increased more and more, which resulted in MCC and rainstorm.

Key Words: water vapor transportation atmospheric instability cold air invasion MCC rainstorm

引 言

2007 年 7 月 18—19 日,受东北低涡、西风槽、切变线和副热带高压的共同影响,山东上空形成中尺度对流复合体,造成全省出现大范围对流性暴雨。由于降水强度大、范围广,给国民经济和人民生命财产造成严重损失。国内对灾害性暴雨已有诸多研究^[1-3],大范围对流性暴雨多数是由中尺度对流系统或中尺度对流复合体而产生,马禹等^[4]对中国及其邻近地区的中尺度对流系统进行了普查,给出了时空分布特征。项续康等^[5]和蒙伟光等^[6]对我国南方地区的中尺度对流系统和尺度对流复合体进行了分析研究,郑永光等^[7]对黄海及其周边地区的 M- α CS 进行了普查分析。本文应用常规观测资料、自动站加密观测资料、卫星云图和雷达及 T213 数值预报产品,对这次中尺度对流复合体产生的对流性暴雨的天气系统、水汽条件、不稳定度和动力触发机制进行了分析研究。分析

了中尺度对流复合体生成和发展期间风场的水平和垂直演变、对流云团的 TBB 变化特征和雷达回波的变化情况。

1 降水概况

2007 年 7 月 18 日 13 时至 19 日 06 时(北京时),山东省自北向南先后出现历史罕见的大范围强降水天气,并伴有雷电及短时大风。在 17 个小时内全省 123 个气象观测站中有 106 个站雨量 $\geq 30.0\text{mm}$,78 站降水量 $\geq 50.0\text{mm}$,8 站雨量 $\geq 100.0\text{mm}$,100.0 mm 以上的大暴雨主要集中在鲁西北和鲁中的西部,济南龟山气象站降水最大为 153.1 mm。在中尺度站自动雨量观测中,济南市区的降雨自 16:20 时从北部开始到 23:00 时在南部结束,18 个中尺度站的雨量在 56.7~182.4mm 之间,15 个中尺度站的雨量 $\geq 100.0\text{mm}$,市政府站的雨量最大为 182.4 mm。济南市区的强降水主要集中在 17—19 时,市政府站 2 小时降水量 162.5mm。龟山

气象站的降水集中在17—20时,3小时降水量145.0mm。18日13时至19日06时山东省降水分布见图1a,济南气象站和市政府站的每小时雨量见图1b。这次强降水范围广、强度大、时间短,属山东历史上所罕见。大范围的短时强降水使人民群众生命财产遭受到巨大损失。根据灾情统计,全省55.92万人受灾,死亡40人,失踪8人,伤197人。农作物受灾面积14572公顷。全省直接经济损失逾15亿元。

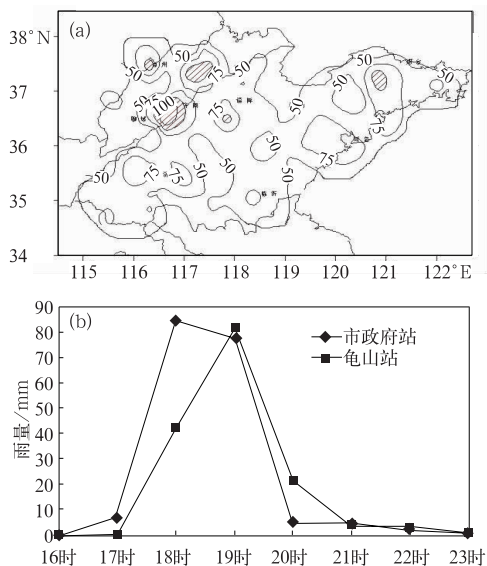


图1 (a) 2007年7月18日13时至19日06时山东省降水分布图(单位mm,等值线间隔25,阴影区为 $>100\text{mm}$ 的降水区), (b) 济南龟山气象站和市政府中尺度站的1小时雨量(单位mm)

2 环流背景

2.1 环流演变和影响系统的发展

17日08时500hPa中高纬度环流发展为两脊一槽型(图略),贝加尔湖地区为较深的冷性低涡槽区,在低层850~700hPa中高纬度的低涡槽位于我国东北上空,比500hPa低涡槽偏东10~15个经度,温度槽落后于高度槽,槽后有较强的冷平流。在 40°N 以南

的中低纬度地区,槽脊的分布与高纬度呈反位向。河套至华东沿海为较强的高压脊,低槽分别位于青藏高原东部和日本海上空,在河西走廊新生弱槽发展东移。西太平洋副热带高压在华南沿海加强西伸,副高与中纬度高压脊在华东沿海同位相叠加,使得我国东部环流经向度增大,华东沿海高压脊后的偏南气流迅速增强。从华南沿海到山东南部形成一股较强的西南风急流,风速在 $12\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。急流中的温度露点差都小于 5°C ,大气高温高湿近于饱和。温度场上850hPa在 40°N 以南为高于 20°C 的暖区。西南暖湿气流源源不断地流向山东,为暴雨的产生提供了充分的温湿条件。

18日08时,500hPa贝加尔湖地区的低涡中心向东南移到 53°N 、 125°E 。中支槽东移到河北东部,低涡南部的低槽与中支槽相衔接,在河套东部 40°N 附近形成宽广的槽区。西太平洋副热带高压进一步加强西伸北抬,在 120°E 的副高脊线位于 20°N ,588线的西伸脊点在 108°E 。由于副高增强,中纬度环流的经向度增大。低层850~700hPa的西南气流猛烈增强,850hPa在湖南和湖北境内的西南风有4站达到 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。强盛的西南气流在华东到达 40°N 以北。由于暖湿气流的输送,山东上空强烈地增温增湿,济南探空站500hPa及以下的温度露点差 $\leq 3.2^{\circ}\text{C}$,大气近于饱和。高纬度的冷空气在低层从东北回流南下,850~700hPa的东北气流与西南暖湿气流在河北和山西上空形成明显的冷式切变线,落后于高空500hPa低槽,形成前倾槽结构(图1a,b)。500hPa槽底的偏西气流叠加在低层的西南暖湿气流之上,大气不稳定增大。随着西风带系统的东移,18日14时,前倾槽系统开始影响山东。切变线后部的偏北气流与西南暖湿气流在山东北部交汇,产生强烈的辐合上升运动,形成中尺度对流云团,造成强降水。18日20时空西

风槽和低层切变线都移到山东上空,受前倾槽系统的影响山东自北向南产生大范围短时暴雨和大暴雨。

由于高空大气强烈地增温增湿,地面气压迅速降低,在华北形成宽广而深厚的低压中心。18 日 08 时西北冷锋推动地面低压向东南方向移动,20 时移到鲁西北上空。在 1 小时一次的地面加密观测资料中,18 日 15 时在济南形成中尺度低压中心(图略),中尺度低压继续加深,17 时中心气压达到 990.5hPa,低压中心在济南维持 2 个小时,18 时中心移到鲁西南。中尺度低压中心在济南期间,济南产生短时大暴雨天气。

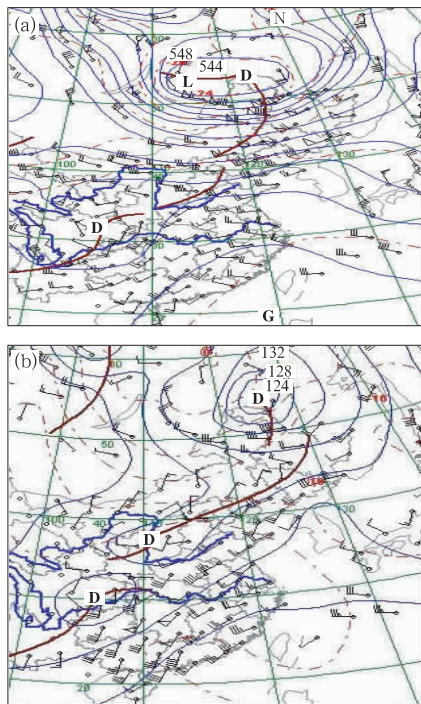


图 2 2007 年 7 月 18 日 08 时
500hPa(a)和 850hPa(b)环流形势图
实线:等高线,间隔 40gpm,虚线:等温线,
间隔 4℃,粗线:槽线

2.2 探空站资料的物理量特征

从济南、成山头 and 青岛探空资料的物理量参数(表 1)中可以看出,暴雨前 18 日 08—14 时,沙氏指数 $-0.5 \sim -5.1^{\circ}\text{C}$,

$\Delta\theta_{\text{se}(500-850)}$ 在 $-7.5 \sim -22^{\circ}\text{C}$,K 指数 $37 \sim 42^{\circ}\text{C}$ 。地面比湿 $14.7 \sim 21.3\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水汽压在 $23 \sim 33.7\text{hPa}$ 。低层大气高温、高湿、近于饱和,大气强烈对流不稳定。济南上空的对流有效位能达到 $2466.4 \sim 2325.5\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从地面到 300hPa 风向从西南风顺转为偏西风,有暖平流。850hPa 西南风达到 $12 \sim 15\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中低层大气的高温高湿和较高的对流不稳定能量为大暴雨的产生提供了充分的温湿条件。

从济南探空站上空的风廓线(图略)中可以看出,18 日 14 时 3000m 以下为西南风,18 日 20 时 3000m 以下转成了偏北风,说明低层有冷空气侵入。

3 大暴雨形成机制

3.1 充分的水汽输送和强烈的辐合

17 日 08 时至 18 日 08 时,低层的偏南风急流建立起通向华北的水汽通道,近于南北向的带状的水汽通量高值区从华南一直伸到 40°N 附近(图 3a)。18 日 08 时在鲁西南地区形成 $26\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 的水汽通量高值中心,在高值中心的北部高值舌区,形成中心值为 $-4 \times 10^{-8}\text{g} \cdot (\text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 的水汽通量辐合区(图 3b, c)。由于强烈的水汽输送,山东境内的大气湿度迅速升高,17 日 20 时,850hPa 以下比湿大于 $16\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高湿舌从西南伸向山东,18 日 08 时 850hPa 鲁西地区的比湿上升到 $18\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,925hPa 比湿大于 $20\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明大气中已有较高的水汽含量。

从过济南大暴雨区沿 117°E 的剖面图中可以看出,925~850hPa 较强的偏南风与水汽通量的高值区相对应。南北气流的汇合区产生较强的水汽辐合和上升运动。18 日 08 时水汽辐合和上升运动区位于 $38 \sim 40^{\circ}\text{N}$,随

表1 山东省3个探空站的要素演变特征

时间	济南		青岛		成山头	
	18日08时	18日14时	18日08时	18日14时	18日08时	18日14时
地面比湿/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	21.3	20.2	18.8	20.0	14.7	14.7
地面相对湿度/%	79.2	59.5	94.2	83.8	100.0	100.0
地面水汽压/hPa	33.7	31.8	29.9	31.8	23.5	23.5
对流有效能/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	2466.4	2325.5	172.8	882.1	0.0	0.0
沙氏指数/ $^{\circ}\text{C}$	-5.1	-4.7	-3.9	-3.9	-0.5	-4.5
K指数/ $^{\circ}\text{C}$	42.0	39.0	37.0	40.0	17.0	40.0
$\theta_{\text{se}(500-850)}/^{\circ}\text{C}$	-9.2	-7.5	-18.3	-8.7	-22.1	-11.8

着冷空气的南下,18日20时较强的水汽辐合和上升运动中心移到 37°N 附近(图3d),

正位于山东中部。20时前后是中尺度对流系统强烈发展和降水剧烈时期。

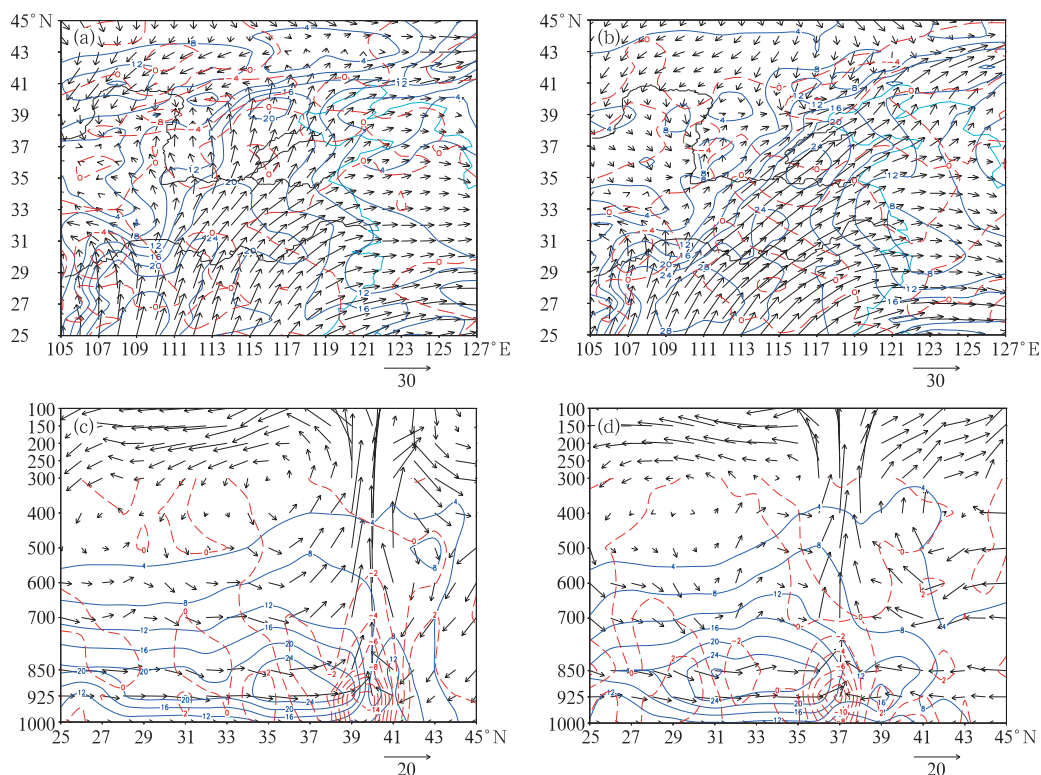


图3 水汽通量(实线,单位: $\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)和水汽通量散度(虚线,单位: $\times 10^{-8} \text{g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)

(a) 17日20时850hPa (b) 18日08时850hPa (c) 18日08时沿 117°E 剖面 (d) 18日20时沿 117°E 剖面

3.2 大气强烈的对流不稳定和对称不稳定

由于低层偏南暖湿气流的增强,山东上空低层大气迅速增温增湿,能量升高,导致中层以下大气对流不稳定增大,对称不稳定增

强。17日20时850hPa以下 $\theta_{\text{se}} \geq 82^{\circ}\text{C}$ 的高能舌从西南伸向山东东部,18日08时 $\theta_{\text{se}} \geq 84^{\circ}\text{C}$ 的西南—东北向的高能舌控制鲁西,鲁西南地区为 $\theta_{\text{se}} \geq 92^{\circ}\text{C}$ 的高能中心。在高能舌区700与850hPa的 θ_{se} 之差小于 -10°C ,

鲁西北地区达到了 -20°C (图 4a)。从沿 117°E 的 θ_{se} 和上下层 θ_{se} 之差的垂直剖面图中可以更清楚地看到 (图 4b), 在 $34\sim 40^{\circ}\text{N}$, 700hPa 以下为 θ_{se} 的高值舌区, 地面附近的高值中心达到了 94°C 。在 600hPa 附近有一低值舌从北向南伸展, 叠加在低层高值舌之上, 形成上干冷下暖湿的对流不稳定层结。 700hPa 与 850hPa 之间的 θ_{se} 之差在 38°N (济

南北部) 达到 -20°C 。中低层大气强烈的对流不稳定。18 日 20 时, 850hPa 上 θ_{se} 的低值舌南伸, 冷空气在山东西北部与高温高湿的西南暖湿气流交汇 (图 4c)。在垂直剖面图中, 较强的 θ_{se} 的低值舌在 700hPa 附近南伸 (图 4d), 说明冷空气主体从中层南下。19 日 08 时 θ_{se} 较强的东北—西南向的锋区已位于山东上空 (图略), 山东暴雨天气结束。

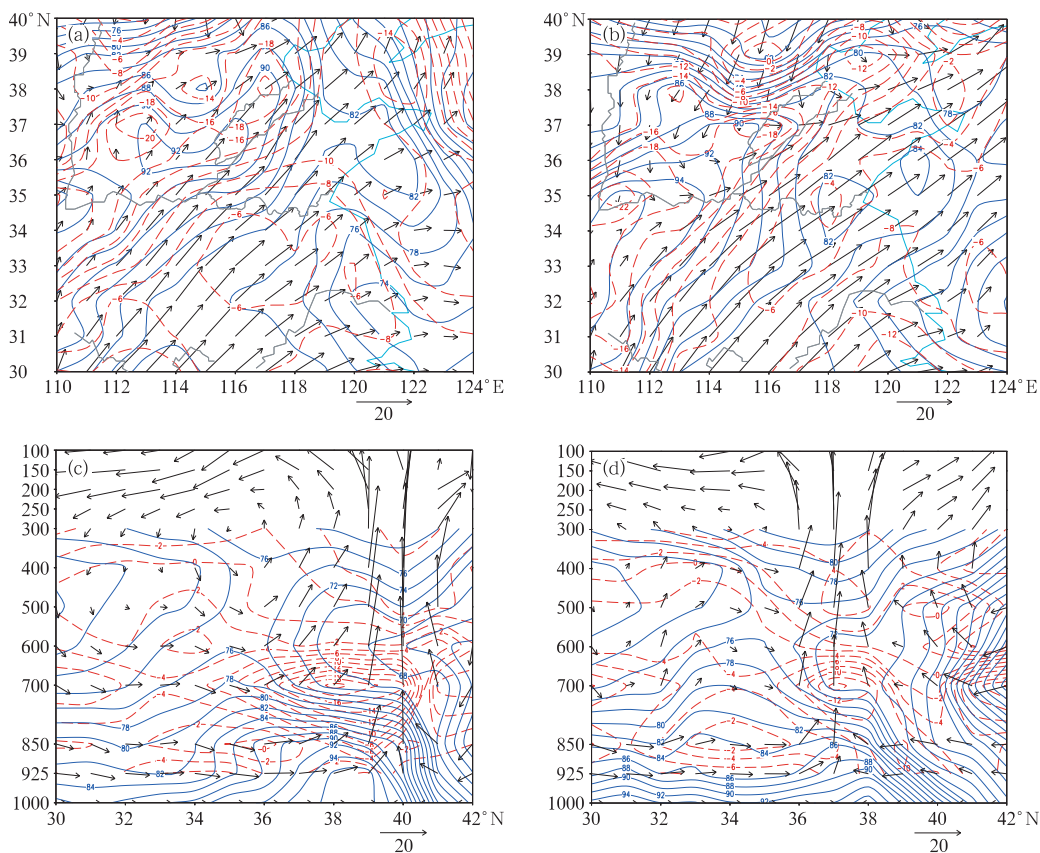


图 4 θ_{se} (实线)、上下层 θ_{se} 之差 (虚线) 和风场 (箭头) 的分布

(a) 18 日 08 时 $850\text{hPa}\theta_{\text{se}}$ 和 $\Delta\theta_{\text{se}}(700-850)$ (b) 18 日 20 时 $850\text{hPa}\theta_{\text{se}}$ 和 $\Delta\theta_{\text{se}}(700-850)$

(c) 18 日 08 时沿 117°E 剖面 (d) 18 日 20 时沿 117°E 剖面

湿位涡 MPV 的分布^[8]可反映大气的湿对称不稳定性, 分析可见, 暴雨前和暴雨期间, 在山东上空 500hPa 以下 $MPV < 0$, 大气湿对称不稳定。18 日 08 时山东西部在 $850\sim 700\text{hPa}$ 为 $MPV \leq -1.0\text{PVU}$ 的负值中

心, 500hPa 以上为 $MPV > 0$ 的正值区 (图 5), 18 日 20 时低层湿对称不稳定中心与高层湿对称稳定中心相叠置的区域正位于低层偏南风与偏北风相汇合的辐合上升运动区 ($37\sim 39^{\circ}\text{N}$)。说明中高层湿对称稳定的大

气与低层对称不稳定的大气相叠加,有利于对流发展。上升运动触发对流不稳定能量释

放,产生强对流,降水增幅。

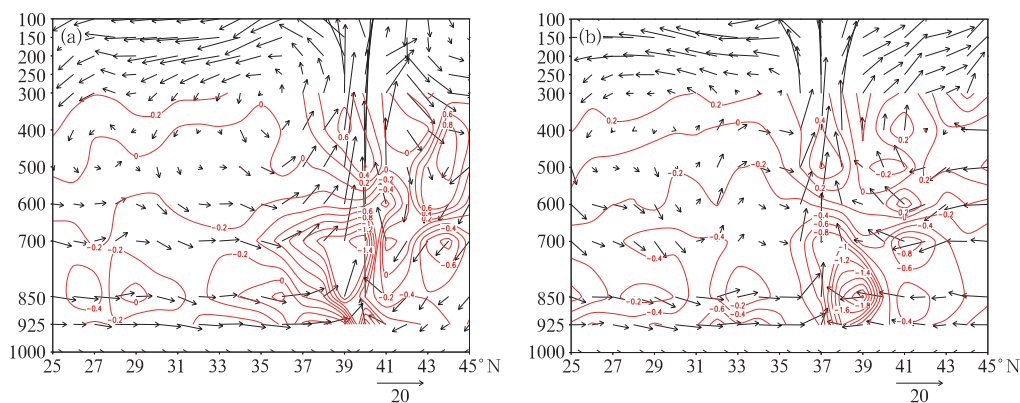


图5 2007年7月18日08时(a)和20时(b)沿117°E湿位涡MPV的垂直剖面 and (v, ω)

3.3 冷空气南下触发对流不稳定能量释放

17日20时强盛的偏南暖湿气流在我国东部到达42°N以北,山东为较强的西南暖湿气流控制,高温高湿,天气闷热。17日20时以后,高纬度的冷空气在东北低涡槽后从东北回流南下。18日08时,低层850hPa东北气流携带的冷空气与西南暖湿气流在北京附近汇合(图6a),在汇合区正涡度和辐合上升运动发展强烈发展。东北气流在河北境内向西南方向伸展,其东部与西南暖湿气流在山东的西北部产生侧向汇合。18日14时(图6b),在河北省南部东北气流的前端,低层产生较强的辐合和上升运动中心。在东北气流和西南气流的侧向汇合区,气旋性环流发展,垂直涡度增大,上升运动增强。在冷暖空气的汇合区,14时前后在鲁西北和河北的南部分别有对流云团发展,范围扩大,17时在济南北部合并加强。随着冷空气主体的东移南下,18日20时东北气流与西南暖湿气流的汇合区位于在山东西部,在汇合区正涡度和辐合上升运动强烈发展(图6c,d),850hPa在济南上空产生 $-6 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$

的上升运动中心,在300hPa附近上升运动达到 $-14 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在低层南北两股气流的汇合,形成两个较强的经向垂直环流(图5,6d,f)。在垂直环流的上升运动区,高层较强的辐散、负涡度与低层的辐合、正涡度相配合,上升运动持续稳定地发展。低层的暖湿气流在冷暖空气的交汇区辐合上升,对流不稳定能量释放,中尺度对流云团强烈发展,形成中尺度对流系统,迅速发展成中尺度对流复合体(MCC),产生短时强降水。随着冷空气的南下,对流复合体(MCC)缓慢南移。19日02时冷空气到达鲁中,低层在鲁西南地区生成较强的正涡度和辐合上升运动中心(图6e)。随着对流不稳定能量的释放,上升运动逐渐减小,对流复合体在南移过程中逐渐减弱,强降水逐渐结束。

4 中尺度分析

4.1 中尺度对流复合体MCC的卫星云图演变特征

从FY2C和FY2D的红外卫星云图中可以看出,18日14:00时,在渤海上空对流云

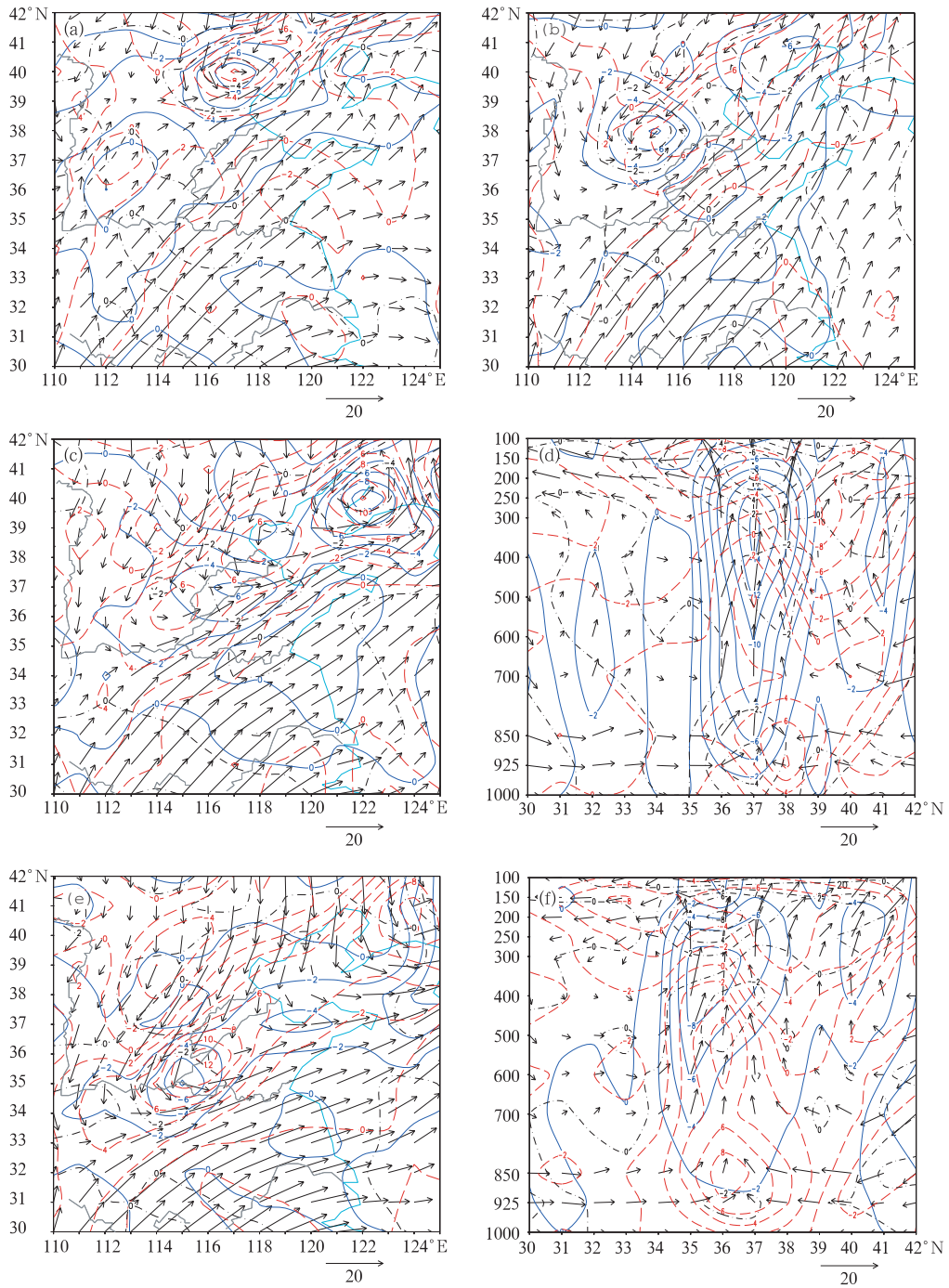


图 6 垂直速度(实线,单位: $\times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)涡度(虚线,单位: $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$)

散度(点划线,单位: $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$)和风矢量(箭头, u, v)和($v, -2\omega$)

(a) 18 日 08 时 850hPa (b) 18 日 14 时 850hPa (c) 18 日 20 时 850hPa (d) 18 日 20 时沿 117°E 剖面

(e) 19 日 02 时 850hPa (f) 19 日 02 时沿 117°E 剖面

带的南端,鲁西北地区新生对流云团,强烈发展,云顶亮温达到 $-70\sim-79^{\circ}\text{C}$ 。与此同时,在陕西上空6个中- γ 尺度的小对流云团发展东移合并,形成南北向的对流云带,15时到达河北和河南境内,在河北的南部发展成较强的对流云团,北部和南部的两个对流云团同时发展,范围扩大(图略);15:31时在鲁西北上空相衔接,在衔接处对流云团迅速发展。在此期间,山东半岛北部新生对流云团。16:00时3个强对流云团组成近于东西向的对流云带(图略),位于山东半岛、鲁北和河北南部上空。在对流云带中,3个强对流云团的云顶亮温达到 $-80\sim-87^{\circ}\text{C}$ 。对流云带缓慢南压。17:00时对流云带到达济南上空时,强烈发展,在济南上空形成强对流云团中心,18:00时在山东境内发展成椭圆型的MCC,云顶亮温 $TBB\leq-70^{\circ}\text{C}$,在济南上空的冷云中心 TBB 达到 -93°C (图略)。 $TBB\leq-90^{\circ}\text{C}$ 的冷云中心在济南上空维持2小时。20:00时冷云中心 TBB 升高到 -89°C 以上,移到济南东南部的鲁中地区。21:00时 $TBB\leq-80^{\circ}\text{C}$ 的冷云区覆盖鲁中、半岛和鲁南地区。22:00时 $TBB\leq-80^{\circ}\text{C}$ 的冷云区逐渐演变成东西带状,范围减小,移到鲁南上空,但是 $TBB\leq-56^{\circ}\text{C}$ 的冷云区仍然为椭圆型,覆盖整个山东(图略)。23:00时云团开始减弱(图略),范围开始减小,演变成东西向的长条形,覆盖半岛、鲁中和鲁南地区。19日00:31时中心分裂成3个单体,由MCC减弱成中尺度对流系统(MCS)。19日02:00时以后 $TBB\leq-80^{\circ}\text{C}$ 的冷云中心逐渐移出山东。在对流云团影响期间,18日14时至19日02时,在 $TBB\leq-70^{\circ}\text{C}$ 的冷云区产生每小时 $60.0\sim151.0\text{mm}$ 的强降水。在17—19时济南上空 $TBB\leq-90^{\circ}\text{C}$ 的冷云中心产生2小时 162.5mm 的强降水。在对流云团的初生阶段,其边缘 TBB 的梯度非常大, -32°C 和 -56°C 的等温线几乎重合,说明

对流云团的边缘整齐,云塔高耸。

4.2 雷达回波的发展和演变

从济南齐河多普勒雷达站的综合回波(CR)产品的演变中可以看出,18日11:00时开始,在山东的北部生成絮状回波,原地发展少动。最大回波强度在 $50\sim60\text{dBz}$ 。13:04时(图7a,见彩页)在鲁西北发展成由多个小对流单体组成的东西向的带状回波;与此同时,在河北邢台的北部有回波发展东移。北部东西向的回波带向东西方向伸展,缓慢南移;西部回波向东伸展。14:30时左右,在河北衡水附近有长条形的对流回波发展,把两个主回波带相连接(图7b,见彩页)。15:32时两个主回波带在衡水附近相连接(图7c,见彩页),回波强度 $\geq45\text{dBz}$ 的对流单体形成一条狭长的东西向的对流回波带,最大回波强度在 $56\sim61\text{dBz}$ 。带状回波继续发展,缓慢南移。15:00~16:00时在回波带上商河气象站产生1小时 104.2mm 的强降水。16:00时前后,在回波带的前部济南附近新生一些小对流单体,迅速发展,16:30时左右发展成回波强度在 45dBz 以上的片状回波(图7d,见彩页),济南附近的降水开始增大,产生1小时 30mm 以上的强降水。17:00时 45dBz 以上的强回波带移到济南上空时(图7e,见彩页),迅速发展,范围变宽,强回波的范围增大,最大回波强度在 $54\sim58\text{dBz}$,17:20—18:30时济南市区市政府中尺度自动观测站雨量达 151.0mm ,10分钟雨量在 $11.4\sim31.3\text{mm}$ 。19:00时以后,强回波移到济南南部(图7f,见彩页),影响鲁中和鲁南地区。带状回波长度约 600km ,宽度约 60km 。回波顶高一般在 $9\sim11\text{km}$,最高回波顶高度在 $16\sim22\text{km}$ 。最大强度在 $56\sim61\text{dBz}$ 。带状回波前不断有新单体生成合并到主体回波中。强回波引起的天气以强降水为主,伴有雷电,局部地区出现雷雨大风。强回波影响济南时,

整体移动速度约 $30\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

从仰角为 0.5° 分辨率为 0.5km , 探测距离为 110km 的基本速度(V26)产品(图 8, 见彩页)中可以看到, 18 日 14:00 时以前, 探测范围内全为西南风。14:19 时开始偏北气流从德州北部进入山东(图 8a, 见彩页), 逐渐南移。15:01 时在鲁西北形成明显的东西向的西南风与偏北风的汇合线(图 8b, 见彩页)。在仰角为 2.4° 的基本速度图中, 西北气流、东北气流和西南气流首先在鲁西北地区汇合, 在汇合区产生带状强回波。16:33 时西南气流、东北气流和西北气流三股气流的汇合区移到济南上空(图 8c, 见彩页)。在汇合区对流增强, 新生中小尺度的对流单体。17:34 时在济南附近生成近于东西向的带状辐合区, 与强回波带相对应。随着偏北气流的南推, 其前锋附近不断新生小对流单体, 带回波中不断有对流单体的新老更替。

从风廓线图(VWP48)(图略)中可以看出, 暴雨期间冷空气从低层侵入。18 日 11:02 时, 低层的西南气流向上扩展到 3.0km 以上, 15:38 时达到 9.1km , 说明暖湿气流深厚。17:10 时开始, 0.6km 以下的低层转为西北风。17:34 时 0.6km 以下为东北风, $0.6 \sim 2.4\text{km}$ 的中层为西北风。19:00 时以后, 低层偏北风增大, 19:31 时以后 7.9km 以下全为偏北风控制。济南附近的强降水结束。

5 小结

(1) 这次对流性大暴雨天气是由东北冷性低涡、前倾槽、副热带高压边缘西南暖湿气流和冷空气的共同影响产生的。在地面冷锋前生成中尺度低压, 加强了辐合上升运动。暴雨产生在冷锋前部的中尺度低压区中, 济南短时大暴雨产生在地面中尺度低压中心附近。

(2) 低层强盛的偏南气流建立起向华北的水汽通道, 把暖湿气流源源不断地向暴雨

区输送。低层增温增湿使得大气强烈的对流不稳定和对称不稳定, 大气中的对流不稳定能量急剧升高, 低层水汽含量猛烈增大。

(3) 低层较强的冷空气从东北回流南下, 与西南暖湿气流在山东西部侧向汇合, 正涡度增大, 辐合上升运动增强, 触发对流不稳定能量释放, 产生强对流。高层较强的辐散与低层冷暖空气的辐合相配合, 形成经向垂直环流, 上升运动持续发展, 对流增强, 降水增大。

(4) 在两个中尺度对流云团的合并区, 对流强烈而迅速发展, 形成中尺度对流复合体(MCC), 产生对流性暴雨和大暴雨。济南位于中尺度对流辐合体的冷云中心, 出现短时大暴雨。

(5) 在雷达回波中表现为两个东西向的带状强降水回波相衔接, 在衔接处对流增强, 降水加剧。在速度图和风廓线中表现为东北气流、西北气流和西南气流的汇合。在冷暖空气的汇合区, 不断新生对流单体。

参考文献

- [1] 边清河, 丁治英, 董金虎. “96·18”华北暴雨数值模拟与稳定性分析[J]. 气象, 2006, 32(8): 17-22.
- [2] 江吉喜. 华北两类灾害性云团的对比研究[J]. 应用气象学报, 1999, 10(2): 199-206.
- [3] 周雨华, 刘志雄, 谭一洲. 湖南新邵太芝庙乡特大致洪暴雨分析[J]. 气象, 2006, 32(11): 81-88.
- [4] 马禹, 王旭, 陶祖钰, 等. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征[J]. 自然科学进展, 1997, 7: 701-706.
- [5] 项续康, 江吉喜. 我国南方地区的中尺度对流复合体[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1): 9-17.
- [6] 蒙伟光, 王安宇, 李江南, 等. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析[J]. 大气科学, 2004, 28(3): 330-341.
- [7] 郑永光, 朱佩君, 陈敏, 等. 1993~1996 黄海及其周边地区 $M_{\alpha}CS$ 的普查分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(1): 66-72.
- [8] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 66-72.

杨晓霞等：2007年7月18-19日山东省大暴雨天气分析

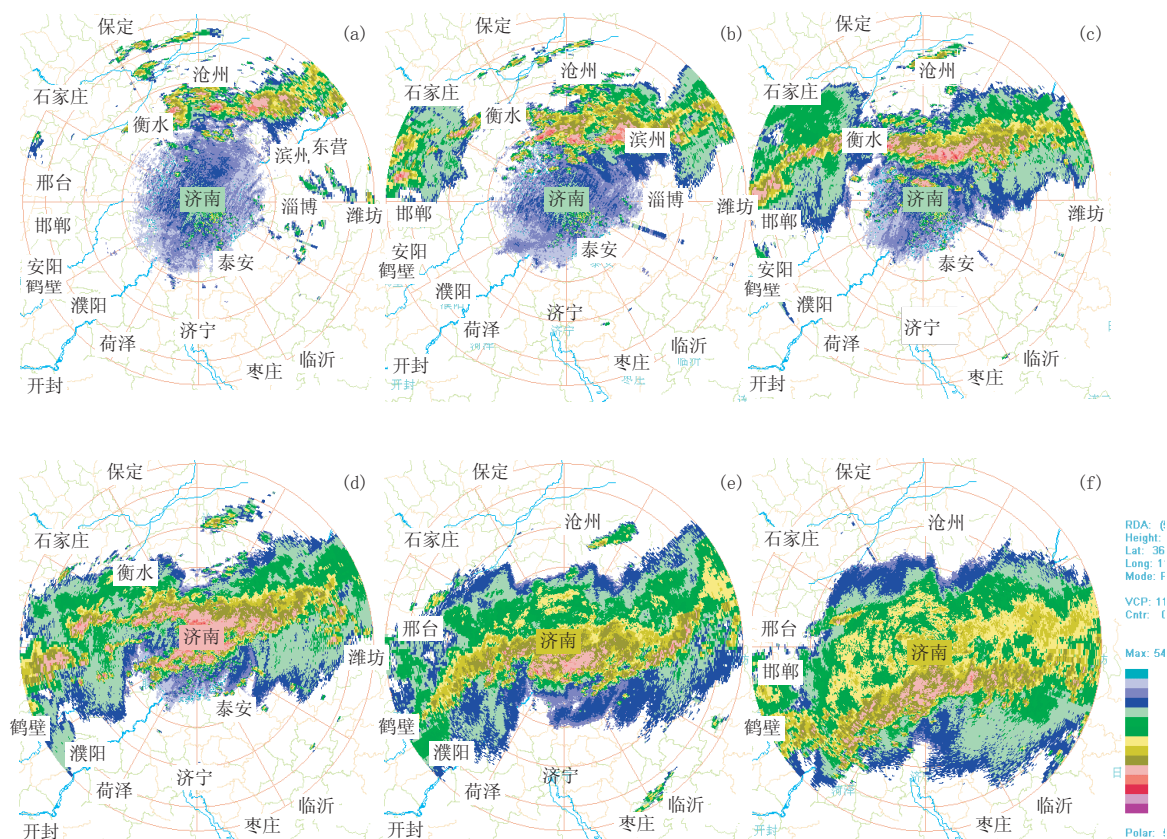


图7 2007年7月18日济南齐河雷达站综合回波(CR37)的演变图
(a) 13:04时 (b) 14:31时 (c) 15:32时 (d) 16:33时 (e) 17:53时 (f) 19:30时

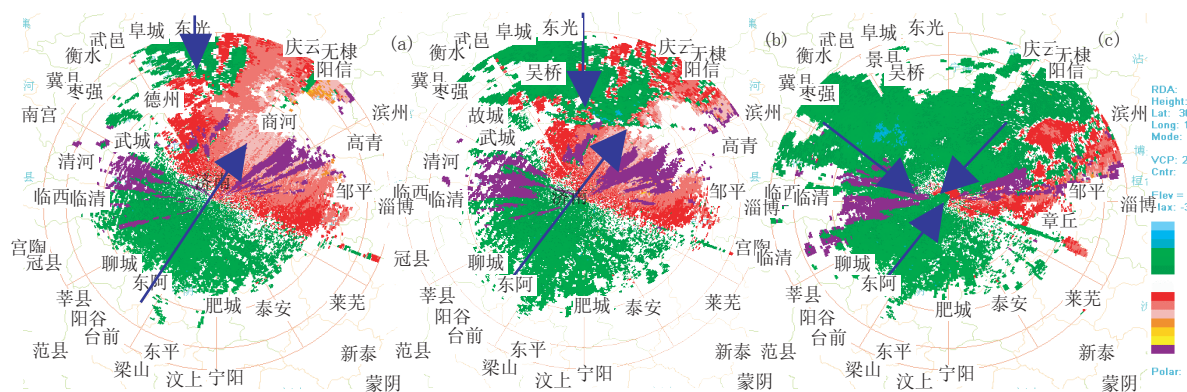


图8 济南齐河雷达站仰角为0.5°的基本速度图(V26)
(a) 18日14:25时 (b) 18日15:01时 (c) 18日16:33时