

高荣珍,马艳.台风“巴威”外围致山东半岛西部强降水过程的中尺度特征及环境条件[J].海洋气象学报,2021,41(4):26-35.

GAO Rongzhen, MA Yan. Mesoscale characteristics and environmental conditions of heavy precipitation process occurred in western Shandong Peninsula caused by Typhoon Bavi periphery[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(4): 26-35. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.003 (in Chinese)

台风“巴威”外围致山东半岛西部强降水过程的中尺度特征及环境条件

高荣珍^{1,2,3}, 马艳^{1,2,3}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.青岛市气象灾害防御工程技术研究中心,山东 青岛 266003;3.青岛市气象台,山东 青岛 266003)

摘要: 利用自动气象站观测资料、青岛雷达产品以及“天衍”雷达拼图产品和ERA5再分析资料,对台风“巴威”外围致山东半岛西部强降水过程的中尺度特征及环境条件进行分析。结果表明:1)“巴威”在黄海上期间,其外围暖湿气流与冷空气在山东半岛西部到鲁东南交汇,对流层中低层形成东北—西南向深厚的切变线,高层处于高空急流入口区右侧,低层辐合、高层辐散有利于产生强降水,强降水位于850 hPa切变线及其右侧偏东风一侧。2)前期降水回波先后表现为两条有组织的线形回波带,其形成、发展和移动与850 hPa切变线密切相关;后期切变线右侧偏东风气流中 γ 中尺度辐合不断触发单体新生,青岛即墨境内组合反射率因子 CR 、差分反射率因子 Z_{DR} 、差分相移率 K_{DP} 均显著增大,导致即墨南泉连续两个小时雨强大于 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。3)切变线附近垂直上升运动深厚,850 hPa以下水汽通量辐合较强,为中尺度系统提供了触发条件和水汽条件;850 hPa, θ_{se} 暖舌位置与切变线一致,暖舌中心达352 K,为中尺度系统发生、发展提供了能量条件;对流层中高层弱冷空气对触发强对流天气起到一定作用。4)850 hPa以下水汽通量辐合量值 $\leq -8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域与暴雨区基本吻合,水汽通量辐合中心及垂直上升运动中心越低越有利于出现强降水。

关键词: 台风“巴威”; 山东半岛; 强降水; 台前飚线; 中尺度特征

中图分类号: P458.124 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2021)04-0026-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.04.003

Mesoscale characteristics and environmental conditions of heavy precipitation process occurred in western Shandong Peninsula caused by Typhoon Bavi periphery

GAO Rongzhen^{1,2,3}, MA Yan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 3. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China)

Abstract Based on observational data of automatic meteorological stations, radar products from Qingdao, TIANYAN radar mosaic products, and ERA5 reanalysis data, the mesoscale characteristics and environmental conditions of the heavy precipitation process occurred in the western region of Shandong

收稿日期:2021-05-12; 修订日期:2021-08-04

基金项目:环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201801);青岛市气象局海洋气象研发项目(2019qdxz01)

通信作者:高荣珍,女,博士,高级工程师,主要从事短期天气预报、海雾预报研究,gaorz0@163.com。

peninsula caused by the peripheral airflow of Typhoon Bavi are analyzed. The results are shown as follows.

1) During the northward movement of Bavi over the Yellow Sea, its warm and moist peripheral air and the cold air come from the north converge in the region from west of Shandong Peninsula to the southeast of Shandong province. Thus, a northeast-southwest oriented deep shear line is formed in the middle and lower troposphere, and it is on the right side of the upper-level jet stream entrance area in the upper troposphere. The low-level convergence and high-level divergence are favorable for heavy precipitation, which is located near the shear line at 850 hPa and its rightside easterly wind region. 2) In the early stage, the precipitation echo is characterized by two pre-typhoon squall lines, whose formation, development and movement are closely related to the shear line at 850 hPa. In the later stage, γ mesoscale convergence in easterly flow to the right side of the shear line continuously triggers the formation of convective cells. The composite reflectivity factor CR , differential reflectivity factor Z_{DR} and differential phase shift rate K_{DP} all increase significantly in Jimo, Qingdao, resulting in the hourly rainfall intensity greater than $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ in Nanquan Jimo for two consecutive hours. 3) The vertical ascending motion near the shear line is deep and the convergence of water vapor flux below 850 hPa is strong, which provide dynamic lift condition and abundant water vapor for mesoscale system. At 850 hPa, the position of θ_{se} warm tongue coincides with the shear line, and the maximum value of the warm tongue reaches 352 K, which provides energy conditions for the occurrence and development of mesoscale system. In addition, the weak cold air activity in the middle and upper troposphere plays a certain role in triggering strong convective weather. 4) The area below 850 hPa with water vapor flux convergence magnitude less than or equal to $-8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ is basically consistent with the heavy precipitation region. The lower the convergence center of water vapor flux and the lower the vertical ascending motion center, the more conducive it is for occurrence of heavy precipitation.

Key words Typhoon Bavi; Shandong Peninsula; heavy precipitation; pre-typhoon squall line; mesoscale characteristics

引言

台风是影响山东的重要灾害性天气系统之一,暴雨级以上强降水是其致灾的主要原因之一^[1-6]。由于地理位置偏北,山东每年受台风影响数目较少,平均每年有两个台风影响,不同路径的台风对山东造成的降水影响是不同的^[7]。其中,近海北上类台风指在 125°E 以西沿海地区北上,至 30°N 以北向东北方向移动,登陆辽东半岛或朝鲜半岛的台风。以往统计结果^[7-9]表明,这类台风在山东造成的降水及降水强度一般较弱,暴雨级以上强降水多发生在台风中心路径左侧两经度范围内,即多在山东半岛东部的烟台、威海产生强降水,而距台风中心较远地区的降水量则呈阶梯型递减。曹晓岗等^[10]在研究近海北上台风时也指出,当台风中心距陆地超过 300 km 以上时,对华东沿海地区风雨影响较小。2020 年 8 号(2008 号)台风“巴威”即近海北上类台风,其中心经过 30°N 后基本沿 124.5°E 北上,受其外围影响,山东半岛西部地区产生的降水

量和降水强度显著偏强。此次强降水以对流性降水为主,造成强降水的中尺度对流系统活动特征如何呢?因此,有必要对这次过程进行总结,为近海北上台风外围暴雨预报积累经验,以提高预报此类致灾暴雨天气的能力。

1 资料说明

本文所用资料包括自动气象站观测资料、雷达资料和再分析格点资料。其中,自动气象站观测包括山东省国家级气象观测站和加密自动气象观测站逐小时观测,主要用于降水量和风、温、压变化分析。雷达产品除青岛站双偏振雷达产品外,还包括中国气象局“天衍”网(<http://10.1.64.154/radar3/main>)提供的多部雷达组合反射率因子拼图,拼图中叠加了风廓线雷达以及天气雷达反演的 850 hPa 风场。再分析格点资料为欧洲中期天气预报中心再分析资料第 5 版(ERA5),用于天气形势及物理量诊断分析,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为逐小时。

2 台风路径、降水概况及环流背景

2.1 台风路径

如图 1a 所示,2008 号台风“巴威”于 2020 年 8 月 21 日 20 时(北京时间,下同)在台湾南部偏东 280 km 左右的西太平洋洋面生成,8 月 25 日 20 时北上至东海(中心经纬度为 125.2°E,30.6°N),达到强台风级;26 日 08 时进入黄海南部(中心经纬度为 124.5°E,32.4°N)后沿 124.5°E 北上;26 日 20 时进入黄海中部(中心经纬度为 124.4°E,35.0°N),距离青岛站仍有 380 km;27 日上午在朝鲜北部沿海以台风强度登陆。25 日夜间至 26 日白天,台风始终为强台风级,受其外围影响,山东半岛西部地区出现

强降水。

2.2 降水概况

由图 1b 可见,8 月 25 日 20 时—26 日 20 时山东省中东部地区均出现降水,降水范围较大,暴雨及其以上强降水落区呈东北—西南向带状分布,水平宽度 50~100 km,长度 300 km 左右,具有典型的 β 中尺度特征。烟台北部、青岛中北部、潍坊东部到日照西部,降水量达到暴雨或大暴雨级别,其中国家级气象观测站中即墨降水量最大达 178 mm;加密自动气象观测站中 4 站降水量达到 250 mm 以上,出现在青岛的即墨和平度境内,其中即墨南泉降水量最大达 352 mm。降水空间分布不均匀。

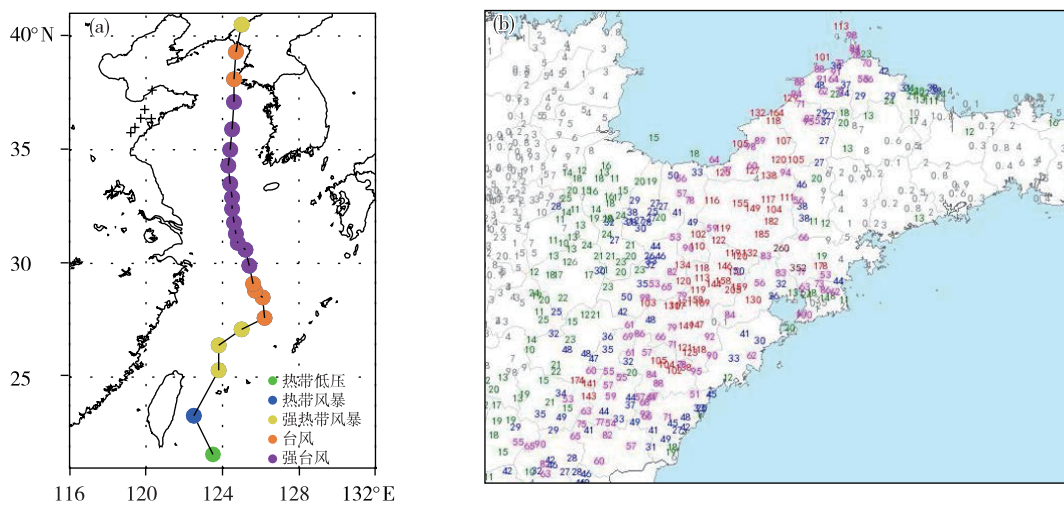


图 1 2008 号台风“巴威”移动路径以及主要站点位置(a;“+”代表站点位置,自上而下分别为龙口、平度、高密、即墨南泉、诸城和五莲)和台风“巴威”外围影响期间山东省中东部地区 24 h(8 月 25 日 20 时—26 日 20 时)累计降水量(单位: mm)分布(b)

Fig.1 Track of Typhoon Bavi (2008) and the location of main stations (a; “+” denote the location of stations, which are Longkou, Pingdu, Gaomi, Nanquan, Zhucheng and Wulian from top to bottom respectively), and distribution of accumulated precipitation (units: mm) in 24 hours (from 20:00 BST 25 to 20:00 BST 26 August) in the central and eastern Shandong province during the influence of Typhoon Bavi (b)

降水可分为两个阶段。第一阶段为 26 日 08 时前,降水主要集中在鲁东南、潍坊东部到烟台北部,由龙口、高密、五莲逐时降水量可见,该阶段降水持续时间较短为 1~2 h,除龙口外降水量总体较小;第二阶段为 26 日 08 时后,降水持续时间多达 6 h 以上,降水强度增大,由平度和即墨南泉降水量演变可见,此阶段青岛地区降水明显增强(图 2a)。此次降水过程中多站出现 1~3 h 短时强降水,92% 以上统计站点最大雨强达 20~50 mm·h⁻¹(图 2b),其中即墨南泉雨强最大为 130 mm·h⁻¹,出现在 26 日 11 时,且 10 时、11 时连续两小时雨强在 100 mm·h⁻¹ 以上,具有较大极端性。

2.3 环流背景

如图 3a 所示,8 月 25 日 20 时,200 hPa 高空西南急流位于 40°N 以北,山东中东部地区处于高空急流入口区右侧,存在辐散^[11]。500 hPa 中纬度 110°E 附近存在经向度较大的低槽,温度槽略落后于高度槽,有利于冷空气向南扩散;副热带高压呈块状,其西界位于 130°E,北界位于 40°N 以北(图 3b)。此时,台风“巴威”仍位于东海,其外围偏东风开始影响山东中东部地区(图 3c),台风处于 500 hPa 低槽和副热带高压之间,两者共同为其创造了“北上”条件。图 3d—f 分别给出了 8 月 26 日 02 时 700 hPa、850 hPa 及 925 hPa 风场和温度场。由各

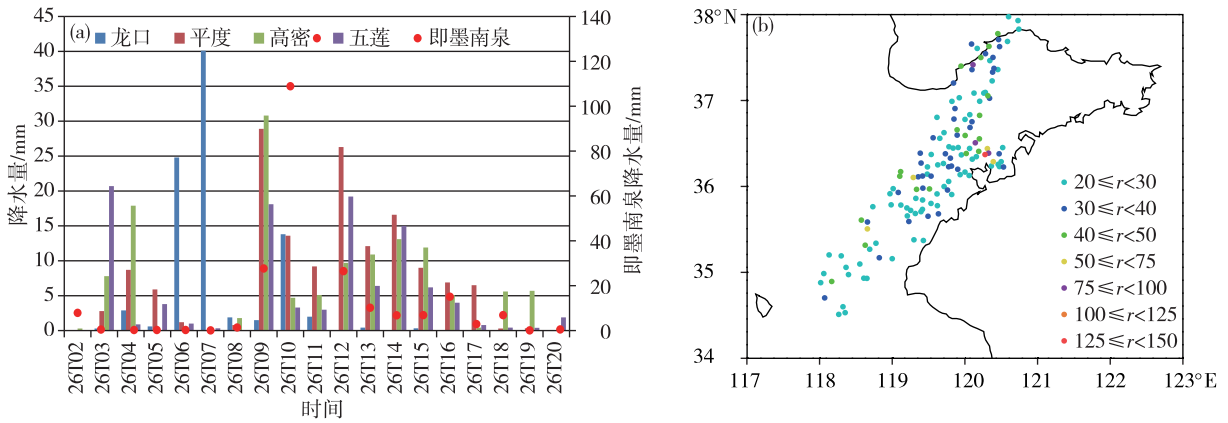


图 2 8 月 26 日 02 时—26 日 20 时龙口、平度、高密、五莲、即墨南泉逐时降水量 (单位: mm) 演变 (a) 和最大雨强 (单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 空间分布 (b)

Fig.2 Hourly precipitation (units: mm) evolution of Longkou, Pingdu, Gaomi, Wulian, and Nanquan in Jimo from 02:00 to 20:00 BST 26 August (a) and the spatial distribution of maximum hourly precipitation intensity (b; units: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)

层风场可见, 山东中西部地区到渤海为东北风, 半岛地区为东到东南风, 在山东到渤海形成一条东北—西南向切变线。该切变线比较深厚, 自 975 hPa

一直伸展到 600 hPa (图略), 随高度向西北倾斜, 具有明显的斜压特征。由各层温度场可见, 切变线附近冷暖空气交汇明显, 温差为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。26 日 08

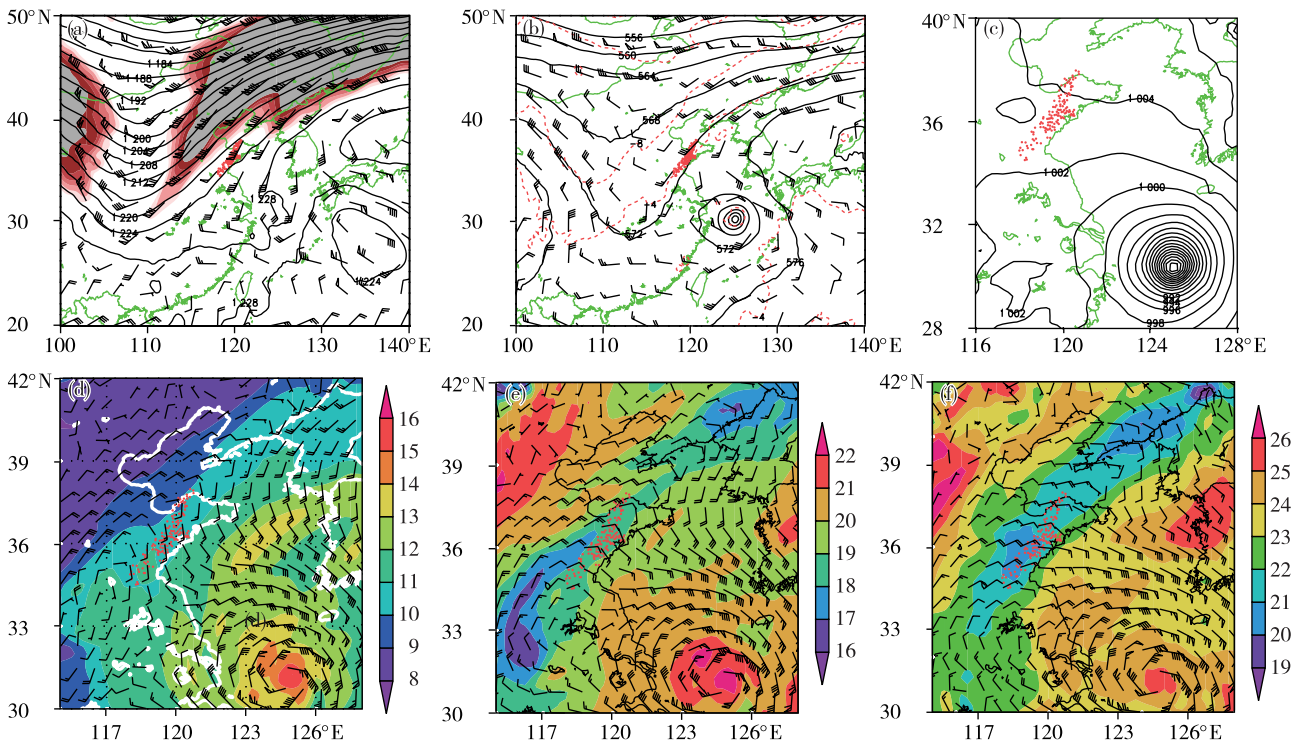


图 3 2020 年 8 月 25 日 20 时 200 hPa 风场 (风矢) 及高度场 (等值线, 单位: dagpm) (a; 阴影区为高空急流区)、500 hPa 风场 (风矢) 及高度场 (黑色等值线, 单位: dagpm) 和温度场 (红色虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) (b)、海平面气压场 (c; 等值线, 单位: hPa) 和 8 月 26 日 02 时 700 hPa (d)、850 hPa (e)、925 hPa (f) 风场 (风矢) 及温度场 (色阶, 单位: $^{\circ}\text{C}$) (各分图中红点所示区域为暴雨落区)

Fig.3 Wind field (wind barb) and geopotential height (isoline, units: dagpm) at 200 hPa (a; shaded area indicates upper-level jet stream), wind field (wind barb) and geopotential height (black isoline, units: dagpm) and temperature (red dashed line, units: $^{\circ}\text{C}$) at 500 hPa (b), and sea level pressure (c; units: hPa) at 20:00 BST 25 August 2020, wind fields (wind barb) and temperature (color scale, units: $^{\circ}\text{C}$) at 700 hPa (d), 850 hPa (e), 925 hPa (f) at 02:00 BST 26 August (the red dots in each sub-picture represent the rainstorm area)

时 850 hPa 切变线位置及强度变化不大,26 日 14 时,随着台风北上,台风外围偏东风明显加强,山东半岛南部海上偏东风达到急流强度,为 $12 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。中低层辐合、高层辐散为此次对流性降水提供了有利的天气形势,强降水与 850 hPa 切变线位置吻合。

3 雷达回波特征

使用青岛双偏振雷达产品以及“天衍”网提供的雷达组合反射率因子拼图产品对此次强降水过程的中尺度特征进行分析,其中后者叠加了 850 hPa 风场(来源于风廓线雷达观测和双偏振雷达反演)。

25 日 23 时,鲁东南及青岛近海先出现弱回波,随后向西北方向移动(图略)。26 日 02 时(图 4a),在 850 hPa 切变线上多个对流单体形成线形回波,第一阶段降水开始。回波继续发展西移,26 日 04

时(图 4b),多个强度大于 50 dBZ 的强回波单体形成有组织的线形回波带,宽度达 50~100 km,长度 300 km 以上,最强反射率因子达到 55 dBZ,烟台北部、潍坊东部、日照、临沂境内均出现短时强降水,降水强度多为 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。26 日 06 时(图 4c),回波带南段强度有所减弱,北段则明显加强,此时线形回波带发展得最为完整,达到成熟阶段。由叠加的风场可见,这条线形回波带与 850 hPa 切变线位置吻合,以平均 $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的速度向西北移动,移向与回波带长轴方向接近垂直,高反射率因子梯度区位于线形回波带后侧,即位于暖湿气流一侧,高反射率因子梯度的形成是由于降水物的尺寸筛选造成的,最大的粒子落在上升气流核附近,更小的粒子落在上升速度核下游更远处^[12]。与此同时,该线形回波带后侧偏东风气流中有弱回波新生。07—08 时(图 4d、e),该新生回波在发展西移

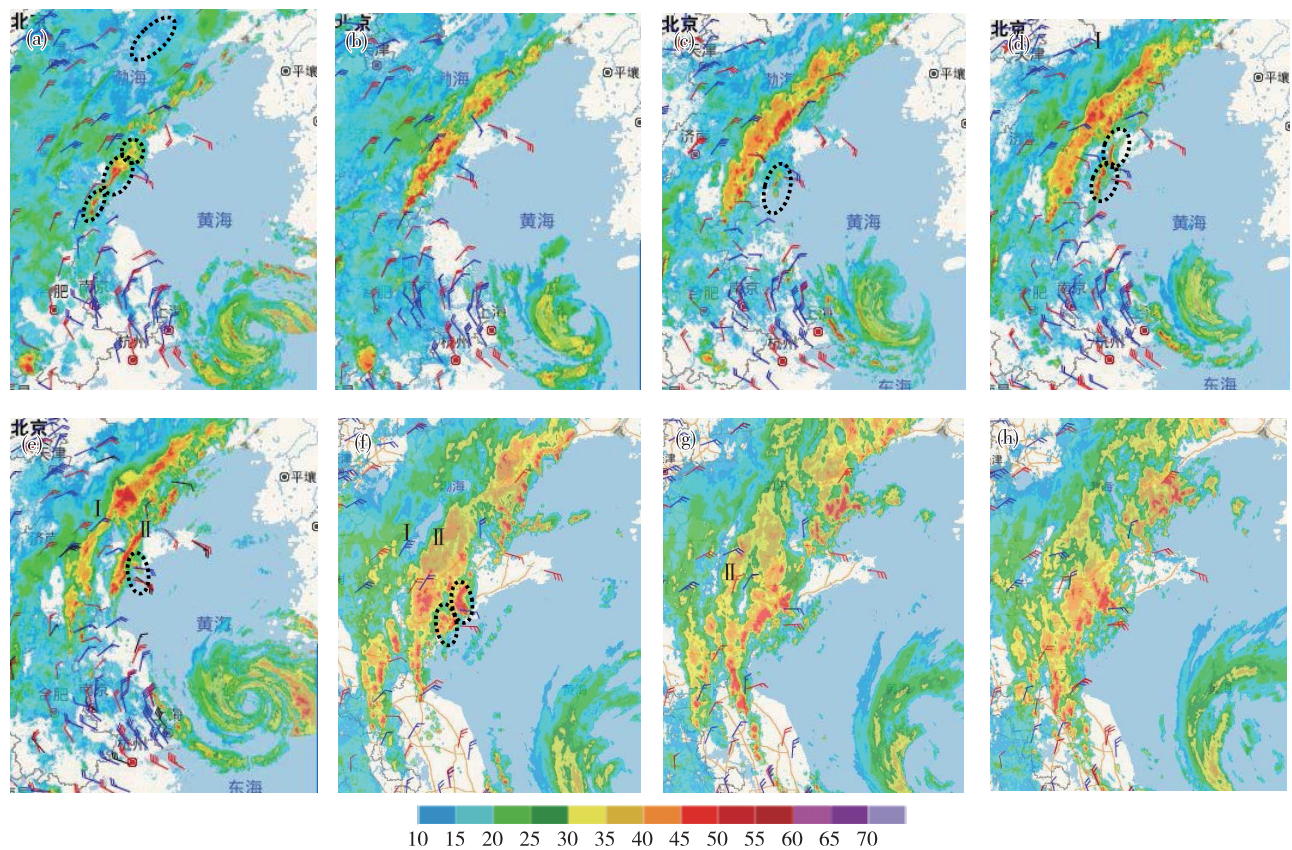


图4 “天衍”组合反射率因子(色阶,单位:dBZ)及 850 hPa 风场(蓝色风矢:风廓线雷达观测,红色风矢:双偏振雷达反演)(a. 26 日 02 时,b. 26 日 04 时,c. 26 日 06 时,d. 26 日 07 时,e. 26 日 08 时,f. 26 日 10 时,g. 26 日 11 时,h. 26 日 12 时;a 中黑色虚线圈表示多个对流单体,c、e 中黑色虚线圈表示新生单体,d、f 中黑色虚线圈分别表示 c、e 中新生单体发展合并后的形态)

Fig.4 The composite reflectivity factor (color scale, units: dBZ) from TIANYAN and wind fields (blue wind barb: observed by wind profiler radar, red wind barb: retrieved by radar) at different time (a. 02:00, b. 04:00, c. 06:00, d. 07:00, e. 08:00, f. 10:00, g. 11:00, h. 12:00; black dotted circles in a represent multiple convective cells, black dotted circles in c and e represent new cells, black dotted circles in d and f represent the merged cells in c and e respectively) on 26 August

过程中与青岛即墨境内的小弓形回波合并形成第二条线形回波带,最强反射率因子仍为 55 dBZ。26 日 08—10 时,第一条回波带移到潍坊以西减弱,第二条回波带移到青岛以西地区后,回波带增宽(图 4e、f)。

上述两条回波带由形态、移速看基本符合台前飏线标准^[13],但强回波过境后气象要素的变化程度不及台前飏线过境般剧烈^[13-16]。06—08 时,第一条

线形回波带过境时,烟台北部以及莱州湾附近气象要素变化趋势基本表现为台前飏线过境时出现的风速增大、温度下降、气压上升等变化(表 1),但国家级气象观测站阵风均未达到 8 级,加密自动气象观测站仅 1 站出现 8 级阵风。第二条回波带经过青岛北部时,平度、莱西附近要素变化具有相似的特征(表 1)。

表 1 线形回波带过境前后各站气象要素变化

Table 1 Changes of meteorological factors at each station before and after the transit of linear echo belt

站点	出现时间	降水量/mm	气温降幅/°C	阵风/(m·s ⁻¹)	气压升幅/hPa
蓬莱	05:00—06:00	10.7	1.2	6.9	0.8
长岛	05:00—06:00	10.5	1.6	7.9	1.6
龙口	05:00—07:00	64.9	3.6	9.5	4.0
招远	06:00—07:00	1.5	1.6	13.9	1.5
莱州	07:00—08:00	0.7	2.5	13.2	—
平度	08:00—09:00	28.9	2.7	10.6	0.8
莱西	08:00—09:00	2.5	1.5	9.9	0.5

图 4e、f 中显示在第二条回波带后侧偏东风气流中,多个强对流单体在青岛境内新生、发展、合并,其中图 4f 右侧虚线圈为即墨境内回波,呈弓形,回波最强时达 60~65 dBZ,回波顶高为 14 km(图略)。由于“列车效应”,强回波持续时间长达 2~3 h(图 4g、h),导致青岛境内 28 站出现大暴雨,其中即墨、平度境内 4 站出现特大暴雨,即墨南泉最大雨强为 135 mm·h⁻¹。第二阶段降水回波与第一阶段显著不同,第一阶段回波为线形,回波的形成、发展及移动和 850 hPa 切变线密切相关,第二阶段回波多在偏东风气流中新生,强回波对青岛中北部影响

最大。这主要是因为青岛处于低空偏东风急流核前部,存在不同尺度的风速辐合。以即墨境内径向速度回波为例,26 日 09:21(图 5a),即墨南泉强降水出现前 20 min,2.4°仰角(高度 2.2 km)出现明显的辐合,最大入流为 -10.5 m·s⁻¹,与周围的速度场构成 γ 中尺度的辐合,逆风区是短时暴雨预报的一个指标^[17]。10:12(图 5b),1.5°仰角(高度 1.5 km)存在明显的 γ 中尺度风速辐合,最大入流为 -16.5 m·s⁻¹。另外,在即墨南泉出现强降水时,差分相移率(K_{DP})以及差分反射率因子(Z_{DR}),各仰角数值均明显大于其他区域,如 0.5°仰角 K_{DP} 最大值达到 4.1

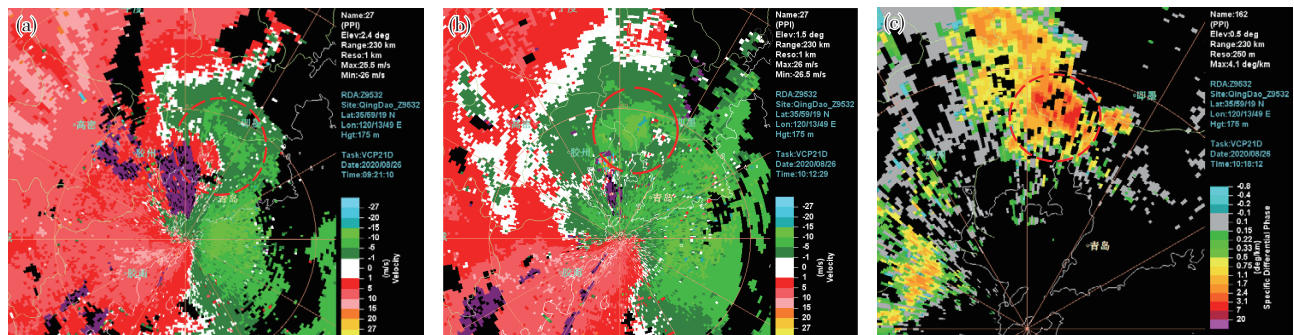


图 5 青岛站双偏振雷达径向速度(a. 09:21 仰角 2.4°, b. 10:12 仰角 1.5°; 色阶,单位:m·s⁻¹)和 K_{DP} (c. 10:18 仰角 0.5°; 色阶,单位:(°)·km⁻¹) (图中所圈之处为即墨南泉附近)

Fig.5 Radial velocity (a. 09:21 with 2.4° elevation, b. 10:12 with 1.5° elevation; color scale, units: m·s⁻¹) and K_{DP} (c. 10:18 with 0.5° elevation; units: (°)·km⁻¹) from Qingdao dual-polarization radar (the circled area denotes Nanquan station in Jimo)

($^{\circ}$) $\cdot\text{km}^{-1}$ (图 5c),表明该区域液态水含量明显高于其他地区,且降水基本以大雨滴为主,是导致雨强显著偏大的原因之一^[18]。

上述分析表明,在中尺度辐合区域,不断有新对流单体生成和发展合并,形成组织性较强的线状回波带或块状回波,回波生成后基本向西北移动,回波后向传播导致山东半岛西部到鲁东南地区出现暴雨、大暴雨。

4 中尺度对流发展的环境条件

4.1 动力与水汽条件

26日02时,第一阶段主要降水开始,850 hPa切变线上从烟台北部到鲁东南存在带状上升运动和水汽通量辐合,其中在烟台北部存在垂直上升运

动以及水汽通量辐合中心,后者量值为 $-10\times 10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 6a)。选取中心附近 37.5°N 做垂直剖面,如图 6b所示, 121°E 附近垂直上升运动自地面一直伸展至200 hPa以上,500~400 hPa上升运动最强为 $-15\times 10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$,700 hPa次中心强度为 $-12\times 10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。水汽通量辐合最强区域也位于 121°E 附近,辐合主要集中在975~700 hPa,其中900~850 hPa最强,量值为 $-10\times 10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 6b),这与孙兴池等^[3]研究登陆北上山东台风暴雨的水汽通量辐合量值相当。烟台北部地区强降水出现在26日05—07时,可见,强降水区垂直上升运动深厚,低层强水汽通量辐合具有一定厚度,为中小尺度系统提供了非常好的动力抬升和水汽条件。

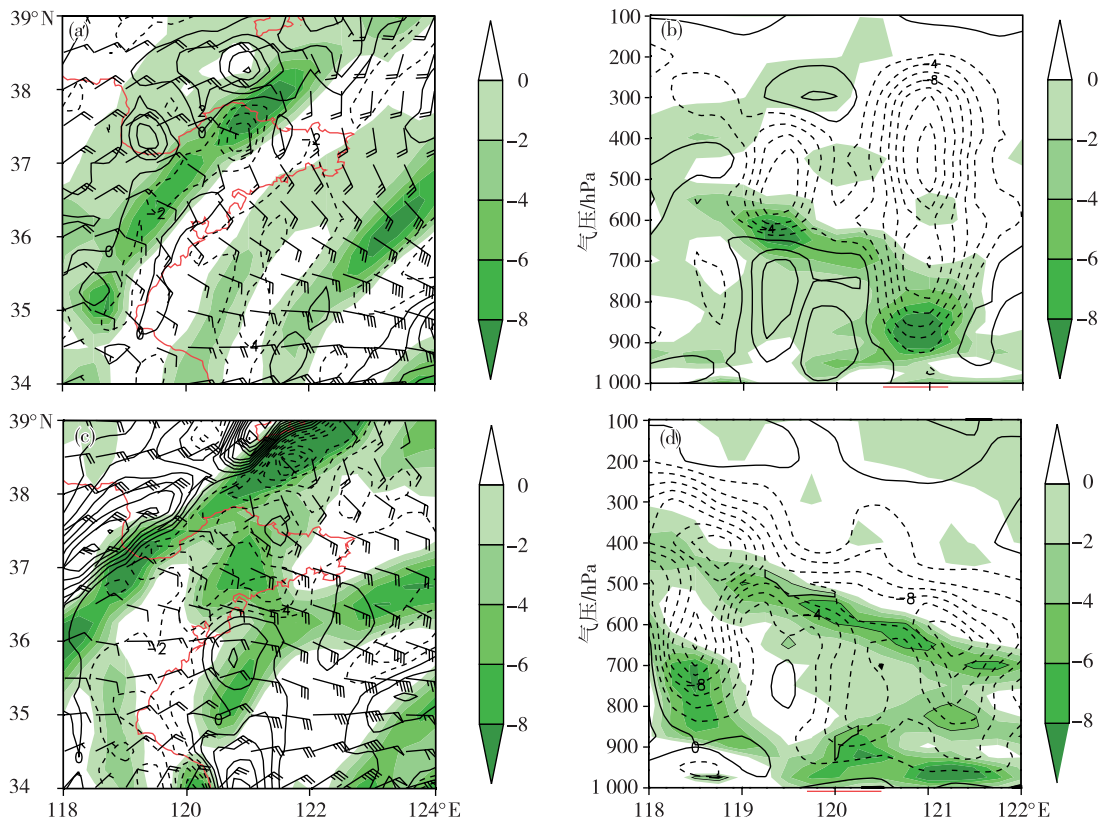


图 6 850 hPa 风场(风矢)、垂直速度(等值线,单位: $10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)、水汽通量散度(色阶区为水汽通量散度 <0 ,单位: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)水平分布(a. 26日02时,c. 26日10时)及后两者垂直分布(b. 26日02时沿 37.5°N 剖面,d. 26日10时沿 36.5°N 剖面;图中横坐标轴红线标注位置即所在纬度暴雨区位置)

Fig.6 Wind fields (wind barb), vertical velocity (isoline, units: $10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$), water vapor flux divergence (color scale denotes water vapor flux divergence less than 0, units: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa (a. 02:00, c. 10:00) and the vertical cross section of vertical velocity and water vapor flux divergence at different time (b. along 37.5°N at 02:00, d. along 36.5°N at 10:00; the red line on the horizontal axis is the latitude of the rainstorm area) on 26 August

第二阶段降水期间垂直上升运动和水汽通量辐合较第一阶段略有不同。26日10时,850 hPa垂直上升运动、水汽通量辐合范围扩大,不再局限于

切变线附近,海上偏东风急流核的存在使得青岛及其以东地区因风速辐合而出现上升运动和水汽通量辐合, $-6\times 10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的垂直上升区域位于青岛

中北部地区(图6c)。选取 36.5°N 做垂直剖面,高密、诸城以东地区上升运动自近地面层伸展到300 hPa附近,水汽通量辐合自近地面到850 hPa,其中最上上升和水汽辐合区位于 120.4°E 附近,与该阶段强降水区吻合,辐合中心位于925 hPa,量值为 $-8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。第二阶段强降水区(青岛地区)垂直上升运动、水汽通量辐合略弱于第一阶段强降水区(烟台北部),但青岛地区的降水强度和降水量明显强于后者。可能的原因是,随着台风北上,偏东风气流明显增强,不断向青岛地区输送高湿高能,使得降水效率高且降水持续时间长;而烟台北部地区强降水与切变线密切相关,当烟台北部由东南风转为北风后降水减弱(图4f),降水持续时间较短。由图6d还可见,沿 36.5°N , 119°E 以西地区水汽通量辐合和垂直上升运动均强于以东地区,但因上升运动中心及水汽辐合中心所在层次均较 119.5°E 以东地区偏高,降水明显偏弱,这表明垂直上升运动及水汽通量辐合层次越低越有利于出现强降水。水汽的辐合主要由低层水汽通量辐合造成,尤其是850 hPa以下的边界层中占很大比例^[19],而垂直上升运动中心越低,越有利于将低层辐合的水汽向上输送;另一方面,水汽通量辐合越低,低层湿度越大,降水粒子下落过程中蒸发越小。

4.2 热力和不稳定条件

青岛站 $t\text{-ln}p$ 图(图略)显示,25日20时,对流有效位能为 $524.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,自由对流高度较高为798.7 hPa, 0°C 层高度为5259 m, $0\sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;26日08时对流有效位能为 870.9

$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,自由对流高度降低为965.7 hPa, 0°C 层高度为5048 m, $0\sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上述参量表明,此次青岛地区强降水是在中等强度垂直风切变条件下产生的,26日白天不稳定能量较25日夜增强,且自由对流高度明显降低,为青岛地区短时强降水提供了有利条件^[12]。

假相当位温(θ_{se})表示大气温度、湿度和气压的综合分布特征,其垂直分布可反映大气稳定度,且 θ_{se} 高值中心或高值舌区有利于强对流的发生^[20-21]。第一阶段降水时,26日02时(图7a),850 hPa θ_{se} 密集带位于莱州湾及烟台北部到鲁西南,呈东北—西南向, θ_{se} 舌区量值达到352 K,位于切变线右侧东南风一侧,东西方向150 km左右 θ_{se} 温差为28 K(图略),表明有较强锋生^[22]。沿 37.5°N ,莱州湾(119.5°E)以西有深厚的冷气团,以东北风为主,而烟台北部(120.5°E 以东)为暖气团,以偏南风为主,锋区随高度明显向西倾斜,即暖湿空气在冷垫上爬升产生降水。烟台北部850 hPa θ_{se} 为352 K,比湿大于 $17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图略),在暖湿空气上方,600~500 hPa为 θ_{se} 340 K低值区。800~600 hPa θ_{se} 随高度下降,表现为上冷、下暖湿的状态,大气具有对流不稳定。同时,该地区大尺度垂直上升运动较强且上升层次深厚,有利于触发对流,将低层的水汽和热量向上输送,产生强降水。可见,此阶段强降水位于 θ_{se} 锋区靠暖舌一侧。26日10时(图7b),850 hPa θ_{se} 密集带位于 119°E 以西(图略),沿 36.5°N ,暴雨区基本以暖气团为主,盛行东到东南风,天气尺度垂直上升运动强度虽不及位于锋区附近的烟台北部,但

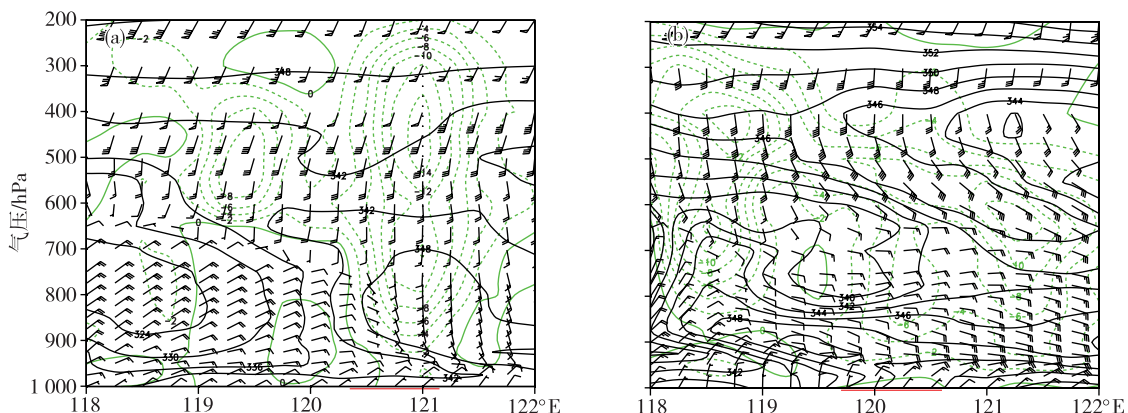


图7 θ_{se} (黑色实线,单位:K)、风场(风矢)以及垂直速度(绿色虚线为垂直速度 <0 ,单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)剖面(a. 2020年8月26日02时沿 37.5°N 剖面,b. 2020年8月26日10时沿 36.5°N 剖面;图中横坐标轴红线标注位置即所在纬度暴雨区位置)

Fig.7 Vertical cross section of θ_{se} (black solid contours, units: K), wind fields (wind barb) and vertical velocity (green dotted contours indicate vertical velocity less than 0, units: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) (a. along 37.5°N at 02:00, b. along 36.5°N at 10:00) on 26 August (the red line on the horizontal axis is the latitude of the rainstorm area)

由 θ_{se} 垂直梯度来看,青岛地区 (120°E) 对流不稳定明显强于烟台北部地区,且对流不稳定层次 ($850\sim 775\text{ hPa}$) 更低,更易触发对流,加之不稳定能量较强,所以 26 日白天青岛中北部地区降水更加强烈。第二阶段强降水区位于 850 hPa θ_{se} 暖舌一侧,且该区域 θ_{se} 随高度下降显著。

4.3 冷空气活动

此次强降水是弱冷空气经渤海到达山东与来自台风“巴威”外围暖湿气流交汇相互作用的结果(图 3d—f)。降水过程中始终有冷空气的参与,一方面干冷空气与暖湿气流交汇在山东境内导致锋生,伴随锋生出现的次级环流上升支可以促进垂直上升运动^[23];另一方面,冷暖空气的对峙形成与地面基本垂直的陡立 θ_{se} 锋区,进一步加强了低层辐合

和上升运动^[24],使降水增强。另外,冷空气活动促使大气处于不稳定层结状态。由 25 日 08 时—26 日 08 时 24 h 变温(图 8a)来看, 36.5°N 强降水区 ($119.5^{\circ}\sim 120.5^{\circ}\text{E}$) 冷空气活动主要位于 850 hPa 以上,负变温中心在 600 hPa 附近,降温幅度为 3°C 左右; 850 hPa 以下为正变温,促使强降水区大气处于不稳定层结状态。强降水区域 ($119.5^{\circ}\sim 120.5^{\circ}\text{E}, 36^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$) 平均的 600 hPa 温度演变(图 8b)表明,冷空气呈阶段性活动,25 日 23 时—26 日 05 时气温从 4.6°C 降至 2.8°C ,对应第一阶段降水;此后有 $1\sim 2\text{ h}$ 反弹,26 日 07—11 时气温再次降低,对应第二阶段降水。两次降温幅度为 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,可见,弱冷空气活动对激发强对流天气起到了一定作用。

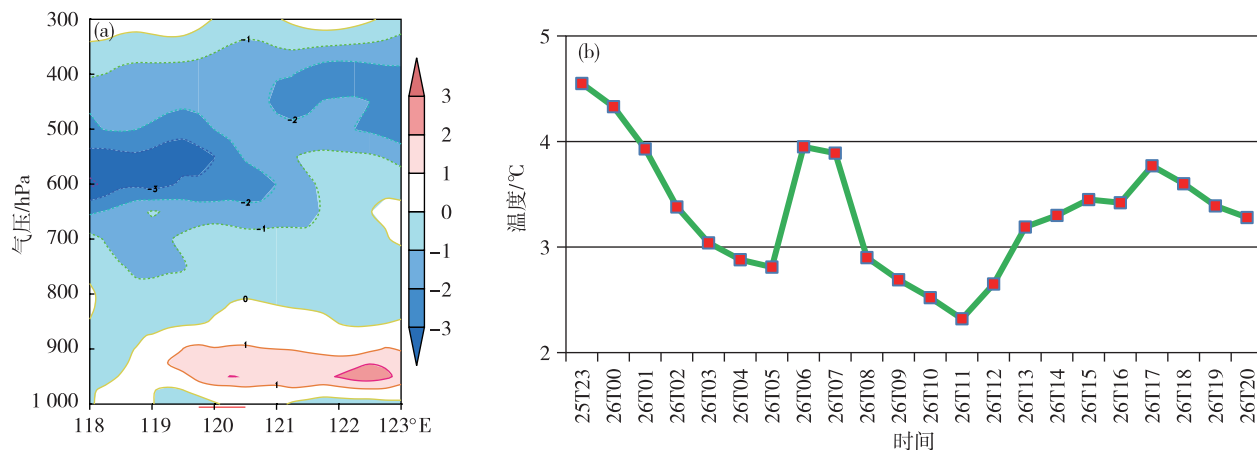


图 8 24 h(25 日 08 时—26 日 08 时)变温(色阶,单位: $^{\circ}\text{C}$)沿 36.5°N 剖面(a;图中横坐标轴红线标注位置即所在纬度暴雨区位置)和强降水区域($119.5^{\circ}\sim 120.5^{\circ}\text{E}, 36^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$)平均的 600 hPa 气温演变(b;单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.8 Vertical cross section of temperature change (color scale, units: $^{\circ}\text{C}$) in 24 h (from 08:00 BST 25 to 08:00 BST 26 August) along 36.5°N (a; the red line on the horizontal axis is the latitude of the rainstorm area) and the evolution of regional average temperature at 600 hPa (b; units: $^{\circ}\text{C}$) in the heavy precipitation area ($119.5^{\circ}\sim 120.5^{\circ}\text{E}, 36^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$)

5 结论

本文对 2008 号台风“巴威”外围影响期间山东半岛西部强降水过程进行了分析,对中纬度地区台风外围线形回波带的形成及所需环境条件有了初步认识。主要结论如下:

1) 台风“巴威”在黄海北上过程中,强度始终为强台风级,其外围暖湿气流与冷空气在山东半岛西部地区交汇,在对流层中低层形成一条东北—西南向深厚的切变线,高层处于高空急流入口区右侧,低层辐合、高层辐散有利于强降水的产生。暴雨及其以上强降水主要位于 850 hPa 切变线附近及其右侧偏东风一侧,呈带状分布,水平宽度 $50\sim 100\text{ km}$,长度 300 km 左右,具有典型的 β 中尺度特征。

2) 雷达回波显示,在中小尺度辐合区域,不断有新对流单体生成、发展和合并。第一阶段降水期间先后形成两条有组织的线形回波带,其形成、发展、移动与 850 hPa 切变线密切相关,第二阶段降水期间回波多在偏东风气流中新生,以团块状为主,强度较强,即墨局地组合反射率因子最强时达到 65 dBZ ,且具有较大的 K_{DP} 值和 Z_{DR} 值,表明液态水含量增加,降水以大雨滴为主,是导致雨强明显增大的原因之一。降水期间雷达回波的后向传播导致山东半岛西部地区出现暴雨、大暴雨和较强短时强降水。

3) 切变线附近垂直上升运动深厚, 850 hPa 以下水汽通量辐合较强,为中小尺度系统活动提供了低层动力抬升条件和充沛的水汽; 850 hPa θ_{se} 在切

变线及偏东风一侧存在暖舌,中心强度为 352 K,对流层中低层存在较强对流不稳定,青岛对流有效位能为 $870.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 0~6 km 存在中等强度垂直风切变,为中小尺度发生、发展和维持提供了能量条件。另外,对流层中高层有弱冷空气活动,降温幅度 $1 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$,对激发强对流天气也起到了一定作用。

4) 850 hPa 及其以下水汽通量辐合值 $\leq -8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域与暴雨落区基本吻合,垂直上升运动中心和水汽通量辐合中心越低越有利于出现强降水。

参考文献:

- [1] 高留喜,杨晓霞,刘畅,等.台风“摩羯”(1814)的路径特点与预报分析[J].海洋气象学报,2019,39(4):108-115.
- [2] 李斌,时晓曦,李欣.台风麦德姆和韦帕对青岛影响对比分析[J].海洋湖沼通报,2016,38(1):45-52.
- [3] 孙兴池,吴炜,孙莎莎.登陆北上山东台风暴雨非对称分布的成因对比分析[J].海洋气象学报,2019,39(3):55-63.
- [4] 孙莎莎,丛春华,于毅.2012年10号台风“达维”强度维持和变化机制分析[J].山东气象,2015,35(2):28-33.
- [5] 谭震,梁梅,薛宇峰,等.1909号超强台风“利奇马”强降水特征的诊断[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(4):450-459.
- [6] 郑怡,杨晓霞,孙晶.台风“温比亚”(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):106-115.
- [7] 丛春华,吴炜,孙莎莎.1949—2012年影响山东地区热带气旋的特征[J].气象与环境学报,2016,32(5):67-73.
- [8] 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.
- [9] 黄昌兴,江敦双,李欣,等.影响山东半岛的两次台风暴雨对比分析[J].气象与环境科学,2015,38(3):70-77.
- [10] 曹晓岗,王慧,傅洁,等.近海北上热带气旋特征及对华东沿海地区影响分析[J].热带气象学报,2014,30(5):861-870.
- [11] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].4版.北京:气象出版社,2007:222-224.
- [12] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:90-93.
- [13] MENG Z Y, ZHANG Y J. On the squall lines preceding land-falling tropical cyclones in China [J]. Mon Wea Rev, 2012,140(2):445-470.
- [14] 唐明晖,王强,叶成志,等.“威马逊”台前飊线环境场及多普勒雷达回波特征[J].气象科技,2016,44(2):275-282.
- [15] 万明,陈云辉,支树林,等.相似路径台风“派比安”(2006)和“威马逊”(2014)前部飊线过程对比分析[J].气象与减灾研究,2015,38(3):43-52.
- [16] 梁维亮,黄荣.“威马逊”台前飊线天气背景成因和雷达预警方法[J].灾害学,2016,31(4):82-87.
- [17] 俞小鼎.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害,2013,32(3):202-209.
- [18] 朱红芳,王东勇,杨祖祥,等.“海葵”台风(1211号)暴雨雨滴谱特征分析[J].暴雨灾害,2020,39(2):167-175.
- [19] 陈红专,张东升,罗植荣.湘北一次暴雨过程的天气学诊断分析[J].暴雨灾害,2009,28(4):373-376.
- [20] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].2版.北京:北京大学出版社,2013:120-122.
- [21] 周雪松,吴炜,孙兴池.山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析[J].气象,2014,40(6):744-753.
- [22] 李改琴,梁海河,王树文,等.台风海棠远距离暴雨中尺度系统特征[J].气象,2007,33(8):17-22.
- [23] 徐亚钦,吴松涛,杨旺文,等.浙江省梅雨锋强降水的锋生及环流特征分析[J].大气科学,2019,43(6):1219-1232.
- [24] 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):387-404.