

杨晓霞.副热带高压边缘连续两次强降水形成机制分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):62-72.

Yang Xiaoxia. Analysis of the mechanism of two successive heavy rainfalls on the edge of subtropical high belt[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(3): 62-72. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.008. (in Chinese)

副热带高压边缘连续两次强降水形成机制分析

杨晓霞

(山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要: 利用常规观测资料、自动气象站加密观测资料、GPS/MET水汽监测资料、FY-2E卫星云图和NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,对副热带高压边缘山东南部连续两次强降水的形成机制进行分析。结果表明,两次强降水都是由副热带高压边缘500 hPa弱西风槽过境影响产生的,副热带高压主体加强西移,850~700 hPa有较强的西南急流。强降水产生在西南低空急流的前方、暖式切变线附近;西南低空急流加强北上强降水开始,急流减弱强降水结束。强降水区与CAPE的高值区、低层水汽通量高值舌、水汽辐合中心、暖平流中心有较好的对应关系。西南低空急流、GPS/MET水汽监测对强降水的短时预报有一定的指示性。对流云团TBB最低为 $-78 \sim -62^\circ\text{C}$,各观测站对应最大小时雨量为40~90 mm。强降水期间,850 hPa及以下有中尺度涡旋发展,涡旋尺度小,气压场上表现很弱,流场上表现明显,有明显的气旋性环流中心,在925 hPa涡旋中心东南部的暖平流中心降水强度最大。第一次强降水的中尺度涡旋源地发展,稳定少动,在其东南部上升运动强且降水强度大;第二次强降水中,冷空气在低层从西北部侵入,形成气旋,向东北移动,强降水产生在冷锋前部的暖区中,对流不稳定能量高,降水强度大、范围大。

关键词: 连续两次强降水; 副热带高压边缘; 西风槽; 暖式切变线; 中尺度涡旋

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)03-0062-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.008

Analysis of the mechanism of two successive heavy rainfalls on the edge of subtropical high belt

YANG Xiaoxia

(Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract By using sounding and ground in situ observation data, GPS/MET and FY-2E satellite data, NCEP/NCAR reanalysis data ($1^\circ \times 1^\circ$), two severe rainfall events, which occurred on the edge of subtropical high belt in south Shandong, are analyzed. The results show that two heavy rainfall processes were both caused by weak westerly trough on the edge of the subtropical high at 500 hPa, as the subtropical high belt strengthened and moved westward inducing southwesterly jets between 850-700 hPa. Both heavy rainfalls occurred in the front of the southwesterly low level jets, and near the warm shear lines. As the low level southwesterly jets intensified and invaded northward, heavy rainfalls began, and while the jets weakened, the rainfalls eased. The torrential rain region has good consistency with the high value regions of CAPE, water vapor flux, convergence of water vapor and low level warm advection. The

收稿日期: 2017-06-25; 修订日期: 2017-08-05

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2013-040); 山东省气象局科研项目(2013sdqx01, 2014sdqxm20); 中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160208); 山东省气象科学研究所数值天气预报应用技术开放研究基金项目(SDQXKF2014Z05)

作者简介: 杨晓霞(1962—), 女, 研究员级高级工程师, 主要从事天气预报和强对流、暴雨(雪)、大风等灾害性天气研究, yxxjn@163.com。

southwesterly low level jet and atmospheric precipitable water retrieved from GPS/MET are indicative for short-time heavy rainfall forecast. The minimum TBB of convective cloud clusters were -78°C – -62°C , corresponding hourly maximum rainfalls 40–90 mm. During the heavy rainfall process, a mesoscale vortex occurred below 850 hPa with weak low pressure but significant cyclonic circulation. The most intense rainfall was generated at the center of warm advection in the southeast of the vortex at 925 hPa. During the first heavy rainfall process, the mesoscale vortex moved less, while stronger rainfall was induced by stronger upward movement in the southeast of the vortex. During the second strong rainfall process, the low level cold air invaded from northwest into the vortex resulted in a cyclone, which moved northeastward. Large precipitation was produced in the warm zone in front of the cold front.

Key words two successive heavy rainfall events; edge of subtropical high; westerly trough; warm shear line; mesoscale eddy

引言

夏季山东受副热带高压和西风带系统的共同影响,经常出现强降水,造成洪涝灾害,小时雨量在 50 mm 以上的强降水屡见不鲜,100 mm 以上的强降水也时有发生。强降水过程具有时间短、雨强大、局地性强等特点,数值模式对降水强度预报明显偏小,对降水时间和落区预报也有偏差。目前对流性强降水仍然是预报中的难题,对其形成机制的认识还有待深入。苏爱芳等^[1]利用卫星云图资料对黄淮西部地区深对流云的时空分布特征及其天气意义进行研究表明,淮河流域是深对流活动的高发区,地势较低地区的深对流活动较多地与雷暴和短时强降水有关。吴芳芳等^[2]对苏北地区超级单体风暴的环境条件与雷达回波特征进行研究表明,强降水超级单体通常产生在对流有效位能较高和垂直风切变中等的环境下。曲晓波等^[3]对淮河中下游 3 次飑线对比分析表明,在较强不稳定能量积累的条件下,低层辐合抬升、高层干冷空气侵入和较强的风垂直切变是对流发展成有组织的飑线系统的动力机制。对北京“7·21”特大暴雨研究^[4–10]表明,在大尺度环流十分有利的背景下,锋前暖区的中尺度对流系统(MCS)和冷锋是造成强降水的直接影响系统,充沛的水汽输送和水汽辐合是在短时间内产生强降水的必要条件。对山东对流性强降水的分析研究^[11–16]表明,在对流不稳定的暖湿大气中,低层暖式切变线、暖湿平流、地面辐合线、冷锋等触发对流不稳定能量释放,产生强对流,造成强降水,中高层和低层干冷空气的侵入与强对流密

切相关。远距离热带气旋在山东造成的暴雨^[17–18]主要是在副热带高压西部边缘建立起水汽通道,在 500 hPa 西风槽和低层中尺度低值系统的影响下产生强降水,造成暴雨或大暴雨。台风登陆北上和沿海北上影响山东产生的强降水^[19–20]主要出现在台风中心北部的倒槽区。对副热带高压与低涡和西风槽相互作用产生的暴雨分析研究^[21–22]表明,锋区、冷锋、低层切变线辐合抬升和干冷空气侵入是造成暴雨的触发机制。副热带高压边缘的强降水形成机制较复杂,预报难度大,有待于进一步研究。本文利用多种观测资料对 2012 年 7 月 7—8 日和 9—10 日副热带高压边缘连续两次强降水过程的影响系统、温湿特征和动力机制进行分析研究,以加深对这类强降水的认识。

1 降水实况

2012 年 7 月 7 日 12 时—8 日 14 时,山东南部地区出现强降水,鲁东南降水量最大,兰陵站雨量最大,为 269.8 mm(图 1a)。9 日 12 时—10 日 08 时,该地区又出现强降水,强降水中心依然在鲁东南,临沂降水量最大达 210.2 mm(图 1b)。两次过程的累积降水量以临沂最大,全市平均雨量 252 mm,其次是莱芜至新泰一带。全省中尺度观测站累积雨量有 23 站雨量 ≥ 300 mm,2 站雨量 ≥ 400 mm,其中临沂的罗西站最大,为 477.1 mm,临沂站 427.8 mm。两次强降水过程的降水强度都很大,各观测站最大小时雨量分别为 50~90.1 mm 和 40~88.3 mm(图 1c),1 个测站强降水维持 3~6 h。第二次强降水的范围大,强度强,持续时间短。

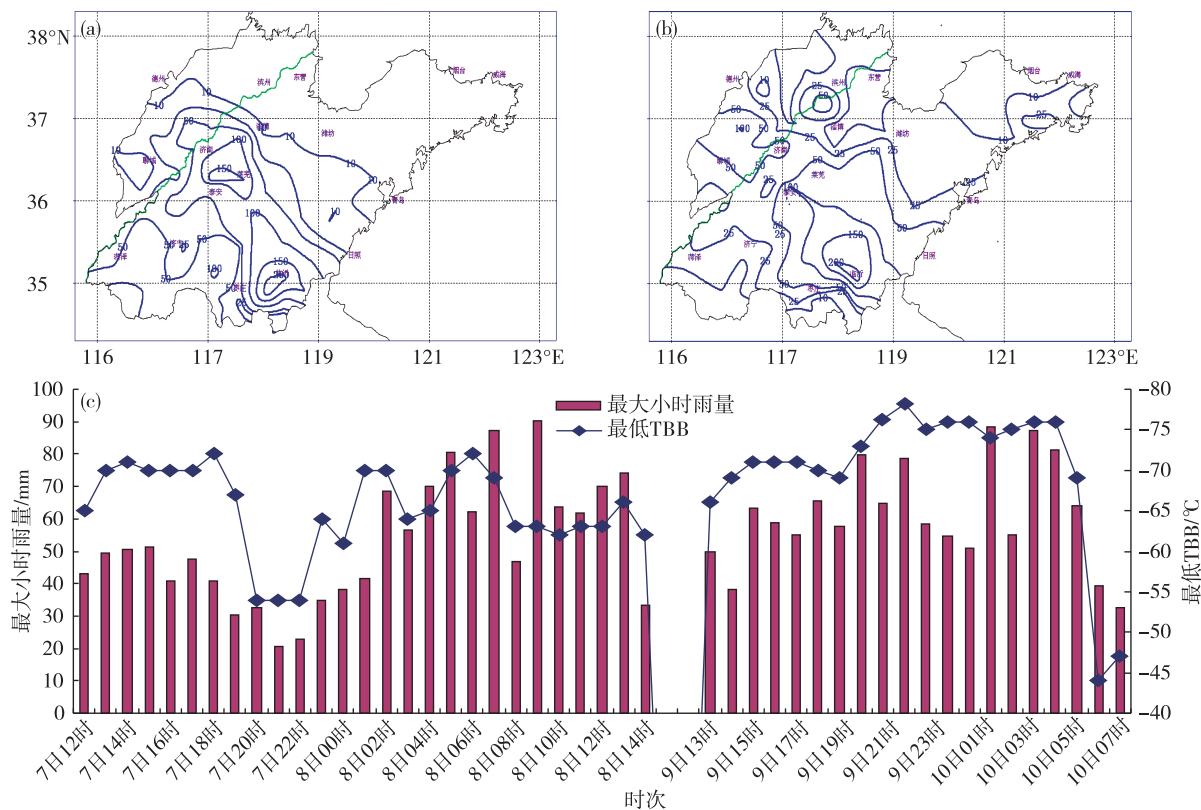


图1 2012年7月7日12时—8日14时(a)、7月9日14时—10日08时(b)雨量分布(等值线:10,25,50,100,150,200,250,单位:mm)及7日12时—8日14时和9日13时—10日08时山东全省选出的最大小时雨量和最低TBB(c)

Fig.1 Distribution of precipitations (unit: mm) during 12:00 BST 7–14:00 BST 8 July 2012 (a), and 14:00 BST 9–08:00 BST 10 July 2012 (b). Hourly maximum precipitation and minimum TBB during 12:00 BST 7–14:00 BST 8 and 13:00 BST 9–08:00 BST 10 July 2012 (c)

2 产生强降水的中尺度对流系统

在FY-2E红外卫星云图中,两次强降水都是由中尺度对流系统影响产生的,其中有多多个中尺度对流云团的发展和合并,并有新老云团的更替。对流云团首先在豫北和鲁西南产生,向东缓慢移动,在移动中发展加强,并向北发展,在鲁东南达到最强。第一次强降水由两个中尺度对流系统影响而产生。对流云团的最低TBB在 $-78 \sim -62^{\circ}\text{C}$,各观测站对应最大小时雨量为50~90 mm的强降水(图1c)。第二次过程中对流云团的最低TBB明显比第一次过程中的偏低。第一次强降水的对流云团前期强,后期弱,中尺度对流系统的主体和强中心偏南,造成的降水强度是前期小、后期大。7日下午的对流云团虽然强度较强,但是产生的雨强不大。第二次强降水的对流云团前期弱后期强,中尺度对流系统的主体和强中心偏北,后期强中心影响鲁东南,强中心的强度强、范围大,维持时间长。

3 环流特征和影响系统

两次强降水都是由500 hPa副热带高压边缘连续两个弱西风槽过境产生的,850~700 hPa有较强的西南低空急流,在急流的前部有横向的暖式切变线,强降水产生在西南低空急流的左前方、暖切变线附近,都有中尺度涡旋发展。第一次强降水产生在低层850 hPa暖式切变线附近。第二次强降水产生在850 hPa中尺度涡旋的东部,高层冷空气较强,低层中尺度涡旋发展,地面生成气旋,强降水在气旋中心的东南部。

7月7日08时,500 hPa副热带高压脊线位于 25°N 附近,西伸脊点在 117°E ,高压中心位于台湾海峡。虽然588 dagpm等高线所围的中心偏南,但是584 dagpm所围的面积大,从华南至淮河流域都受庞大的副热带高压控制。华北大陆高压脊与副热带高压相叠加,脊线位于 117°E ,脊后在河套地区有弱低槽东移,槽前西南气流与副热带高压边缘的西南气流相叠加,其前沿影响鲁西南。700~850

hPa 鲁南地区为暖式切变线影响,切变线南部的偏南风气流较强,850 hPa 风速为 $12 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到低空急流的强度。地面上,华东沿海一股东南风气流到达鲁南,在鲁南地区产生气旋性辐合,有利于辐合上升。7日20时,500 hPa 河套地区的低槽东移到河北东部,超前于700 hPa 低槽,形成前倾槽,850 hPa 西南急流的前部到达鲁西南,并在此形成弱的暖式切变线(图2a),地面上为东高西低的气压场,鲁西南为从西向东伸的倒槽影响,有弱的风场辐合(图2e)。7日夜间500 hPa 低槽移过山东,8日08时山东高空500 hPa 转为西北气流控制(图2b),而低层环流较稳定,850~700 hPa 在鲁西南形成中尺度气旋性环流,地面上在山东西南部生成狭长的低压倒槽(图2f),东南气流与偏北气流在倒槽区辐合。在500 hPa 低槽逼近和过境期间,低层850~700 hPa 西南急流的前部、暖式切变线附近产生第一次强降水。

8日20时低层850~700 hPa 的暖式切变线减弱,位于 35°N 附近,切变线南部的西南急流减弱南退,8日夜间强降水区偏南,位于江苏和安徽境内,山东无降水。

9日08时开始,500 hPa 副热带高压主体加强

西移,588 dagpm 线控制华南至江南,山东南部位于副热带高压北部边缘,在584 dagpm 线附近。此时在河西走廊又有西风槽东移,同时在长江上游有南支槽发展,与北支槽同位相叠加。随着西风槽的发展东移,槽前西南气流加强,850~700 hPa 副热带高压西部边缘的西南气流再次加强,在贵州至河南形成一股较强的西南急流,其前部直达鲁南,在这股西南急流的左前方,河南北部至山西南部形成中尺度涡旋中心。随着500 hPa 西风槽的东移,槽前正涡度平流诱发低层中尺度涡旋发展。伴随西风槽的逼近和低层中尺度涡旋的发展,9日下午山东南部的第二次强降水开始。9日20时,500 hPa 低槽东移到河套东部(图2c),槽前低层700~850 hPa 中尺度涡旋发展东移,850 hPa 中尺度涡旋中心偏东,位于河北东南部。地面上在鲁西南形成低压倒槽(图2g),风场上形成气旋性环流中心。9日夜间,500 hPa 西风槽加深东移影响山东,10日08时移到山东半岛上空(图2d),槽后西北气流引导冷空气南下,850 hPa 中尺度环流中心东移到鲁中北部潍坊附近。由于高空槽前的暖平流减压和槽前正涡度平流的动力减压作用,地面气压迅速降低,弱冷空气从西北部进入低压环流中心,10日02时形成气

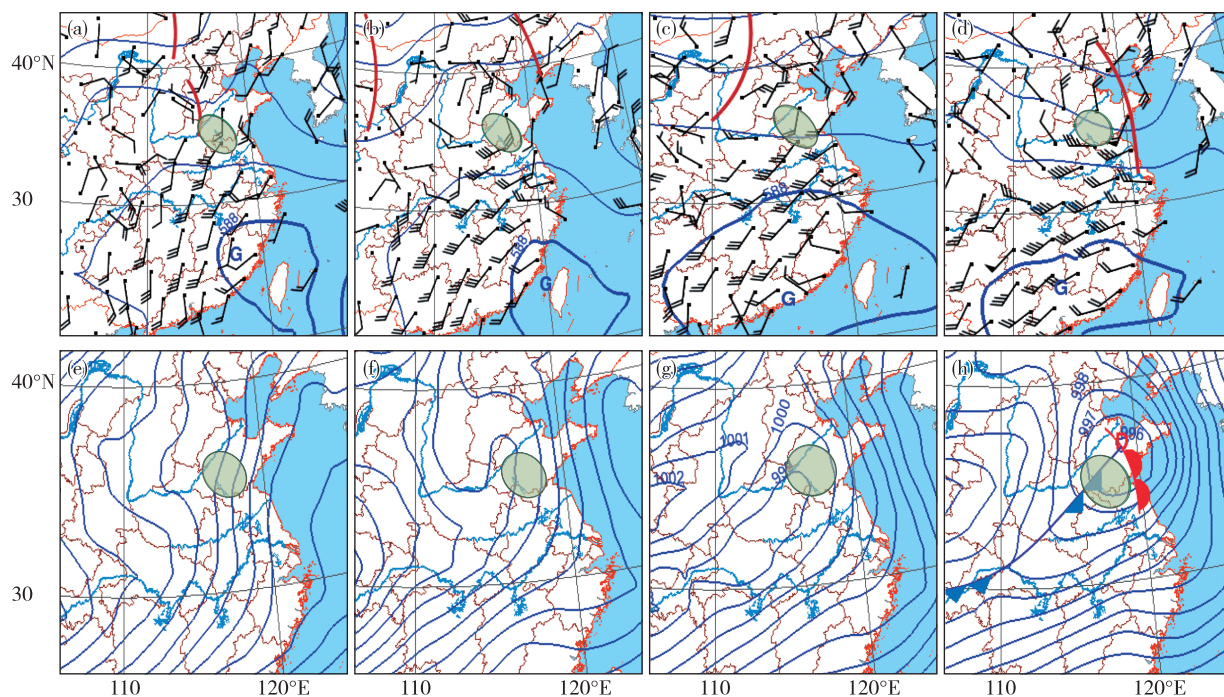


图2 500 hPa 高度场(加粗线为588 dagpm 等值线)、850 hPa 风场(a、b、c、d)和地面等压线、冷锋、暖锋(e、f、g、h,等值线间隔1 hPa,填色区为强降水区)(a、e.7日20时,b、f.8日08时,c、g.9日20时,d、h.10日08时)

Fig.2 500 hPa (the bold blue line indicates 588 dagpm) and 850 hPa winds (a, b, c, d), and sea level pressure (interval: 1 hPa), cold front and warm front (e, f, g, h; the color-filled area indicates the rainfall area); (a, e. 20:00 BST 7; b, f. 08:00 BST 8; c, g. 20:00 BST 9; d, h. 08:00 BST 10)

旋波位于鲁中,10日08时气旋中心移到鲁中北部潍坊附近(图2h)。在气旋的东南部、冷锋前部的暖区,山东南部产生第二次强降水。

4 温湿特征

4.1 热力特征

两次强降水期间,对流有效位能(CAPE)的值较高,第一次强降水前期7日14时,CAPE的高值舌控制鲁西南地区,7日20时CAPE增强至 $800 \sim 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3a),抬升指数(LI)为负值, $-5 \sim -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低值舌(图略)与CAPE的高值舌重合。7日20时以后,随着强降水的产生,对流不稳定能量释放,CAPE值明显减小,8日08时CAPE值 $200 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高值舌(图3b)和抬升指数的负值舌控制鲁西南地区,此时鲁东南的强降水产生在

CAPE高值舌和LI负值舌的东部较强的梯度区。

在第二次强降水开始前9日08时,鲁西南和鲁中南部的CAPE值明显增大,9日14时在鲁南形成高值区,中心位于鲁东南,中心值达到 $2400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3c),LI的负值也达到 $-6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,大气具有很高的对流不稳定能量。9日12时开始,在鲁南CAPE的高值区产生强降水,随着降水的产生,对流不稳定能量减弱,9日20时鲁西南的CAPE减弱到 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,鲁东南的中心值减弱到 $1800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3d),9日20时以后随着强降水的产生CAPE迅速减弱,10日02—08时鲁东南的中心值减弱到 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。强降水区与CAPE的高值区和LI的负值区有较好的对应关系,且在强降水前期CAPE较高,后期CAPE迅速降低。由此可见,第二次强降水期间的对流不稳定能量远高于第一次。

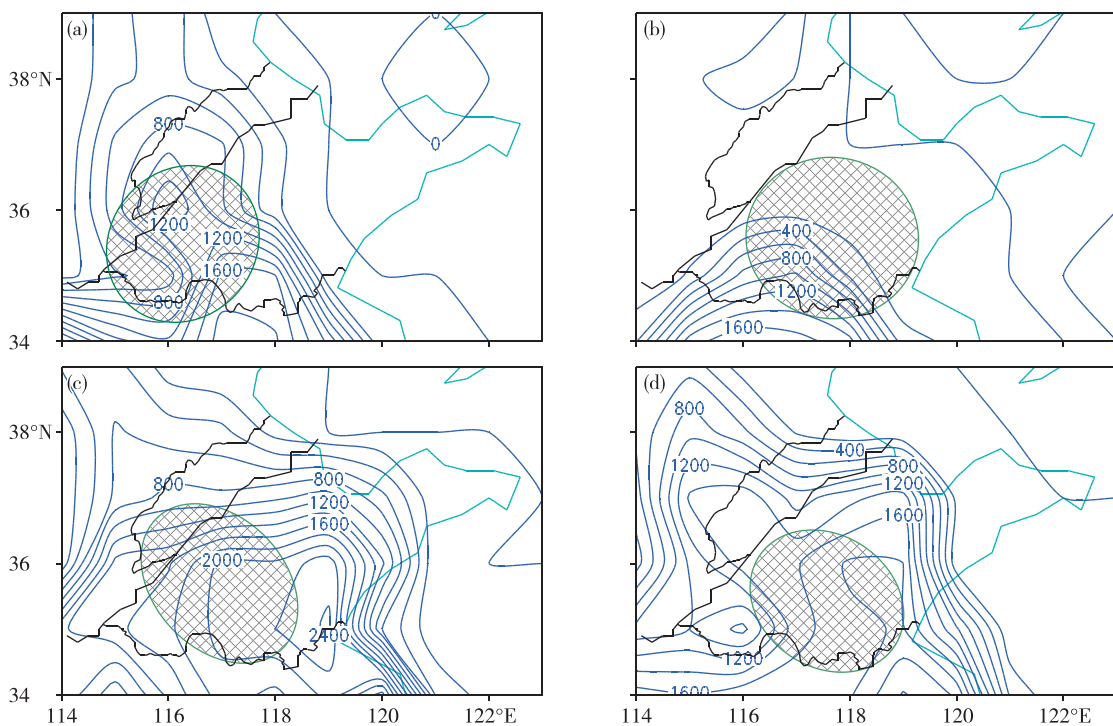


图3 强降水期间对流有效位能(CAPE)的分布(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,阴影区为未来强降水落区)(a.7日20时,b.8日08时,c.9日14时,d.9日20时)

Fig.3 Distribution of CAPE during heavy rainfalls (unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, the shaded area indicates the rainfall area in next 6 hours)) (a.20:00 BST 7, b. 08:00 BST 8, c.14:00 BST 9, d.20:00 BST 9)

在济南和徐州探空站的 $T-\ln p$ 图中,7日20时—10日08时,对流有效位能的形状呈瘦长形(图略),K指数较高。7日20时济南K指数达到 $39 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。8日08时徐州探空站K指数达到 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$,8日上午在徐州的东北部临沂附近产生强降水。8日20时,济南和徐州上空对流不稳定能量再度增大,但

是由于切变线偏南,辐合抬升较小,动力触发作用较小,8日夜间没有强降水。9日08—20时K指数为 $34 \sim 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。10日08时济南和徐州的低层都转为西到西北气流,从低层到高层受一致的西北气流控制,强降水结束。由此可见,在第一次强降水中后期,虽然对流不稳定能量(CAPE)明显降低,但K指

数还较高,说明大气暖湿,具有产生强降水的条件。

4.2 水汽特征

4.2.1 大气可降水量

从探空资料来看,降水期间整层大气的温度露点差较小,低于 5°C 时湿度较大,850 hPa 至地面的比湿为 $15.3\sim 20.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

分析 GPS/MET 监测资料可见,7 日 08 时之前,大气可降水量较小,在 50 mm 以下,7 日 12 时开始鲁西南水汽增加,7 日 14 时聊城至鲁西南一带大气可降水量增大到 53~63 mm。7 日 12 时开始该地区出现小时雨量 20 mm 以上的强降水,大气可降水量的增大与强降水同时出现。7 日 20 时鲁西北的西部和鲁西南的大气可降水量增大到 60~67 mm(图 4a),此时,强降水已明显减弱,但大气中的含水量仍然较高,具有产生强降水的水汽条件。7 日 23 时新一轮强降水开始,强降水区呈西北—东南向,位于济南至临沂一带。强降雨带的分布与大气可降水量的较强梯度区相对应,大气可降水量在 60~75 mm,其梯度高值带也呈西北—东南向,位于济南至

临沂上空。8 日 04 时开始,水汽梯度明显减小(图 4b),量值增大到 66~78 mm,在高值区,产生最大小时雨量为 46~90 mm 的强降水。8 日 14 时以后,可降水量减少到 61~70 mm(图 4c),8 日 14 时—9 日 08 时没有强降水产生。9 日 08 时以后,从鲁西南和鲁中西部开始,可降水量又明显增大,9 日 12 时以后鲁西北西部、鲁南和鲁中南部的可降水量维持在 70~77 mm(图 4d),到 9 日 20 时一直维持在 70 mm 以上(图 4e),10 日 04 时在济南附近达到了 81 mm。19 日 15 时—10 日 06 时最大小时雨量维持在 50~88 mm。10 日 07 时开始可降水量开始减小(图 4f),降水强度和范围也减弱,08 时最大小时雨量减小到 40 mm 以下,以后强降水逐渐减弱结束。10 日 13 时鲁西南、鲁西北和鲁中西部的大气可降水量减小到 66 mm 以下。由此可见,两次过程都是在强降水开始前 3~6 h,大气可降水量从鲁西南开始明显升高,在强降水后期开始降低。大气可降水量的升高和降低对强降水的短时临近预报有一定的指示性。

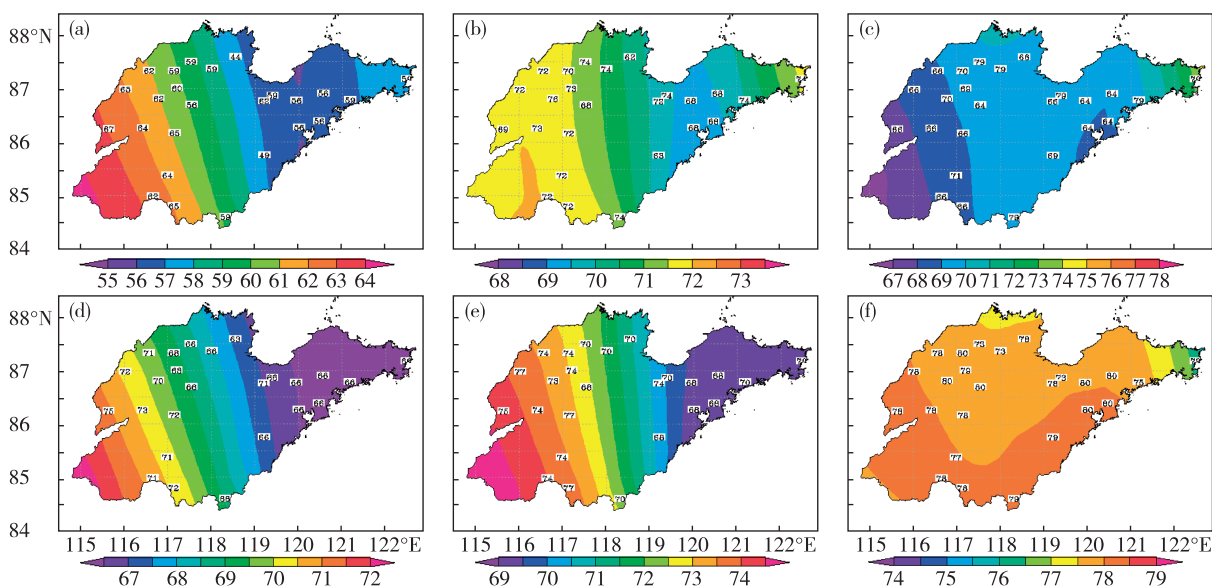


图4 GPS/MET 监测的水汽分布(a. 7 日 20 时,b. 8 日 04 时,c. 8 日 14 时,d. 9 日 12 时,e. 9 日 20 时,f. 10 日 07 时)

Fig.4 Distribution of GPS/MET PWV (a. 20:00 BST 7, b. 04:00 BST 8, c. 14:00 BST 8, d. 12:00 BST 9, e. 20:00 BST 9, f. 07:00 BST 10)

4.2.2 水汽输送和辐合

7 月 7 日 08 时 850 hPa 河南东南部有一股西南气流向鲁西南输送水汽,水汽通量大于 $8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高值舌伸向鲁西南,中心大于 $20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,在鲁西南的暖式切变线附近产生水汽辐合。7 日 12 时,在水汽通量辐合区,强降水开始。7 日 20 时,大于 $20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量中心

随着西南气流的北上移至安徽北部和鲁西南地区(图 5a),大量的水汽在偏南气流前部的鲁西南地区辐合,形成 $-4\times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量辐合中心。之后随着西南气流的加强北进,大量的水汽涌向鲁南和鲁中地区。8 日 02 时,水汽通量中心移至鲁南的枣庄附近,大于 $8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高值舌随西南气流伸向鲁中(图 5b),在鲁南和鲁中形

成水汽辐合,辐合中心位于泰安附近,中心值达到 $-8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。8日02—07时在水汽辐合中心附近的济南至泰安一带产生最大小时雨量为56~87 mm的强降水。8日08时,水汽通量中心移到西南气流前部的鲁东南和鲁中东部地区,在此强烈辐合,形成 $-6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽辐合中心,8日08—13时产生最大小时雨量为61~90 mm的强降水。8日14时,鲁南和鲁中的西南气流明显减弱,水汽通量也明显减小,强降水结束。强降水中心与水汽辐合中心有较好的对应关系。8日14时—9日08时,850 hPa西南急流的轴线偏东偏南,向鲁南的水汽输送明显偏小。在山东的水汽通量基本上小于 $12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,鲁南和鲁中的水汽通量辐合逐渐转为辐散。此时段鲁南和鲁中无强降水。

9日14时开始河南东部的西南风再度加强,相应的水汽通量明显增大,850 hPa西南急流携带的水汽再度北上,涌向鲁南。9日20时,850 hPa西南

急流的前部到达鲁中南部,大于 $12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量高值舌也伸向鲁中,850 hPa在西南急流的左前方产生水汽通量辐合,在水汽通量的辐合区鲁中南部和鲁南再次产生强降水(图5c)。10日02时,随着850 hPa西南急流的北伸和东移,在鲁东南和鲁中东部形成水汽通量高值舌和水汽辐合中心(图5d),产生强降水。10日08时,水汽通量的高值舌和水汽辐合中心北移到渤海,鲁中东部和鲁东南的强降水逐渐结束。两次强降水都是产生在水汽通量的高值舌和水汽的辐合中心附近,前一次的水汽辐合明显大于后一次。

5 动力机制分析

5.1 第一次强降水期间低层中尺度涡旋发展特征

两次强降水期间,低层都有中尺度涡旋产生,在中尺度涡旋中心的东南部,低空西南风急流的前部,有较强的暖湿平流,在此产生辐合上升运动,触发对流不稳定能量释放,产生中尺度对流系统,造

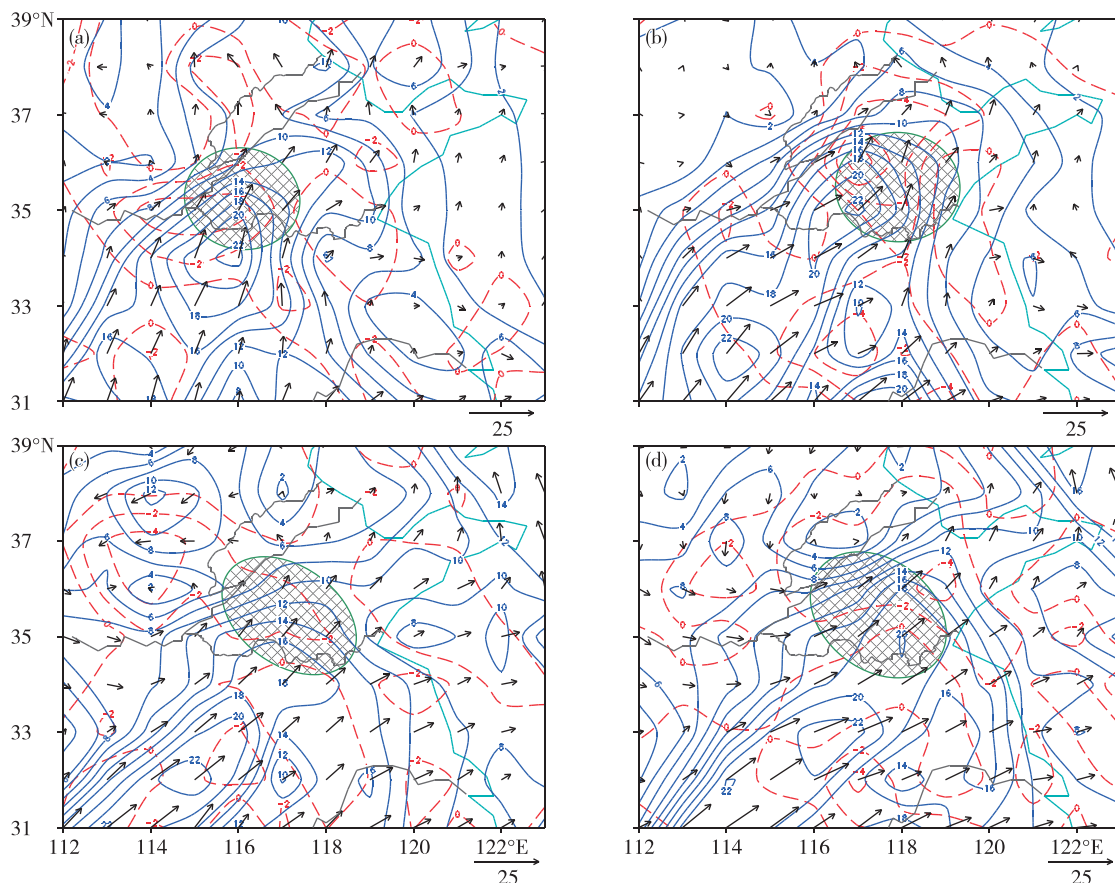


图5 850 hPa水汽通量(蓝色实线,等值线间隔 $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(红色虚线,等值线间隔 $2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,阴影区为强降水区)(a. 7日20时,b. 8日02时,c. 9日20时,d. 10日02时)

Fig.5 850 hPa water vapor flux (blue lines, interval: $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and moisture flux divergence (red dashed lines, interval: $2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the shaded area indicates the heavy rainfall area) (a. 20:00 BST 7, b. 02:00 BST 8, c. 20:00 BST 9, d. 02:00 BST 10)

成强降水。第一次强降水的前期,7日20时,850~700 hPa有一股西南风气流从华南沿海直达鲁南,在鲁西南和鲁中南部形成气旋式辐合上升(图略),1000~925 hPa近地面层有一股东南风气流从华东沿海直达鲁西南,在此产生辐合上升;8日02时低层西南风气流加强,925 hPa以上都转为西南风,向鲁南和鲁中输送较强的暖平流,925 hPa位于鲁西南的暖平流中心达到 $28 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),在鲁南和鲁中南部产生风速和气旋性辐合,在泰安附近形成较强的气旋性辐合上升运动中心,925~850 hPa的辐合中心值为 $-5 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在暖平流中心附近,降水强度增大,最大小时雨量在50 mm以上。在低层西南急流的左前方,气旋性涡度加大,中尺度涡旋发展。另一方面,高空500 hPa附近有西风槽逼近,槽前正涡度平流产生辐散,使得低层减压,也诱发低层中尺度涡旋发展。8日08时,近地面层1000 hPa在鲁西南北部的济宁附近形成中尺度涡旋中心,一股东南风气流从华东沿海伸入山东,并进入涡旋中心(图6a),涡旋中心的东南部鲁南地区为东南风、偏南风 and 西北风三股气流的汇合

区,来自于海面的东南气流相对于陆地偏冷,有弱的冷平流;西北气流携带弱冷空气,也有冷平流,中间的偏南气流为暖平流。三股气流的汇合区对流强烈发展,降水加剧。925 hPa中尺度涡旋最强,中心稍偏西北位于鲁西北西部的聊城附近(图6b),西南风气流在鲁东南形成气旋性弯曲,三股气流中的温度平流明显加强,西南风气流中的暖平流最强,中心达到 $28 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,鲁中东部和半岛北部为来自于海洋的偏南风冷平流,涡旋中心的西南部为偏北风带来的冷平流中心。850 hPa的涡旋中心位置与925 hPa基本一致,但涡旋强度减弱,冷暖平流也减弱,范围扩大(图6c)。700 hPa涡旋中心明显减弱,其南部为一致的西南气流,鲁中北部产生明显的气旋性弯曲,在西南气流中为一致的暖平流,中心位于鲁南(图6d)。由此可见,中尺度涡旋在850 hPa及以下的低层,925 hPa附近最强。在涡旋中心东南部,低层三股气流汇合、925~850 hPa气旋性暖式切变辐合产生的上升运动与暖平流产生的上升运动在鲁东南地区相叠加,上升运动增强,触发对流不稳定能量释放,700 hPa的上升运动达到

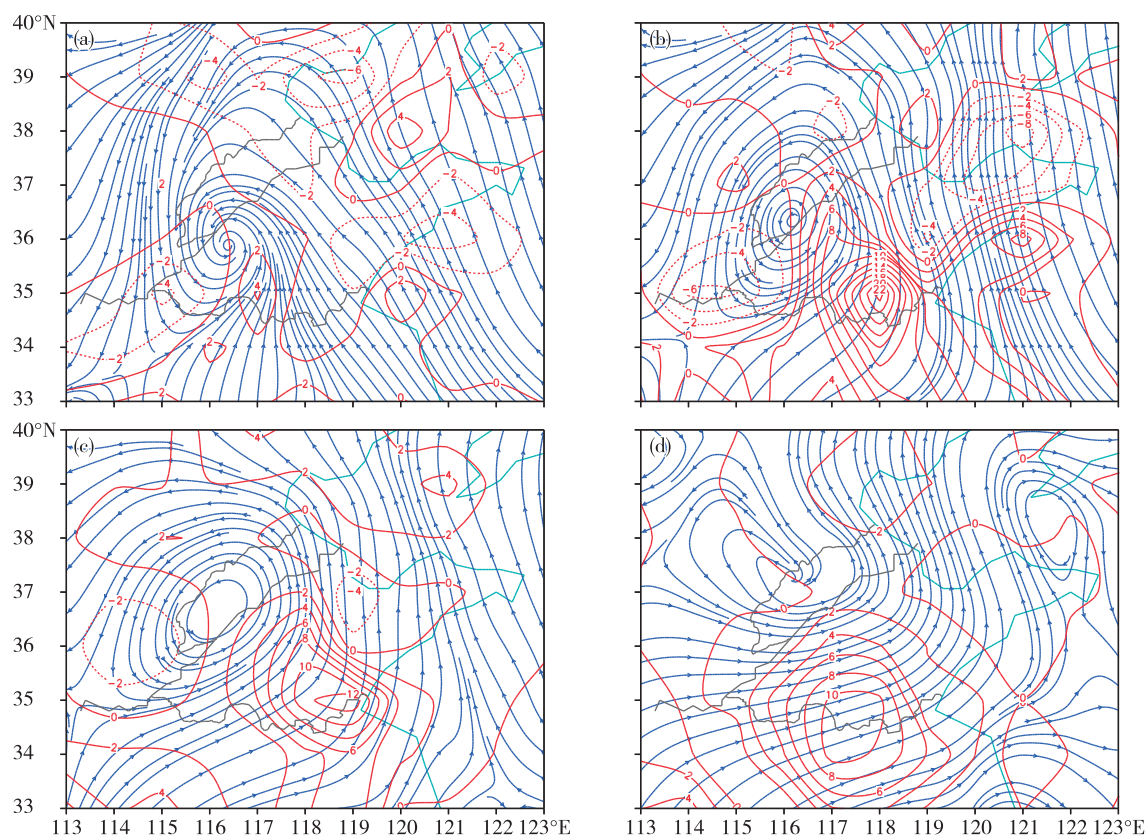


图6 2012年7月8日08时1000 hPa (a)、925 hPa (b)、850 hPa (c)、700 hPa (d)中尺度涡旋的流线(蓝色带箭头实线)和温度平流分布(红色线,等值线间隔: $2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.6 The streamlines (blue solid line with arrow) and temperature advections (red dotted lines, interval: $2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) 2012 at 1000 hPa (a), 925 hPa (b), 850 hPa (c), and 700 hPa (d) at 08:00 BST 8 July 2012

最强,上升运动中心达到 $-22\times 10^{-4}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在暖平流中心和上升运动中心附近产生强降水,8日08—09时最大小时雨量达到90.1 mm,08—13时最大小时雨量为60~90 mm。由于在中尺度涡旋中心的西部为暖平流,没有新鲜冷空气补充,其中心东南部的西南气流也逐渐减弱,8日14时以后,中尺度涡旋明显减弱,其东部的辐合上升运动明显减弱,强降水结束。

5.2 第二次强降水期间地面气旋生成机制

8日夜间,鲁南的偏南气流较弱,中尺度涡旋减弱消失。9日14时在低层925 hPa以下聊城和淄博附近生成两个中小尺度的涡旋中心,其东部和南部开始出现强降水。9日20时,鲁中的涡旋减弱消失,鲁西北西部聊城附近的中尺度涡旋发展,涡旋中心随高度向西倾斜,其西北部有明显的冷平流伴随偏北气流南下,且进入到涡旋中心。1000~950 hPa中心东部为较强的东南风。700 hPa为经向切变线位于河北上空,850~700 hPa在黄河以东为一致的西南气流,暖平流较弱。近地面层1000~950 hPa中尺度涡旋中心东北部东南风气流的前部辐合

区和850~700 hPa西南风气流的左前方侧向辐合区,即鲁西北的西部和鲁中的西南部产生辐合上升,触发对流不稳定能量释放,产生中尺度对流云团造成强降水。10日02时,低层1000~950 hPa的涡旋中心稳定少动、源地加强,在中心西部偏北气流携带较强的冷平流加强,进入到涡旋中心(图7a、b),近地面层1000 hPa附近涡旋中心西部的冷平流较强,中心为 $-4\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ (图7a),近地面层的涡旋生成有锋面的气旋。925 hPa涡旋中心东南部的暖平流最强(图7b),850 hPa在渤海湾西部生成涡旋中心,鲁西北为西风槽区,槽前为较强的西南气流,槽后为明显的偏北气流(图7c),700 hPa的西风槽位于河北东部,槽前山东为一致的西南气流,鲁东南为较强的暖平流中心(图7d)。在冷锋前部、低层暖平流区和槽前西南急流前部的气旋性辐合区产生较强的上升运动,触发对不稳定能量释放,鲁中南部和鲁东南产生强降水。气旋生成后向东北方向移动,10日08时中心移到山东东北部的莱州湾上空(图略),此时气旋中心加强、范围扩大,西北气流的前锋移到鲁中东部,在锋前半岛南部较强的

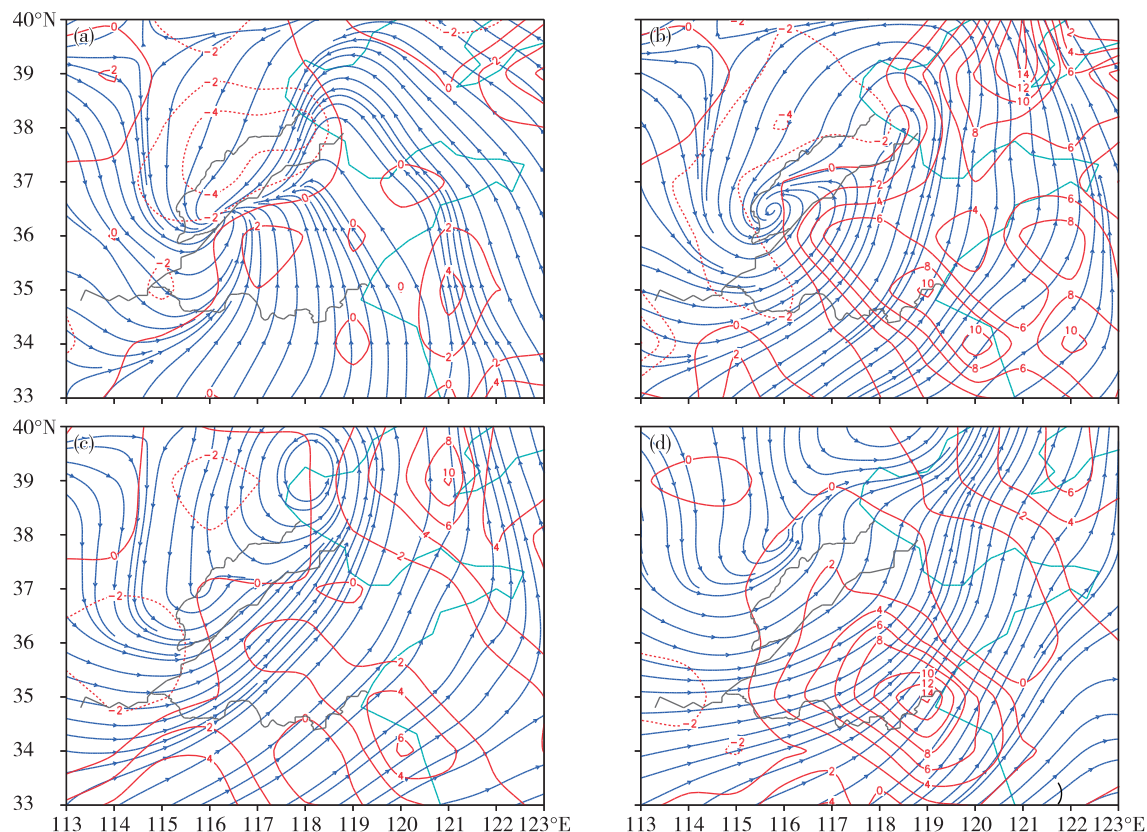


图7 2012年7月10日02时1000 hPa (a)、925 hPa (b)、850 hPa (c)、700 hPa (d)低层流线(蓝色带箭头实线)和温度平流(红色虚线,等值线间隔: $2\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.7 The streamlines (blue solid line with arrow) and temperature advections (red dotted lines, interval: $2\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$) at 1000 hPa (a), 925 hPa (b), 850 hPa (c), and 700 hPa (d) at 02:00 BST 10 July 2012

偏南风、暖平流、辐合和上升运动区,产生强降水。此时,低层的涡旋中心与 700 hPa 低槽基本垂直,500 hPa 低槽超前,表现为前倾槽结构。低层涡旋中心的南部,西北气流与西南气流的汇合区,产生了较强的辐合上升,鲁中东部和半岛地区产生强降水。半岛地区对流不稳定能量低,降水强度和范围远小于气旋生成前和初生阶段,各观测站最大小时雨量为 15~40 mm。

5.3 中尺度涡旋和气旋结构的对比分析

两次强降水都是产生在中尺度涡旋中心的东南部,强降水前期都是在近地面层 1 000 hPa 附近中尺度低涡的南部有三股气流汇合,强降水中后期在 925 hPa 附近涡旋中心东南部的暖平流区降水强度最大。第一次强降水期间西部没有明显的冷空气补充,中尺度涡旋在源地发展和减弱,涡旋垂直伸展厚度在 850 hPa 及以下,上下层涡旋中心近于垂直,涡旋近于圆形,流线基本上为气旋性的闭合环流,水平范围小(图 6)。8 日 14 时 925~850 hPa 西南气流减弱,暖平流减弱,强降水结束。第二次强降水期间,涡旋中心西部有较强的冷平流,偏北气流携带冷空气侵入涡旋中心,前期涡旋中心只在近地面层 1 000~925 hPa,冷空气进入涡旋后生成气旋,涡旋剧烈发展,范围增大,向高层伸展到 850 hPa,流线呈气旋式中心辐合型(图 7)向东北移动,10 日 08 时中心移到莱州湾,此时冷锋已到达鲁中东部,强降水在冷锋前东移到半岛地区,随着气旋东移和冷锋后冷空气的影响,山东南部的强降水

结束。

5.4 强降水中心涡度、散度和垂直速度的垂直分布

强降水产生在低层辐合、高层辐散、整层都有较强上升运动的区域。在两次强降水过程中,鲁东南降水中心上空的散度、涡度和垂直速度都较大,都是低层正涡度、辐合,高层负涡度、辐散,整层都是较强的上升运动。两次强降水期间,穿过强降水中心沿 118°E 的垂直剖面图中,在 700 hPa 以下为较强的偏南气流,有辐合和正涡度,正涡度中心位于 700 hPa 附近。第一次强降水的上升运动在 8 日 08 时最强,08 时前后鲁东南降水最强,上升运动中心在 850 hPa 附近(图 8a),中心值达到 $16 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,与正涡度中心的高度基本一致,辐合中心在低层 950 hPa 附近,850 hPa 及以下的偏南气流较强,500 hPa 及以上的高层为偏北气流。第二次强降水的上升运动在 10 日 02 时最强,对应鲁东南较强的降水,上升运动中心在 750 hPa 附近,中心值 $-8 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8b),远小于第一次,低层的辐合和正涡度也较小。说明第一次强降水过程中,高层有弱冷空气影响,对流发展剧烈;第二次过程中,强降水产生在低层冷空气的前部暖区中,850~700 hPa 的偏南气流较强,高层没有弱冷空气影响,由于低层水汽充足,小时雨强仍然较大,但降水中心雨量比第一次小 58 mm。

6 小结

1) 山东南部连续两次强降水是由副热带高压

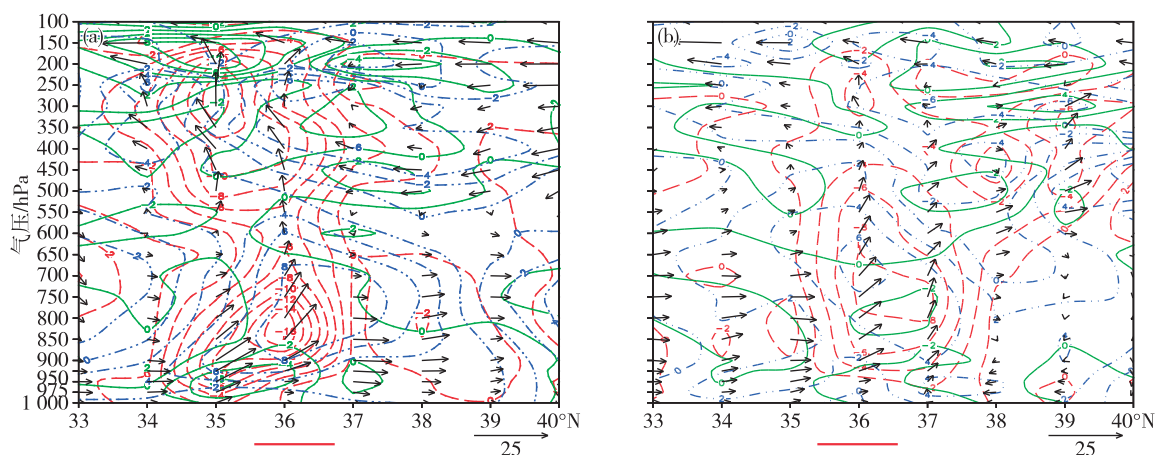


图 8 8 日 08 时(a)和 10 日 02 时(b)垂直速度(红色虚线,等值线间隔: $2 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)、涡度(蓝色点虚线,等值线间隔: $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)、散度(绿色实线,等值线间隔 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)和风($v, 10\omega$)沿 118°E 的空间剖面(图下红线为强降水区的跨度)

Fig.8 The vertical profile (along 118°E) of the vertical velocity (red dotted lines, interval: $2 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$), vorticity (blue dotted lines, interval: $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), divergence (green solid lines, interval: $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and wind ($v, 10\omega$) at 08:00 BST 8 (a) and 02:00 BST 10 (b) (The red lines below figures indicate the spans of heavy rainfall area)

边缘两个西风槽过境影响产生的,低层有较强的西南急流,在急流的前部形成暖式切变线。强降水产生在850~700 hPa西南急流的前方、暖式切变线附近。强降水期间,850 hPa及以下有中尺度涡旋发展,其范围小,只在流场上表现明显。强降水在中尺度涡旋中心的东南部。

2)两次强降水都是产生在整层大气高温、高湿、近于饱和的大气中,K指数在34~40℃,850 hPa及以下比湿大于 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,强降水前期CAPE较高,后期减弱,强降水区与CAPE的高值区有较好的对应关系。GPS/MET监测的大气可降水量在60~81 mm,强降水区与西北—东南向的梯度区相对应,可降水量的增大比强降水提前3~6 h。

3)较强的西南低空急流向强降水区输送水汽和能量,暖湿空气在急流前部的暖式切变线附近辐合。强降水区与水汽通量高值舌和水汽通量辐合中心有较好的对应关系。两次强降水都是产生在西南低空急流加强北上影响山东南部的时段,急流减弱,强降水结束。

4)两次强降水都是产生在低层中尺度涡旋中心的东南部,强降水在近地面层1 000 hPa附近中尺度涡旋中心南部三股气流的汇合区开始,925 hPa附近涡旋中心东南部的暖平流区降水强度最大。第一次强降水期间中尺度涡旋源地发展,稳定少动,上升运动较强,中高层有弱的冷空气影响。第二次强降水中,冷空气在低层从西部进入涡旋,形成气旋,向东北移动,强降水产生在冷锋前部的暖区中。

5)两次强降水都是由多个对流云团组成的中尺度对流系统产生。

参考文献:

- [1] 苏爱芳,银燕,吕晓娜,等.黄淮西部地貌过渡区深对流云的时空特征及其天气意义[J].气象学报,2013,71(3):383-396.
- [2] 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等.苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J].气象学报,2013,71(2):209-227.
- [3] 曲晓波,王建捷,杨晓霞,等.2009年6月淮河中下游三次飚线过程的对比分析[J].气象,2010,36(7):151-159.
- [4] 俞小鼎.2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J].气象,2012,38(11):1313-1329.
- [5] 孙继松,何娜,王国荣,等.“7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].暴雨灾害,2012,31(3):218-225.
- [6] 湛芸,孙军,徐珺,等.北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,2012,38(10):1255-1266.
- [7] 孙军,湛芸,杨舒楠,等.北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J].气象,2012,38(10):1267-1277.
- [8] 方翀,毛冬艳,张小雯,等.2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J].气象,2012,38(10):1278-1287.
- [9] 廖晓农,倪允琪,何娜,等.导致“7.21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J].气象学报,2013,71(6):997-1011.
- [10] 王婧羽,崔春光,王晓芳,等.2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J].气象,2014,40(2):133-145.
- [11] 杨晓霞,周庆亮,郑永光,等.2009年5月9—10日华北南部强降水天气分析[J].气象,2010,36(6):43-49.
- [12] 杨晓霞,吴炜,姜鹏,等.山东省三次暖切变线极强降水的对比分析[J].气象,2013,39(12):1550-1560.
- [13] 杨晓霞,蒋义芳,胡顺起,等.2009年“8·17”鲁南低涡暖式切变线极强降水分析[J].暴雨灾害,2013,32(3):224-234.
- [14] 杨晓霞,胡顺起,姜鹏,等.雷暴大风落区的天气学模型和物理量参数研究[J].高原气象,2014,33(4):1057-1068.
- [15] 杨晓霞,王金东,姜鹏,等.山东半岛南部一次沿海强降雨成因分析[J].气象科技,2015,43(3):512-521.
- [16] 杨晓霞,李春虎,吴君,等.鲁南三次低涡暖式切变线强降水的中尺度对流系统特征[J].山东气象,2015,35(1):1-7.
- [17] 杨晓霞,陈联寿,刘诗军,等.山东省远距离热带气旋暴雨研究[J].气象学报,2008,66(2):236-250.
- [18] 杨晓霞,李春虎,李锋,等.山东半岛致灾大暴雨成因个例分析[J].气象科技,2008,36(2):190-196.
- [19] 毕玮,万夫敬,高山.2011—2012年近海北上热带气旋对山东半岛风雨影响的分析[J].山东气象,2014,34(1):1-5.
- [20] 杨晓霞,夏凡,杨璐瑛.山东WRF集合概率预报对台风“麦德姆”逐6 h精细化预报检验[J].山东气象,2016,36(3):20-27.
- [21] 孙兴池,郭俊建,王业宏,等.低涡和副热带高压共同影响下的暴雨落区分析[J].气象,2015,41(4):401-408.
- [22] 侯淑梅,郭俊建,张磊,等.西风槽与副高相互作用的暴雨过程动热力场结构特征分析[J].气象,2017,43(2):151-165.