

张琴,孟伟,朱敏,等.2016年6月13—14日山东强对流天气过程的中尺度特征及成因分析[J].海洋气象学报,2017,37(4): 101-112.

Zhang Qin, Meng Wei, Zhu Min, et al. Characteristics and cause analysis of the strong convection weather processes in Shandong during 13-14 June 2016[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(4): 101-112. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.012. (in Chinese)

## 2016年6月13—14日山东强对流天气过程的中尺度特征及成因分析

张琴,孟伟,朱敏,张秀青,刘岩,韩国泳  
(淄博市气象局,山东 淄博 255300)

**摘要:** 利用 NCEP 再分析资料、常规观测资料、区域气象观测站资料和多普勒天气雷达资料等,对 2016 年 6 月 13—14 日山东强对流天气过程的中尺度特征、触发条件及雷达回波等进行了分析。结果表明,冷涡前部高空槽和地面气旋造成 13 日强对流天气,高空冷涡和地面气旋造成 14 日强对流天气。高空干冷、低层暖湿气流有利于大气对流不稳定性加大。13 日对流系统由 2 个独立的  $M_{\alpha}$ CS 组成,14 日则是由  $M_{\beta}$ CS 演变而成的  $M_{\alpha}$ CS 系统。辐合线和干线是强对流天气的触发条件,两者重合处能诱发对流单体强烈发展。移动路径右偏中层引导风向、高空西北风的切入和地形因素是导致强降水超级单体发展及持续存在的原因。6 h 前的  $400\sim 1\ 200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  对流有效位能区域与降水落区对应较好。两日强对流天气过程的水汽均以西南向输入、南北向辐合为主;14 日过程中渤海湾的水汽输送也很重要。高层更宽阔的 MPV 异常及显著下传、高低层正负位涡差的增大会造成更强的上升运动和对流不稳定。

**关键词:** 强对流天气; 中尺度分析; 超级单体

**中图分类号:** P458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)04-0101-12

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.012

## Characteristics and cause analysis of the strong convection weather processes in Shandong during 13-14 June 2016

ZHANG Qin, MENG Wei, ZHU Min, ZHANG Xiuqing, LIU Yan, HAN Guoyong  
(Zibo Meteorological Bureau of Shandong Province, Zibo 255300, China)

**Abstract** The mesoscale features, triggering conditions and radar echoes of strong convective weather processes occurred in Shandong from 13 to 14 June 2016 are analyzed by using the NCEP reanalysis data, conventional observation data, regional automatic station data and Doppler weather radar data. Results show that the upper trough in front of cold vortex and ground cyclones cause the convective weather on 13 June. The upper cold vortex and ground cyclones lead to the convective weather on 14 June. High-level dry cold air and low-level warm air flow are conducive to the increase of convection instability. The convection system ( $M_{\alpha}$ CS) is composed of two  $M_{\alpha}$ CSs on 13 June and the convection system ( $M_{\alpha}$ CS) is evolved from  $M_{\beta}$ CS on 14 June. The convergence line and dry line are the trigger conditions of strong convective weathers, and the strong development of convective cells can be induced where they overlap. The right deflection of high-level wind moving path, the invasion in of upper northwest wind and the

收稿日期:2017-03-13; 修订日期:2017-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41475041);中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室重点课题(2014LASW-A03);山东省气象局  
预报员专项(SDYBY2015-9)

作者简介:张琴(1983—),女,硕士,工程师,主要从事强对流天气研究,403680112@qq.com。

topographic factor are the reason of the development and persistent existence of supercell thunderstorms. The precipitation area has a good corresponding to the area with CAPE (convective available potential energy) of  $400-1\ 200\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$  before 6 h. The water vapor is dominated by the southwest input and the north-south convergence during the strong convective weather processes on 13 and 14 June. Besides, the moisture transport from Bohai Bay is also important for the weather process on 14 June. The wider MPV anomaly at the upper level and its significant downward transmission, and the increase of positive and negative vorticity difference at high and low levels can cause stronger ascending motion and convective instability.

**Key words** strong convective weather; mesoscale analysis; super cell

## 引言

在有利的大尺度环流背景条件下,中小尺度天气系统强烈发展会导致强对流天气的发生<sup>[1]</sup>。强对流常伴有雷暴、短时强降水、冰雹、强风(龙卷风)等灾害性天气。由于其突发性和局地性强,预报难度较大。多年以来,专家和学者对各类强对流天气做了较为深入的分析研究,揭示了很多强对流天气发生发展的规律和成因。郁珍艳等<sup>[2]</sup>对华北冷涡背景下4种强天气的时空特征分布、对流强度特征等进行了统计,并计算了强天气的对流参数。吴庆梅等<sup>[3]</sup>在分析北京一次对流暴雨过程时,指出自高纬向低纬传播的高位涡带配合干区与水汽图像暗区,即干侵入明显时,对流天气发生。许新田等<sup>[4]</sup>对比了陕西两次强对流冰雹天气过程时,指出强的不稳定层结和一定的外部抬升力条件是产生强对流天气的共同物理特征,对流层低层的逆温层更有利于深厚对流活动的产生。吴国雄等<sup>[5]</sup>证明绝热无摩擦的饱和湿空气具有湿位涡守恒的特性,并在此基础上提出倾斜涡度发展理论,指出在湿位涡守恒的制约下,由于湿等熵面的倾斜,大气水平风垂直切变的增加或水平湿斜压的增加引起垂直涡度的增长,从而导致暴雨的发生。王立荣等<sup>[6]</sup>统计分析了对流参数的气候特征,对预报有指示作用。湿位涡不仅表征了大气动力、热力属性,而且还考虑了水汽的作用,湿位涡与对称不稳定有很好的对应关系,湿位涡的分析能更全面有效地描述对流的发生发展。

2016年6月13日下午至14日夜,山东出现两天强对流天气,部分地区出现冰雹、大风天气,这次强对流天气分布范围广,强度大,影响区域达30多个县(市区)。本文利用天气学诊断分析方法、雷

达探测资料分析,对两天强雷雨天气的特征和形成原因进行了较为详细的分析和探讨,以期进一步加深对山东地区强对流天气认识,为提升此类天气的预报预警能力提供参考。

## 1 天气实况

图1a为13日08:00—14日11:00降水量和强对流天气分布。降水落区主要分布在山东西南部,主要降水带有3条,呈西北—东南向。第一条降水带位于鲁西北,降水中心位于陵县与临邑附近。第二条降水带从鲁中西部到鲁东南,即鲁中山区西南部,最大降水量出现在肥城、曲阜一带。第三条降水带位于鲁西南,郓城是强降水中心。大于60 mm/h的短时强降水站点有5个,主要分布在前两条降水带中,分别为陵县、临邑、汶上、东平、苑庄。其中,临邑最大,为76.6 mm/h。降雹站点有4个,分别为陵县、肥城、汶上、嘉祥。其中,肥城冰雹直径为8 mm。

图1b为14日11:00—15日08:00降水量和强对流天气分布。降水量主要分布在鲁中北部地区,一个中心位于淄川、博山附近,一个中心位于安丘附近。超过60 mm/h的短时强降水站点有3个,分别为金冢子、百尺河和大莱村。冰雹站点有4个,为肥城、章丘、淄川、莒县,其中章丘冰雹直径达20 mm。

总体来说,两日强对流过程均出现了短时强降水、雷暴、冰雹天气,给当地造成严重损失。不同的是,13日过程以短时强降水为主,冰雹直径较小;14日过程以冰雹为主,降水量弱于13日。从位置上看,除德州附近站点,短时强降水与冰雹站点均出现在鲁中山区周围,说明两次强对流的发生,可能与地形有着密切联系。

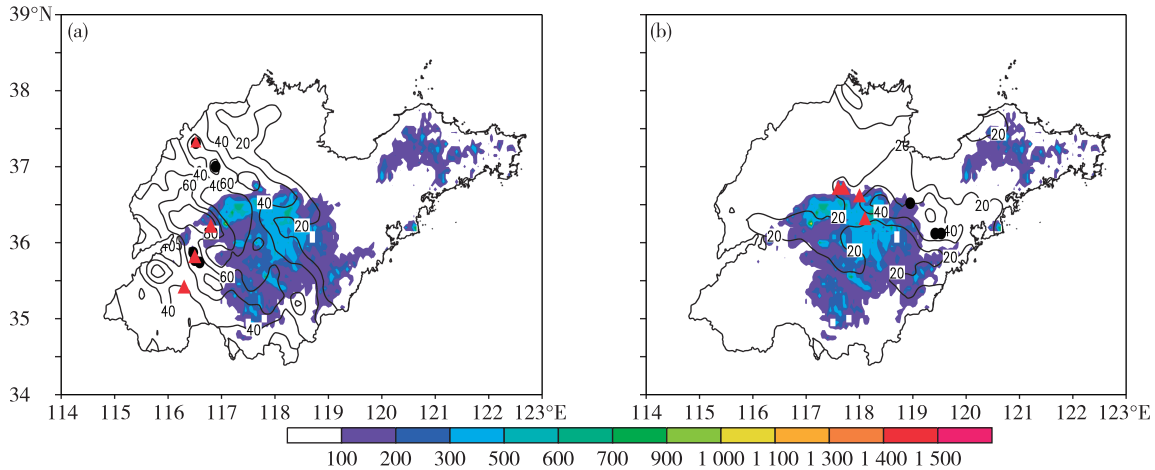


图1 山东降水量(等值线;单位:mm)、冰雹(红三角)、短时强降水站点(大于60 mm/h;黑圆点)和地形(填色;单位:m)分布(a.6月13日08:00—14日11:00,b.6月14日11:00—15日08:00)

Fig.1 Distributions of precipitation(contours;units:mm), hail(red triangles), stations of short-time heavy precipitation(larger than 60 mm/h;black dots) and terrain(shaded areas;units:m) in Shandong from 08:00 BST 13 to 11:00 BST 14(a) and from 11:00 BST 14 to 08:00 BST 15(b) June 2016

## 2 强对流天气影响系统

6月13日14:00(图2a),500 hPa 中高纬度环流形势为两槽一脊型,经向型明显。西伯利亚西部被一强大的阻塞高压控制,蒙古中部有一高空冷涡,山东位于冷涡底部的西北气流中,地面气旋前部的西南气流控制之下,高层干冷空气叠加在低层暖湿空气上,导致不稳定层结出现。14日02:00,200 hPa 高空图(图2b)上,高空急流位于33°N,山东位于急流左前方,地转偏差的存在使得山东西北部开始出现辐散与上升运动,对应地面出现降水最强时段。6月14日20:00(图2c),冷涡移至华北上空,中心位于河北北部,山东位于冷涡东南侧的西南气流中。地面气旋位于山东西部,山东在对流层低层处于气旋前部西南气流中,暖湿空气不断向山东输送,山东上空出现不稳定层结,积累不稳定能量。同时,200 hPa 高空图(图2d)显示,14:00—20:00强烈的高空急流逐渐建立。急流轴位于35°N附近,中心值大于80 m/s,山东位于急流轴出口区左侧,强烈的地转偏差使山东上空辐散效应逐渐增强。低层700 hPa 出现低空急流,山东位于急流前部,辐合增强。高低空急流耦合作用使山东地区上升运动增强,为强对流天气提供了有利条件,促进风暴系统的发生发展和组织。

从上面的分析可见,13日500 hPa 影响系统为冷涡前部下滑冷槽,14日则为华北冷涡,但强对流发生时均受到地面气旋引导下的西南气流的影响。

200 hPa 上,均发生在高空急流辐散区,13日高空急流导致的辐散更强,14日存在高低空急流的耦合作用。

## 3 中尺度对流系统

### 3.1 TBB 资料分析

由2016年6月13—14日FY-2E 气象卫星TBB图(图3)可以看到,6月13日14:00,鲁西北地区出现一个 $TBB \leq -52$  °C的 $\beta$ -中尺度对流系统( $M_{\beta}CS$ ),系统逐步向东移动并迅速发展。17:00,该系统移至山东中西部,并发展为 $\alpha$ -中尺度对流系统( $M_{\alpha}CS$ ), $TBB \leq -32$  °C的面积接近于 $4 \times 10^4$  km<sup>2</sup>(4个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格点)。鲁西北TBB等值线十分密集,导致德州21个站出现大于20 mm/h 短时强降水。同时,该系统西部更大尺度的 $M_{\alpha}CS$ 也不断东移。14日02:00,西部的 $M_{\alpha}CS$ 移到山东上空, $TBB \leq -32$  °C的面积接近于 $1 \times 10^5$  km<sup>2</sup>(10个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格点),冷云中心 $TBB \leq -65$  °C,云顶已穿过对流层顶,对流发展十分旺盛,对应71站出现短时强降水,6站小时降水量达到25 mm以上。04:00以后,冷云盖慢慢分散,对流云体变弱,强对流天气也相应减弱。14日17:00,鲁西北对流云团迅速发展成为 $M_{\alpha}CS$ ,面积为 $6 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。18:00,鲁西北的西部出现 $TBB \leq -65$  °C的深对流中心,面积小于13日夜。20:00—23:00,云团逐渐向东南方向移动,对应降水最强时段,大于20 mm/h 短时强降水站数大于50个。15日00:00,云团东移入海,强对流天气

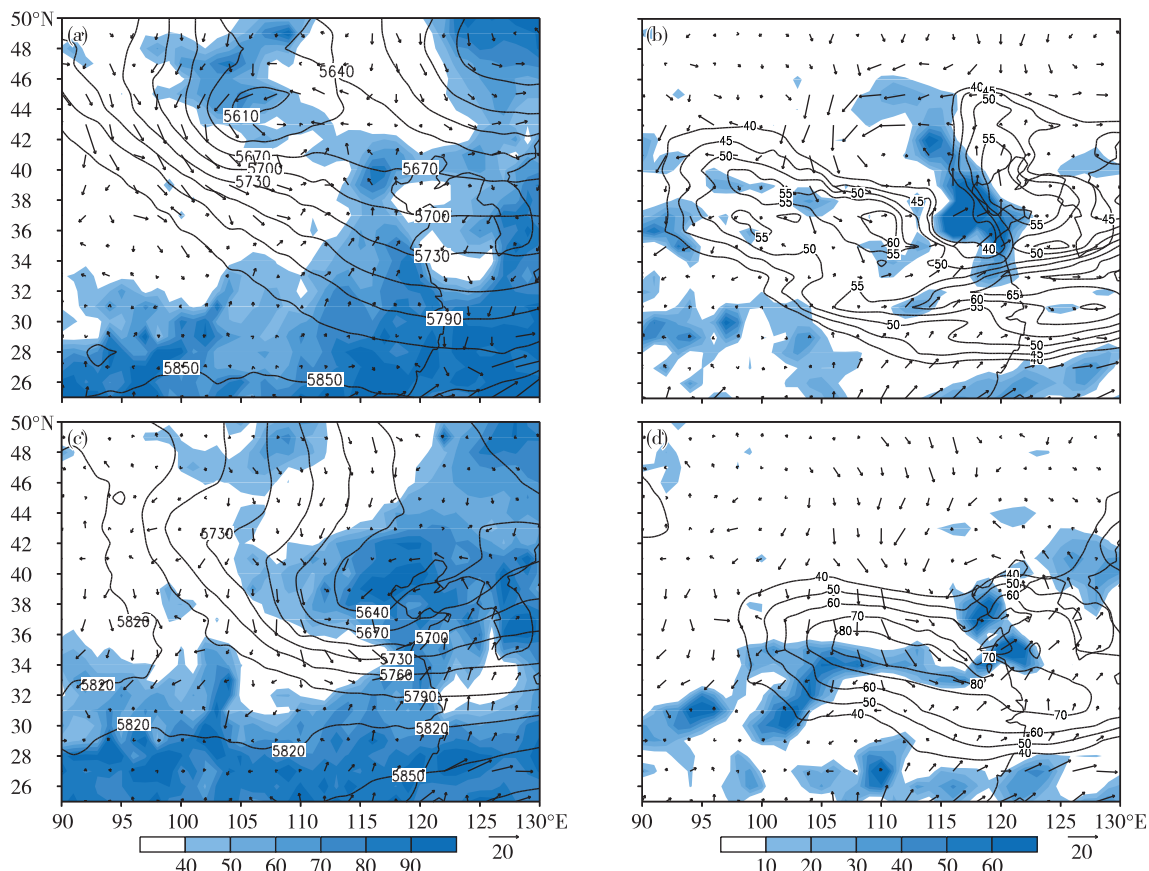


图2 2016年6月13—14日500 hPa高度场(实线;单位:gpm)、850 hPa风场、相对湿度场(填色为相对湿度;单位:%)(a, c)和200 hPa全风速场(实线;单位:m/s)、散度场(填色为散度;单位: $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )、700 hPa风场(b, d)(a.13日14:00, b.14日02:00, c.14日20:00, d.14日20:00)

Fig.2 Geopotential height fields(solid lines;units:gpm) at 500 hPa, wind fields at 850 hPa, relative humidity fields(shaded areas; units:%)(a, c), and full wind speed fields(solid lines;units:m/s) at 200 hPa, divergence fields(shaded areas;units: $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) at 200 hPa and wind fields(b, d) at 700 hPa at 14:00 BST 13(a), 02:00 BST 14(b) and 20:00 BST 14(c, d) June 2016

结束。

通过以上分析发现,强对流天气过程均是由  $M_{\alpha}$ CS 造成的,13日强对流是由2个独立的  $M_{\alpha}$ CS 组成,影响时间达十几个小时;14日强对流过程的  $M_{\alpha}$ CS 系统生命史为5 h,是由  $M_{\beta}$ CS 发展演变而成。

### 3.2 雷达回波特征及演变

由济南 SA 雷达2016年6月13—14日组合反射率的演变(图4)可见,2016年6月13日14:03(图4a)在雷达站西北侧的宁津、乐陵附近出现多单体风暴。15:47对流单体A反射率因子超过65 dBz,回波顶高12 km,低层存在弱中气旋,说明上升气流旺盛。单体A为强单体风暴,陵县降雹,短时强降水达67.5 mm/h。16:00左右(图4b),单体A减弱后,与其西侧的单体合并,面积变大。进入临邑后,带来临邑站76.6 mm/h的短时强降水。单体A与西南方向新生成的对流单体一起排列成东北—

西南走向的断续型对流带,成为由多个对流单体组成的尺度在100 km左右的中尺度对流系统——飚线。其中,对流单体A经过济南时再次加强,给济南带来了大范围降水。

13日17:00,雷达站西北方向有新生单体迅速发展。17:58(图4c),与其东侧回波相遇合并成人字形回波。19:02(图4e),随着雷达站西南方向单体逐渐消散,人字形回波发展为弓形的飚线系统。从低层19:02的1.5°径向速度图(图略)来看,飚线前侧存在整齐的径向辐合。18:33位于飚线西侧的对流单体B(图4d箭头)回波强度达到65 dBz以上,回波顶高达19 km,造成了肥城的冰雹大风天气,冰雹直径达8 mm。19:02对流单体C(图4e箭头)发展到最强阶段(大于65 dBz),回波顶高13 km,有回波悬垂结构,但中心水平范围大于单体B,强度和高度明显低于单体B,给汶上带来

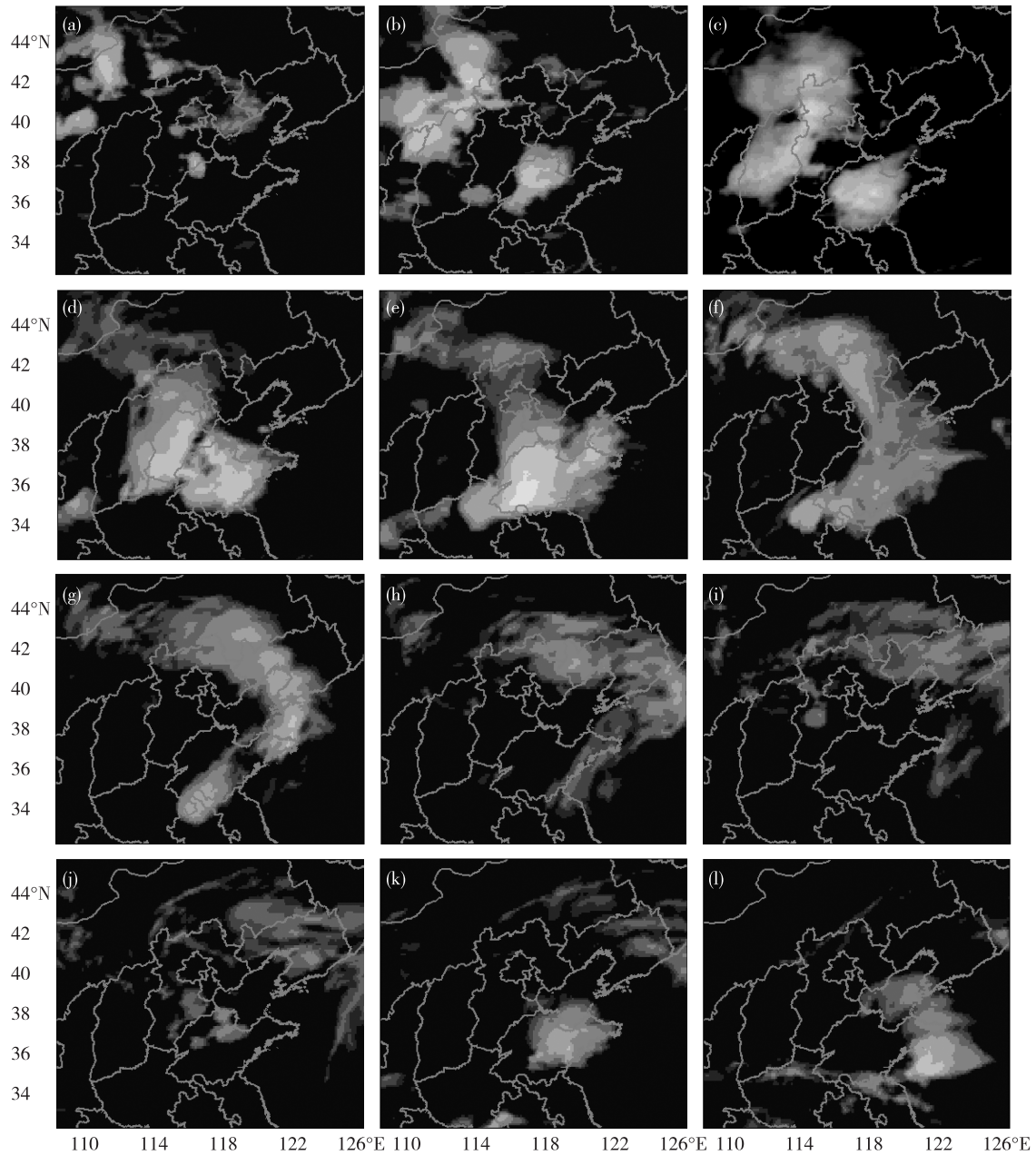


图 3 2016 年 6 月 13 日 14:00—14 日 23:00 的 TBB 分布(a.13 日 14:00,b.13 日 17:00,c.13 日 20:00,d.13 日 23:00,e.14 日 02:00,f.14 日 05:00,g.14 日 08:00,h.14 日 11:00,i.14 日 14:00,j.14 日 17:00,k.14 日 20:00,l.14 日 23:00)

Fig.3 TBB distributions from 14:00 BST 13 to 23:00 BST 14 June 2016 (a.14:00 BST 13, b.17:00 BST 13, c.20:00 BST 13, d.23:00 BST 13, e.02:00 BST 14, f.05:00 BST 14, g.08:00 BST 14, h.11:00 BST 14, i.14:00 BST 14, j.17:00 BST 14, k.20:00 BST 14, l.23:00 BST 14)

72.8 mm/h 强降水、2 mm 冰雹。22:02(图 4i), 山东以西有多单体风暴生成。23:01(图 4j), 随着飚线逐渐移出山东, 两片回波汇合, 山东西部出现强降水天气。14 日 03:01(图 4l)后, 回波逐渐移出, 山东降水结束。

2016 年 6 月 14 日 15:00 左右济南雷达站东北侧的临邑、商河附近新生单体迅速发展。16:00 左右, 发展成尺度为 50 km 左右的中尺度对流系统。

16:02(图 5a)后, 单体分裂, 南部单体 D(图 5 箭头) 向东略偏北移动, 北侧单体 E 向东北方向移动。16:31—17:07 单体 D 顶高达 14 km, 回波强度大于 65 dBz、有高悬垂质心、长达 40 km 的三体散射(TBSS), 中等强度中气旋, 为典型的超级单体特征。所经地区, 章丘出现强降水和直径为 20 mm 的冰雹, 淄博市有 7 个站超过 30 mm/h 的降水, 淄川出现了直径为 7 mm 的冰雹。而北侧单体 E 逐渐减

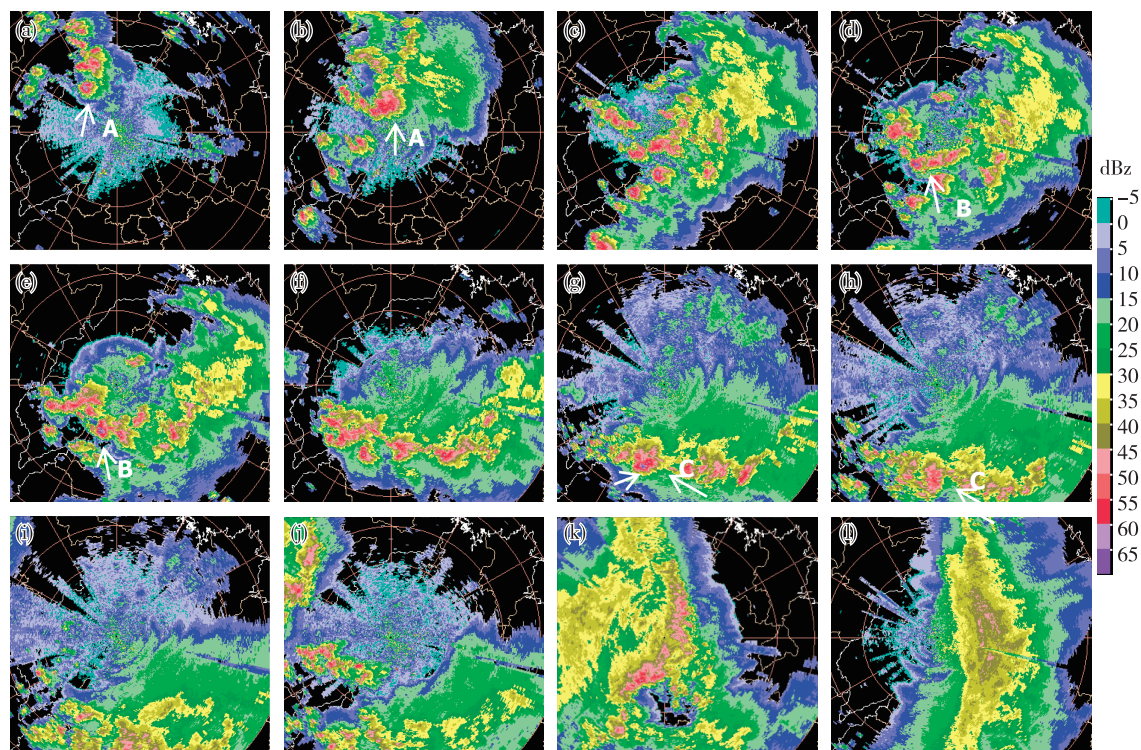


图4 6月13日14:03—14日03:01 济南SA雷达组合反射率因子CR(单位:dBz;a.13日14:03,b.13日16:02,c.13日17:58,d.13日18:33,e.13日19:02,f.13日20:00,g.13日20:58,h.13日21:30,i.13日22:02,j.13日23:01,k.14日00:58,l.14日03:01)

Fig.4 Combined radar reflectivity factor(units:dBz) of SA radar at Jinan station from 14:03 BST 13 to 03:01 BST 14 June (a.14:03 BST 13,b.16:02 BST 13,c.17:58 BST 13,d.18:33 BST 13,e.19:02 BST 13,f.20:00 BST 13,g.20:58 BST 13,h.21:30 BST 13,i.22:02 BST 13,j.23:01 BST 13,k.00:58 BST 14,l.03:01 BST 14)

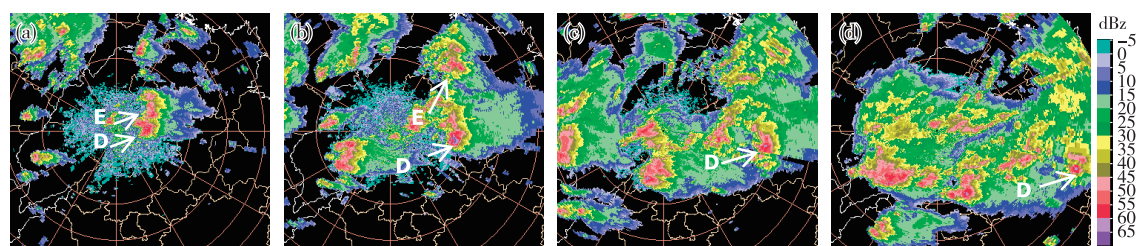


图5 2016年6月14日16:02—18:57 济南SA雷达站0.5°仰角雷达反射率因子(单位:dBz;a.16:02,b.17:01,c.17:59,d.18:57)

Fig.5 Radar reflectivity factor(units:dBz) of SA radar at 0.5° elevation at Jinan station from 16:02 BST to 18:57 BST 14 June 2016(a.16:02 BST,b.17:01 BST,c.17:59 BST,d.18:57 BST)

弱,为普通降水单体。随着超级单体D向东移动, TBSS消失,证明单体内大粒子减少,给临朐造成50 mm/h的短时强降水。19:30后,单体D消失,山东中西部地区受大片降水回波控制,回波相对零散,20:00回波成团状,21:30消失,山东降水结束。

### 3.3 强对流天气触发机制

在对流不稳定、充足水汽、垂直风切变存在的情况下,需要一定的抬升条件才能触发强对流的发

生,通常由中尺度系统提供,如锋面、干线、对流风暴的外流边界(阵风锋)和重力波等<sup>[1,7-10]</sup>。

图6为地面自动站流场和露点温度分布。13日14:00鲁西北德州出现短的辐合线和干线,为雷暴初生提供抬升条件,卫星云图上对流云团迅速发展,雷达图上对流单体生消旺盛。其中,陵县附近的对流单体A沿着干线移动,于14:33增强到65 dBz以上,发展为超级单体,造成陵县的冰雹和短时

强降水。17:00 鲁西北的辐合线向东南移动,其南侧也出现一条显著的辐合线,新生对流单体沿南部辐合线呈线状排列,与北部单体 A 共同构成  $M_{\alpha}$ CS,造成地面上鲁西北和鲁西南大范围降水。14:00—20:00,鲁西南稳定维持一条干线,当辐合线与其交汇时,引起对流单体的强烈发展。对应雷达图上显

示,17:00—19:00 鲁中西部先后有两个对流单体发展到 65 dBz 以上,其中包含单体 B。在 20:00 以后地面辐合线移动到鲁南地区,单体在西北风的作用下整齐排列,形成飚线。辐合线最西端与干线重合处辐合发展,强烈的上升气流促使对流单体增强为雹暴单体 C,汶上出现冰雹天气。

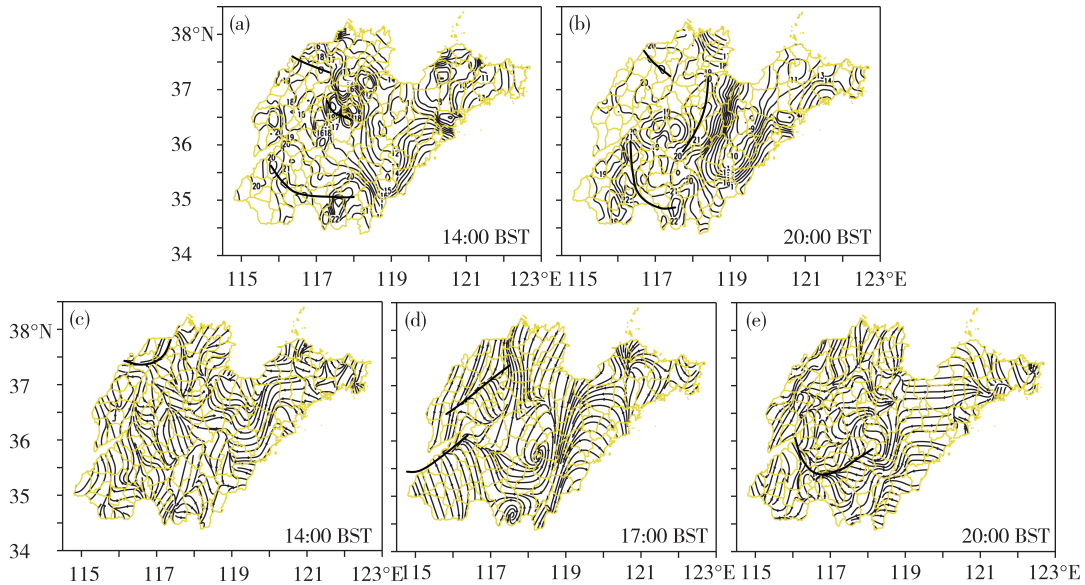


图 6 13 日 14:00—20:00 地面自动站露点温度(a,b;单位:℃)和流场(c,d,e)  
Fig.6 Dew point temperature fields(a,b;units:℃) and flow fields(c,d,e) of ground automatic weather stations from 14:00 BST to 20:00 BST 13 June

14 日 16:00 济南附近出现短的辐合线和干线(图略),为中尺度系统提供了抬升条件。14 日 16:00—20:00(图 7a),鲁中北部稳定维持一条干线,呈东西向,3 h 仅移动了 1 个纬距。16:00—

17:00(图 7b),地面辐合线稳定在章丘北部,为章丘北部单体发展提供了条件。章丘附近单体 C 沿着干线向东移动,发展为超级单体风暴,出现 20 mm 大冰雹。

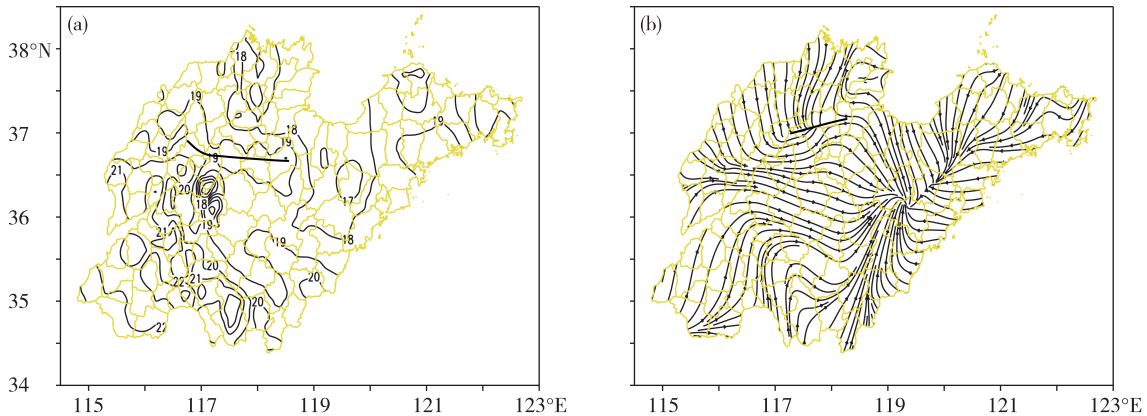


图 7 14 日 17:00 地面自动站露点温度(a;单位:℃)和流场(b)  
Fig.7 Dew point temperature field(a;units:℃) and flow field(b) of ground automatic weather stations at 17:00 BST 14 June

可见,13 日过程中,辐合线与干线是强对流天气的触发条件,对流单体沿着辐合线排列。在辐合

线与干线重合处,对流单体强烈发展。因此,在强对流天气的预报中,应着重关注辐合线与干线的配

合。14日过程中,干线是触发强雹暴单体D发展的条件之一。

### 3.4 风切变、路径及地形对单体D发展的影响

研究表明,风暴单体越强,右偏高空风越多,风暴单体通过右移,使环境风垂直风切变产生的水平涡度在沿着低层入流方向的水平涡度分量增大,并随着低层入流转变为上升气流过程中转变为垂直涡度,使主上升气流的旋转得到加强维持<sup>[11]</sup>。图8a是致灾单体D与北部单体E的路径图。15:04—16:15,济南雷达风廓线图显示整层为西南风(210°),单体D、E初生阶段均向东移动,右偏中层引导风30°,两单体发展迅速。16:15两单体分别偏离中层引导风风向(210°)的右侧(247°)和左侧(195°)移动,单体D继续加强,单体E开始减弱。济南雷达VWP图(图8b)显示,16:31开始,从高层8.5 km有强西北风出现,配合低层西南风,造成风

向随高度顺转。根据Klemp模式研究<sup>[12]</sup>,当风切变矢量随高度顺时针变化时,动力作用诱发的非静力平衡垂直气压梯度力能使得由分裂产生的唯一主上升气流右侧的上升气流得以加强。单体D的强度变化也与此理论相符。高空强西北风持续到17:30,共维持了1 h,其出现时间段对应着单体D的最强时段。一方面,西北风的出现有利于单体D上升气流的加强;另一方面,高空西北风向低层下传有利于垂直风切变的加强,为单体D的发展提供了有利条件。另外,单体D进入章丘和淄川时,均沿两山之间的谷地移动,这种地形对于单体D的发生发展起到了抬升和维持作用,同时也对单体的移动起了导向作用<sup>[13]</sup>。可见,超级单体D的发展与移动路径、高空西北风的出现和有利的地形均有关。因此,在预报对流单体的发展趋势时要综合考虑各个因素的配合。

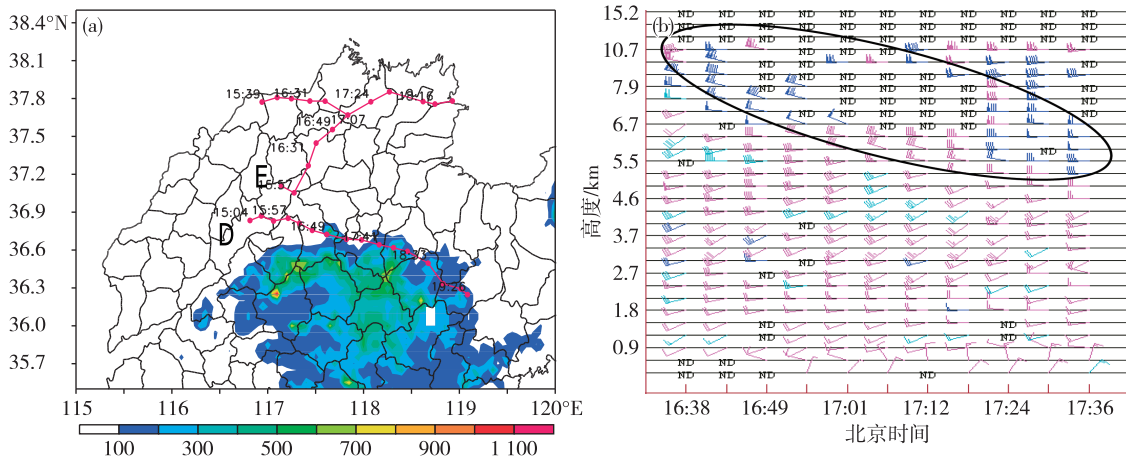


图8 对流单体D、E的路径(a)和6月14日16:38—17:36雷达VWP(b;椭圆区为西北风区)

Fig.8 Routes of convective cells D and E(a), and the radar VWP from 16:38 BST to 17:36 BST 14 June 2016(b; The ellipse area is the northwest wind region)

## 4 强对流天气诊断分析

### 4.1 对流不稳定能量与降水落区

对流有效位能CAPE和6 h降水量的叠加图(图9)显示。13日14:00(图略),CAPE从鲁西南向东扩展,高能区扩大到山东大部分地区。20:00等值线开始西撤,降水落区主要位于鲁西北,最强为德州市,对应14:00,CAPE为400~1 200 J·kg<sup>-1</sup>区域,同时,从700 hPa相对湿度来看,降水区域对应湿舌。14日02:00(图9c),CAPE高能区西撤,降水落区为整个山东西南部地区,对照13日20:00的CAPE分布,基本位于400~1 200 J·kg<sup>-1</sup>区域,850

hPa显示为高湿度区。随着第一次强对流过程结束,14日08:00,CAPE高能区扩大至山东大部,中心为2 000 J·kg<sup>-1</sup>。14:00高能区向西南扩展,山东中部对应400~1 200 J·kg<sup>-1</sup>区域,与20:00降水落区相吻合。从相对湿度来看,20:00山东中部对应湿舌。可见,两次过程降水落区与6 h前的CAPE场400~1 200 J·kg<sup>-1</sup>的位置对应关系较好,与700 hPa相对湿度大于70%位置对应关系较好。考虑其叠加区,可对强对流天气起到一定的预示作用,但由于过程降水与动力、热力等条件均有密切关系,对流有效位能只能作为强对流天气的基本影响因素来参考。



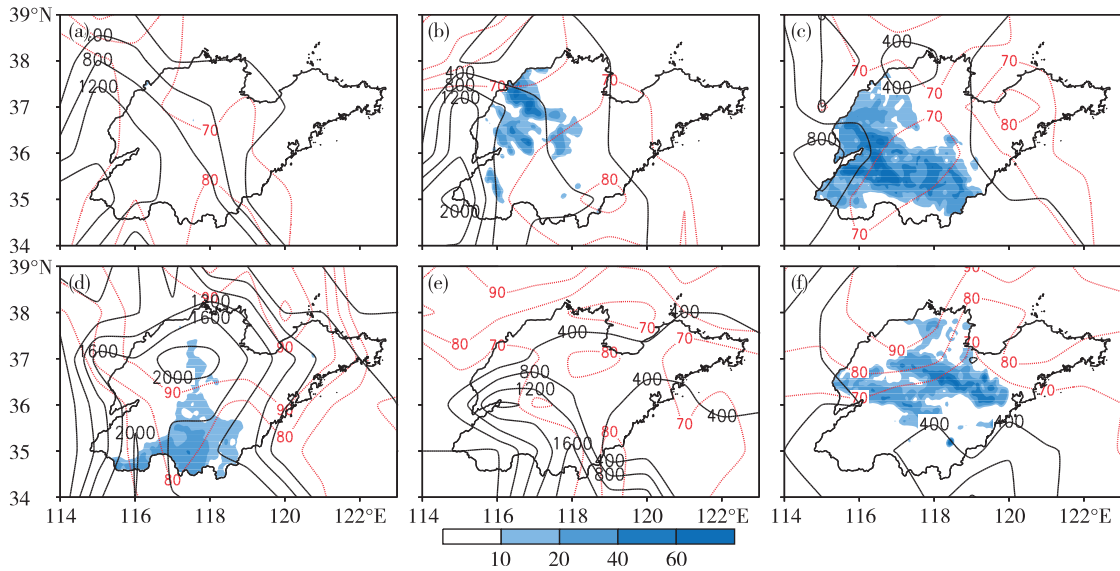


图 9 6 月 13 日 14:00—14 日 20:00 的 6 h 累积降水量(填色;单位:mm)、CAPE(黑实线;单位: $J \cdot kg^{-1}$ )、850 hPa 相对湿度(红虚线)分布(a.13 日 14:00,b.13 日 20:00,c.14 日 02:00,d.14 日 08:00,e.14 日 14:00,f.14 日 20:00)

Fig.9 Distributions of 6 h accumulated precipitation(shaded areas;units:mm),CAPE(black solid lines;units: $J \cdot kg^{-1}$ ), and 850 hPa relative humidity(red dashed lines) at 14:00 BST 13(a),20:00 BST 13(b),02:00 BST 14(c),08:00 BST 14(d), 14:00 BST 14(e) and 20:00 BST 14(f) June

#### 4.2 水汽来源及收支分析

本研究对水汽通量从地面到 700 hPa 进行积分(图 10),从 13 日 08:00 开始,山东、河南东部、安徽西部水汽通量开始增大。14:00—20:00 水汽由西南方向输入,山东水汽通量增大至  $200 g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ ,对应山东西部出现短时强降水。山东中部水汽通量值较小,对应肥城、汶上、嘉祥等强降雹区域。14 日 02:00,水汽通量大值区分别位于西部和东部并不断东移。14 日 14:00 随着冷涡的东移至山东附近,冷涡外围伴随着水汽通量大值区,水

汽通过西侧和南侧流入山东。20:00 山东中西部地区有一水汽通量大值中心,为聊城、济南的短时强降水提供水汽,降雹则发生在山东中部水汽通量很低的济南淄博等地。可见,过程中低层水汽来源主要为鲁西南,降雹发生在水汽通量偏低的区域。

为了分析水汽收支在两次强对流天气过程中的变化,计算了山东 4 个边界(图 10 中的矩形框)整层水汽收支(图 11)。结果表明,两次过程中,南边界水汽输入量最大,且与西边界一直为输入,变化趋势也趋于同步。14 日 02:00 以前,水汽输入主

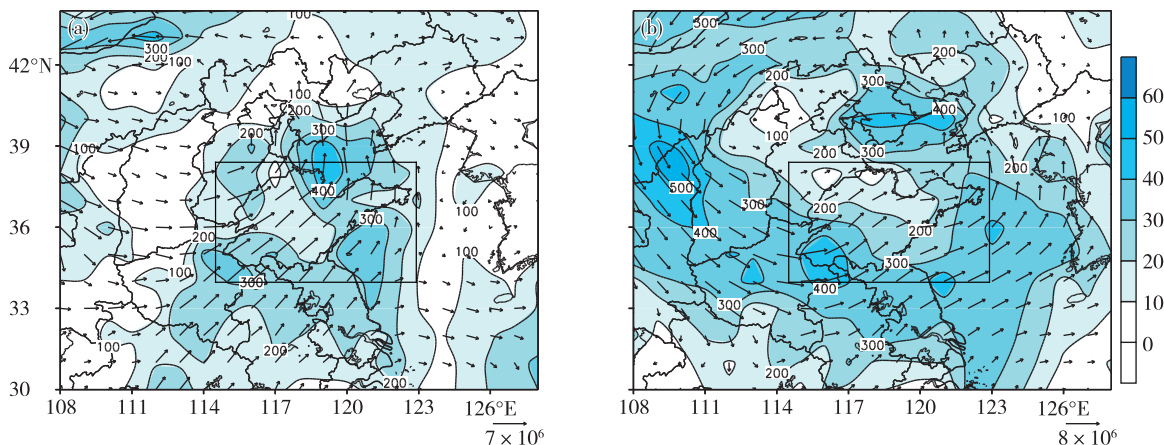


图 10 6 月 14 日 02:00(a)、14:00(b)从地面积分到 700 hPa 的水汽通量(单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ ;矩形为山东地区)

Fig.10 Vertically integrated water vapor flux from ground to 700 hPa at 02:00 BST(a) and 14:00 BST(b) 14 June 2016(units: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ ;Rectangle denotes Shandong region)

要以南边界和西边界为主,南边界输入量大于北边界输出量,为水汽辐合。02:00后,南边界水汽输送减少,降水逐渐减弱。14:00南边界与西边界输送量增大至极值。20:00南边界与西边界输入量减少,北边界由输出开始转为输入,说明渤海湾的水汽开始向省内输送。15日02:00南、北、西边界输入量为  $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,降水结束。总之,两次天气过程水汽均以西南向输入、南北向辐合为主。不同的是,14日过程中渤海湾的水汽输送也很重要。

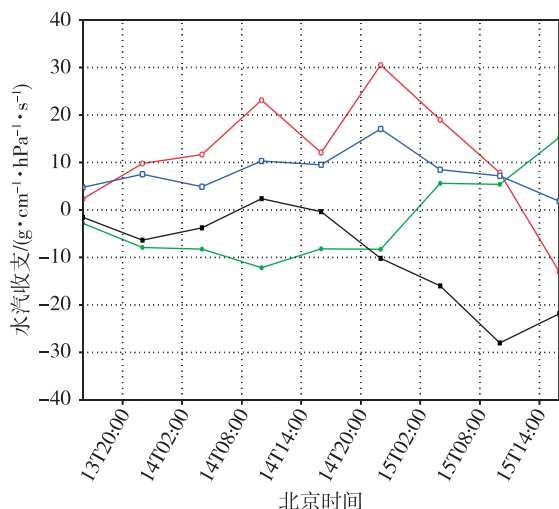


图11 6月13—15日东(黑)、西(蓝)、南(红)、北(绿)边界水汽收支随时间的变化(单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.11 Variation of water vapor budget with time at east (black), west (blue), south (red), north (green) boundaries from 13 to 15 June (units:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

### 4.3 湿位涡诊断分析

湿位涡 MPV 是一个综合反映大气动力、热力和水汽性质的物理量。它不仅表征了大气动力、热力学属性,而且考虑了水汽的作用,它的分布能很好地表征大气对流稳定性和斜压稳定性<sup>[5,7]</sup>。降水系统中湿位涡的变化受到热力强迫和降水质量强迫的双重影响,二者共同作用造成湿位涡的异常<sup>[14]</sup>。湿位涡的大小主要由正压项决定。正值大值区一般与冷空气有关,负值或小的正值代表大气的对流不稳定,一般与不稳定的暖湿空气有关<sup>[15]</sup>。

13日08:00(图12), $34^{\circ}\text{N}$ 附近山东上空出现舌状 MPV 高值异常并配合相对湿度小于40%的干区,2 PVU 等值线位于300 hPa附近。山东低层800 hPa附近出现 MPV 负值区,对流不稳定开始出现。

14:00 高层 MPV 异常区下传,2 PVU 等值线下传至300 hPa以下,干区从对流层中层向北侵入到山东上空。同时,MPV 零线抬升至550 hPa,山东南部低层出现中心为-0.4 PVU的负值中心,说明暖湿空气流入。高层干冷、低层暖湿的空气使整层大气积累了强烈的不稳定能量。20:00 MPV 高值异常区显著收窄,山东上空小于60%的干区侵入到700 hPa,北部450 hPa出现正值中心,低层负异常中心增大至-0.8 PVU,且覆盖整个山东,上下层正负湿位涡之差的增大对流不稳定增强。14日02:00,MPV 高值异常显著减弱,2 PVU 收缩到250 hPa左右,干区范围缩小,山东上空没有明显的干空气,且低层 MPV 负异常减弱。图中显示山东对应大范围的整层上升运动与充沛的水汽,可能主要是通过高空两支急流的叠加区形成强烈的抽吸作用而触发加强的抬升运动。

14日08:00, $32^{\circ}\text{N}$ 与 $39^{\circ}\text{N}$ 高空分别对应舌状 MPV 高值异常,其低层配合两块干区,山东位于两干区中间的比湿大值区,低层存在负 MPV 异常。14:00 高层两 MPV 高值异常区合并堆积,形成宽阔的 MPV 高值异常区,整个异常区跨度达10个纬度以上,同时,2 PVU 下传到370 hPa。两干区合并后导致山东上空600 hPa以上均对应小于40%的干区。山东南侧暖湿空气沿位温等值线抬升,低层 MPV 零线抬高,同时湿度增大,高低层不稳定再次增强。20:00 的 MPV 异常区开始收窄,干区范围扩大,负 MPV 异常区增强并稳定维持,上下层正负湿位涡之差达到最大,明显强于13日。同时,根据位涡理论,正位涡异常区下传会造成等熵面距离拉大,使低层静力稳定度减少,气旋性涡度增大,有利于上升运动的发展。图12e、f可见,08:00—14:00 山东及以北地区400 hPa等熵面距离的增大最明显。14:00后山东逐渐出现整层上升运动,从而触发短时强降水的发生。15日02:00,MPV 收窄成条状,干区减小,山东低层负异常减弱,大气趋于稳定,过程结束。

可见,过程发生时,高层局地的高值 MPV 异常可以指示高层干冷空气的侵入,同时也有利于强天气区的上升运动。低层负 MPV 异常的出现使上下层位涡差增大,促进对流不稳定的发生。14日对流发生前山东地区更宽阔的 MPV 异常与显著下传、对流发生时低层更强的负位涡异常造成其对流不稳定强于13日。另外,等熵面距离的增大,造成更强的上升运动,使强天气更剧烈。

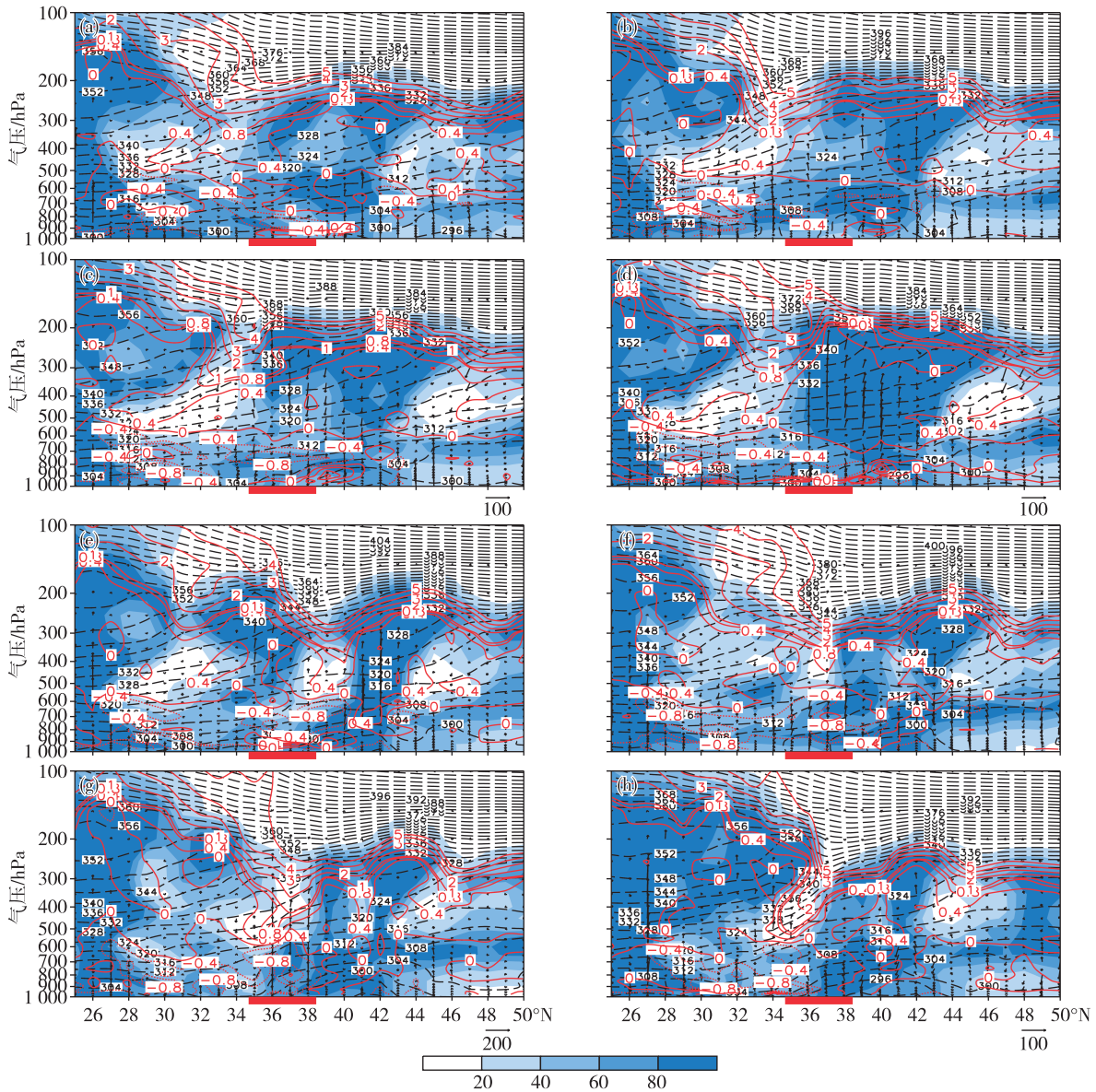


图 12 位温(黑色虚线;单位:K)、相对湿度(填色;单位:%)、垂直风速(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )、湿位涡(红实线;单位:PVU)沿  $118^\circ\text{E}$  的垂直剖面(a.13 日 08:00 BST,b.13 日 14:00 BST,c.13 日 20:00 BST,d.14 日 02:00 BST,e.14 日 08:00 BST,f.14 日 14:00 BST,g.14 日 20:00 BST,h.15 日 02:00 BST)

Fig.12 Vertical profiles of potential temperature(black dashed lines;units:K), relative humidity(shaded areas;units:%), vertical wind speed(units: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ), and moist potential vorticity(red solid lines;units:PVU) along  $118^\circ\text{E}$ (a.08:00 BST 13, b.14:00 BST 13,c.20:00 BST 13,d.02:00 BST 14,e.08:00 BST 14,f.14:00 BST 14,g.20:00 BST 14,h.02:00 BST 15)

### 5 结论

本文对发生在山东地区的大范围强对流天气的环境场、动力热力特征、雷达回波特征及触发机制等进行了分析,得到以下结论:

1)冷涡前部高空槽与地面气旋造成 13 日强天气,高空冷涡和地面气旋造成 14 日强天气。强天气发生时山东均位于高空急流出口区左侧的辐散区,14 日出现高低空急流耦合。

2)造成 13 日强天气过程的中尺度系统为由 2 个  $M_\alpha$ CS 合并而成的  $M_\alpha$ CS 系统,出现明显的飑线。14 日则是由  $M_\beta$ CS 演变而成的  $M_\alpha$ CS 系统。

3)造成强天气的 4 个单体中,2 个为超级单体,其中,14 日的超级单体 D 为强降雹单体。地面自动站显示,辐合线和干线触发 13 日过程,两者重合处,诱发单体强烈发展;干线是超级单体 D 的一个抬升条件。另外,移动路径、高空西北风的出现和地形因素也是导致单体 D 成为强降雹单体持续发展的

原因。

4) 诊断分析表明,两次过程6 h前对流有效位能 $400\sim 1\ 200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 区域与降水落区对应较好,叠加700 hPa相对湿度大于70%的区域,对强对流天气的发生起到一定的预示作用。过程中水汽主要来自鲁西南,降雹区位于水汽通量偏低的区域。两次过程水汽均以西南向输入、南北向辐合为主。不同的是,14日过程中渤海湾的水汽输送也很重要。14日对流发生前高层更宽阔的MPV异常与显著下传、过程发生时高低层正负位涡差的显著加大,造成更强的对流不稳定。

#### 参考文献:

- [1] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980:1-7.
- [2] 郁珍艳,何立富,范广洲,等.华北冷涡背景下强对流天气的基本特征分析[J].热带气象学报,2011,27(1):89-94.
- [3] 吴庆梅,张胜军,刘卓,等.北京一次对流暴雨过程的干冷空气活动及作用[J].高原气象,2015,34(6):1690-1698.doi:10.7522/j.issn,1000-0534.2014.00081.
- [4] 许新田,王楠,刘瑞芳,等.2006年陕西两次强对流冰雹天气过程的对比分析[J].高原气象,2010,29(2):447-460.
- [5] 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):378-405.
- [6] 王立荣,王丽荣,匡顺四,等.对流参数气候特征在短期预报中的应用[J].气象与环境学报,2008,24(5):38-41.
- [7] 夏冠聪,寿绍文.一次梅雨锋暴雨的数值模拟及位涡诊断[J].南京气象学院学报,2007,30(4):538-545.
- [8] 丁一汇.高等天气学[M].北京:气象出版社,2005:315-326,410-411.
- [9] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理与方法[M].4版.北京:气象出版社,2000:48-50,449-453.
- [10] 刘兵,戴泽君,胡振菊,等.张家界多个个例降雹过程对比分析[J].气象,2009,35(7):29-30.
- [11] 陈秋萍,陈其川,冯晋勤,等.“2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J].气象,2015,41(1):25-33.
- [12] Klemp J B. Dynamics of tornadic thunderstorms[J]. Ann Rev Fluid Mech,1987,19:369-402.
- [13] 张婷婷,王培涛,王凤娇.一次长寿命超级单体风暴雷达成回波特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(1):98-103.
- [14] 高守亭,雷霆,周玉淑,等.强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析[J].应用气象学报,2002,13(6):662-670.
- [15] 井喜,高青云,杨静,等.两个不同降水量级的MCC对比分析[J].高原气象,2011,30(2):328-337.