

高晓梅,李峰,王文波,等.台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析[J].海洋气象学报,2022,42(2):33-43.  
GAO Xiaomei, LI Feng, WANG Wenbo, et al. Multi-scale characteristics of extreme rainstorm caused by Typhoon Lekima in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(2): 33-43. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.004. (in Chinese)

## 台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析

高晓梅<sup>1,2</sup>,李峰<sup>3</sup>,王文波<sup>2</sup>,李晓利<sup>2</sup>,封亚琼<sup>2</sup>,马守强<sup>2</sup>

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.潍坊市气象局,山东 潍坊 261011;3.山东省气象局,山东 济南 250031)

**摘要:** 利用常规气象资料、NCEP FNL  $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析、风廓线雷达、云顶亮温(black-body temperature, TBB)及逐时自动气象站降雨量资料,对2019年8月10—13日由台风“利奇马”引起山东极端暴雨的多尺度特征进行分析。结果表明:(1)此次台风特大暴雨主要为中低纬系统相互作用及台风倒槽本体直接影响产生,其与冷空气密切相关。冷暖空气交汇有利于山东大部地区稳定性降水长时间持续发生。冷空气从低层侵入暖湿气流底部,形成冷垫,使得暖湿气流在冷垫上滑行,加大降水强度。(2)低空急流指数的变化提前1h预示了降水的出现及未来小时雨量的增减,其峰值出现预示着未来3h的强降雨时段,即对强降雨时段的出现和雨强大小有一定的预示性,低空急流向低空的快速扩展对应着短时强降水的开始。可以用于强降水的短时临近预报。(3) $Q$ 矢量散度负值的强弱对于未来6h的雨强大小有较好的指示意义。(4)淄博西河镇出现全省最大降雨量与其朝向东北的喇叭口地形和对流层低层东北风倒灌有关。(5)TBB场能较直观地反映强降水过程中降水的分布和强度。风廓线雷达超低空风场的变化对雨强大小和出现最大雨强的时段有着明显的指示意义。

**关键词:** 台风;低空急流;风场演变;冷空气; $Q$ 矢量散度

**中图分类号:** P458.124 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)02-0033-11

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.004

## Multi-scale characteristics of extreme rainstorm caused by Typhoon Lekima in Shandong

GAO Xiaomei<sup>1,2</sup>, LI Feng<sup>3</sup>, WANG Wenbo<sup>2</sup>, LI Xiaoli<sup>2</sup>, FENG Yaqiong<sup>2</sup>, MA Shouqiang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Weifang Meteorological Bureau, Weifang 261011, China; 3. Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China)

**Abstract** Using conventional meteorological data, NCEP FNL reanalysis data ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), wind profile radar data, black-body temperature (TBB), and hourly precipitation data of automatic meteorological stations, the multi-scale characteristics of the extreme rainstorm caused by Typhoon Lekima from 10 to 13 August 2019 in Shandong are analyzed and the results are as follows. (1) The typhoon heavy rainstorm is mainly caused by the interaction of synoptic systems in the middle and low latitudes as well as the direct influence of the typhoon inverted trough. Moreover, it is closely related to cold air. The intersection of the cold and warm air is conducive to the persistence of the stable precipitation in most parts of Shandong.

收稿日期:2021-09-07; 修订日期:2021-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41775044,41675046);中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-041);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201707);山东省气象局重点课题(2018sdqxz08)

第一作者:高晓梅,女,硕士,正高级工程师,主要从事台风、强对流天气预报研究,wfmeizi@126.com。

通信作者:李峰,男,硕士,高级工程师,主要从事中短期天气研究,2529381371@qq.com。

The cold air intrudes into the bottom of the warm and humid air flow from the lower level to form a cold underlying layer. Besides, with the warm and humid air flow gliding on this cold underlying layer, the rainfall intensity further increases. (2) The change of the low-level jet index indicates the appearance of precipitation and the increase and decrease of the future hourly precipitation an hour in advance, and the peak value indicates the period of heavy rainfall in the next three hours. It is predictive for the appearance of the period of heavy rainfall and the precipitation intensity. The rapid expansion of the low-level jet to the lower level corresponds to the beginning of short-term heavy precipitation. It can be used for the short-term nowcasting of heavy precipitation. (3) The intensity of negative  $Q$ -vector divergence can indicate the rainfall intensity in the next 6 hours. (4) The maximum precipitation of Shandong appears in Xihe Town of Zibo, which is related to the flared terrain towards the northeast and the inflow of northeasterly winds in the lower troposphere. (5) The TBB field can more intuitively reflect the distribution and intensity of precipitation during the rainstorm process. The variation of the wind field in the ultra-low level from the wind profile radar has important indicative significance for the rainfall intensity and the period of the hourly rainfall with maximum intensity.

**Key words** typhoon; low-level jet; evolution of wind field; cold air;  $Q$ -vector divergence

## 引言

中国是世界上受台风影响最严重的国家之一,台风所造成的影响和灾害主要由大风、暴雨和风暴潮引起,并且会衍生出洪涝、山体滑坡、泥石流等地质灾害,易导致重大人员伤亡,造成的经济损失数以亿计,给社会发展造成很大影响<sup>[1]</sup>。因此,深入开展台风强降水研究对预防和减轻台风灾害具有重要意义。近年来许多学者<sup>[2-9]</sup>对台风强降水进行了研究。对于北上台风,当低空急流、冷空气等中纬度天气系统与台风发生相互作用时,台风能获得较强斜压能量,引起环流结构的改变并且可能变性发展,由于降水本身及台风与西风带系统相互作用的复杂性,台风引起强降水的中尺度特征就更为复杂<sup>[10]</sup>。王丽芳等<sup>[11]</sup>对一次秋季台风倒槽大暴雨过程进行了诊断及中尺度分析,发现地面中尺度辐合线是暴雨的关键触发机制,气旋性辐合中心的形成对雨团增幅具有重要作用。叶龙彬等<sup>[12]</sup>对1513号台风“苏迪罗”不同阶段降水的中尺度特征进行了研究,发现台风环流内部的中尺度对流系统的生成和发展是造成暴雨的重要原因,充沛的水汽条件、地形抬升作用、冷空气入侵等条件触发了强降水。任丽等<sup>[13]</sup>对1710号台风“海棠”残余环流北上引发的东北地区北部的大暴雨过程进行中尺度特征分析,发现大暴雨是由中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)活动造成的,每次短时强降水均与云顶亮温(black-body temperature, TBB)低值中心相对应,并滞后1 h左右。刘淑媛等<sup>[14]</sup>分析了

低空急流与暴雨的关系,发现2 km高度以上的低空急流中心早于2 km高度以下超低空急流中心1~2 h出现,强降水的出现与超低层急流风速中心的出现相对应。

山东地处中纬度,东濒太平洋,台风是造成大范围洪涝暴雨灾害的主要天气系统之一。2019年第9号台风“利奇马”造成了山东创纪录的历史最大降水,且降雨持续时间长、强度大、影响范围广。强降雨导致全省大部地区遭受洪涝灾害,据统计,全省灾害受灾人口753.6万人,直接经济损失397.95亿元,是一个历史罕见的台风暴雨个例,对其进行深入分析具有重要意义。本文利用常规气象资料、NCEP FNL  $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、风廓线雷达资料、TBB资料及逐时自动气象站降雨量资料,从低空急流、垂直风廓线的风场演变、冷空气、地形及重要物理量场对2019年8月10—13日由台风“利奇马”引起的山东历史极端暴雨的多尺度特征进行研究,以期得出有指导意义的结论,能对山东的台风强降水预报预警、决策服务及防灾减灾有所裨益。

## 1 台风“利奇马”概况

2019年第9号台风“利奇马”于8月4日14时在菲律宾以东的西北太平洋洋面上生成,于10日01:45在浙江省温岭市城南镇登陆,登陆时中心附近最大风力16级( $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),中心最低气压930 hPa。登陆后“利奇马”向北移动并逐渐减弱,在江苏省连云港市附近海域再次入海,入海后强度略有

加强,于11日20:50在山东省青岛市黄岛区再次登陆,登陆时中心附近最大风力9级( $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),中心最低气压980 hPa。之后“利奇马”继续向北移动,受大陆高压和副热带高压共同影响,造成其在莱州湾南部回旋少动20多个小时,随着副热带高压强度减弱,“利奇马”向北移动进入渤海并进一步减弱为热带低压,在山东半岛回旋后移入渤海,至此“利奇马”对山东影响结束(图1a)。

受台风“利奇马”影响,8月10—13日,山东全省出现大范围极端暴雨天气,全省平均降雨量为

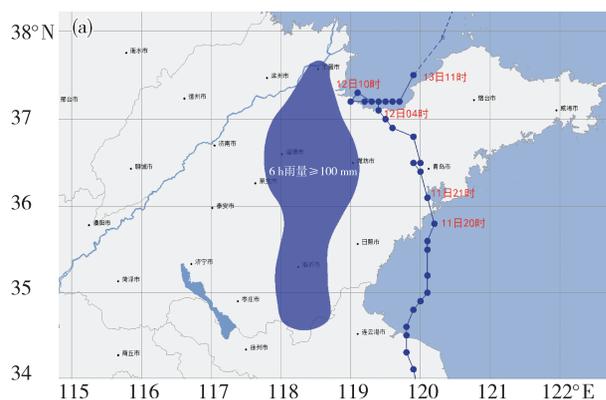
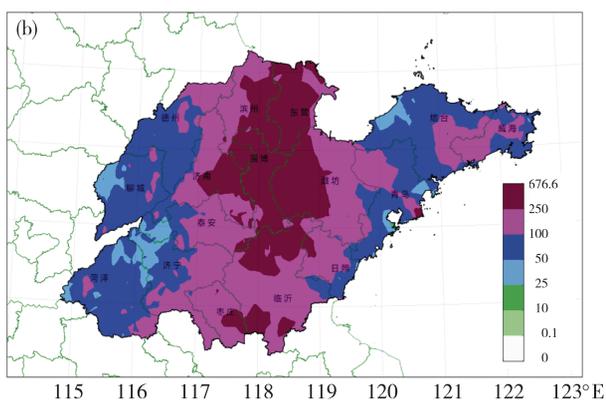


图1 台风“利奇马”路径图(a;蓝色区域为10—11日6 h雨量 $\geq 100\text{ mm}$ 雨区)和2019年8月10日06时—13日14时山东降雨量(b;色阶,单位:mm)分布

Fig.1 Track (a; blue area for 6-h precipitation equal to or greater than 100 mm from 10 to 11 August) of Typhoon Lekima and distribution of precipitation (b; color scale, units: mm) in Shandong from 06:00 BST 10 to 14:00 BST 13 August 2019

160.1 mm,为有气象记录以来首位。其中淄博、东营、滨州、潍坊等地区的平均降雨量超过250 mm,临沂、济南、枣庄等地也超过了200 mm(图1b)。过程最大降雨量为676.6 mm,出现在淄博西河镇,最大雨强为 $67.6\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,出现在潍坊辛寨镇。8月10日和11日全省共有21个国家气象观测站日降雨量突破本站历史极值,其中潍坊临朐最大,11日24小时降雨量达到386.7 mm。“利奇马”给山东带来的强降水持续时间共80 h,为山东省有气象记录以来最长的台风影响时间。



## 2 环流形势分析

2019年8月10日08时台风“利奇马”位于浙江仙居附近(图2a),河套地区有西风槽发展东移,副热带高压位于日本海附近,呈块状,稳定少动。台风“利奇马”受西风槽和副热带高压之间的偏南气流引导向偏北方向移动。另外由于西太平洋海面上还有另一个台风“罗莎”,其北侧的偏东南气流为“利奇马”输送大量水汽和不稳定能量,有利于台风强度加强,10日上午在鲁西地区出现降水。10日下午“利奇马”北移到江苏南部,山东降水范围逐渐增大,鲁中、鲁西北东部开始出现强降水(图略)。10日20时“利奇马”继续北上,西风槽在东移过程中受副热带高压阻挡移动缓慢(图2b),槽前正涡度平流与台风倒槽东侧的正涡度平流叠加,加强了低层的上升运动,山东降雨逐渐加强。10日夜间西风槽与台风倒槽逐渐接近,槽前干冷空气侵入台风倒槽内,冷暖空气交汇触发大量不稳定能量释放,加强了大气不稳定性,导致鲁中、鲁西北及鲁南等地区降水都达100 mm以上。因此第一阶段(10日08

时—11日08时)山东强降水主要是西风槽与台风倒槽即中低纬系统相互作用造成的。此阶段也是“利奇马”影响山东的主要强降水时段,强降水落区位于鲁南、鲁中至鲁西北东部一带,淄博、潍坊、东营、临沂等地都出现了6 h 100 mm以上的强降水,其中潍坊辛寨站出现了全省最大小时雨量 $67.6\text{ mm}$ 的短时强降水。11日08时西风槽北缩至 $40^\circ\text{N}$ 附近(图2c),台风在副热带高压西侧的偏南气流引导下继续北上到达江苏盐城附近,山东此时主要受台风本体环流影响。因此第二阶段(11日白天)山东强降水是受台风倒槽本体直接影响产生的,强降水主要集中在台风倒槽北侧的鲁中及鲁西北东部地区,小时雨量大多在10~30 mm之间。11日20时(图2d),台风在青岛市黄岛区二次登陆,其西南侧有干冷空气持续侵入致使台风逐渐减弱,干冷空气逐渐取代暖湿空气在山东占主导地位。12日08时之后大陆高压脊东移逐渐与海上副热带高压产生“两高”对峙(图略),致使引导气流变弱,台风深入“两高”之间在莱州湾附近缓慢回旋。13日08时台风强度减弱为热带低压级别并逐渐移出莱州湾(图

略),山东降水结束。因此第三阶段(11日夜间之后)降水是由登陆后的台风影响山东产生的。此阶段山东降水强度迅速减弱,主要存在以下原因:一

是干冷空气持续侵入造成台风减弱;二是台风登陆山东后由于下垫面摩擦等作用致使台风强度减弱;三是无充沛水汽输送到山东,这也是其关键因素。

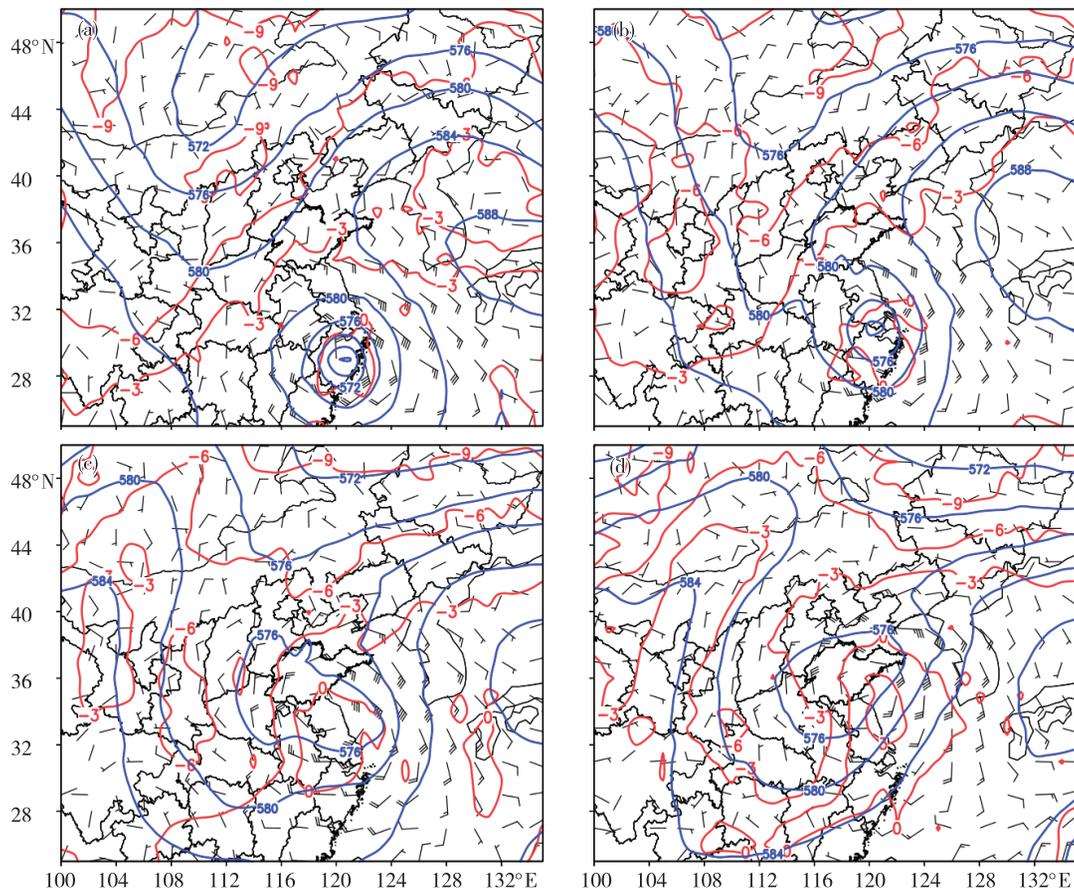


图2 2019年8月10日08时(a)、10日20时(b)、11日08时(c)和11日20时(d)500 hPa高空图叠加850 hPa风场  
Fig.2 Synoptic chart at 500 hPa overlaid with wind field at 850 hPa at 08:00 BST 10 (a), 20:00 BST 10 (b), 08:00 BST 11 (c), and 20:00 BST 11 (d) August 2019

### 3 中尺度特征与物理量场分析

#### 3.1 水汽条件分析

充沛的水汽是强降雨形成的重要条件<sup>[15]</sup>。由济南探空图(图略)可知,8月10日08时—11日20时暖云层厚度在5 100~5 700 m之间,11日08时达到最厚,为5 700 m,暖云层厚度越大,降水效率越高,越有利于此次强降雨的产生。同时大气可降水量(precipitable water, PW)也在43~56 mm之间,其中10日20时—11日20时PW都在50 mm以上,说明水汽条件充沛。分析850 hPa比湿场(图3)可以看出,10日08时 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的比湿高值区在鲁西地区,随着台风“利奇马”北上和东南急流的不断输送,850 hPa以下整层湿度都在80%以上,自10日20时至12日山东一直处在 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的高比湿区内。这说明自20时开始山东上空就集聚了充沛

水汽。

水汽通量散度揭示了水汽输送在某个区域集中及集中的程度。850 hPa水汽通量散度场显示10日08时鲁西处于水汽通量弱辐合区内,10日20时(图3a)鲁中、鲁南、鲁西北东部都处在水汽通量辐合区内,为此次大暴雨的产生提供了充足的水汽条件。其中鲁南地区处在 $-9 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽辐合中心。11日02时(图3b)鲁西北东部、鲁中至鲁南一线处在强烈的水汽辐合带内,中心最大水汽通量散度为 $-12 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。11日08时(图3c)上述水汽辐合区南北向范围继续扩大,强度继续增强,中心位于鲁西北东部和鲁中西部,中心最大水汽通量散度达到 $-18 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。此时段恰为冷暖空气交汇的时段,淄博、潍坊、东营、临沂等地都出现了6 h 100 mm以上的强降雨,此阶段也是“利奇马”影响山

东的主要强降水时段。11日14时(图3d)水汽通量辐合区范围缩小,但鲁西北东部和鲁中地区仍处

在水汽通量辐合区内,但强度减小。对应此阶段上述区域的降水强度同时减小,强降水过程逐渐减弱。

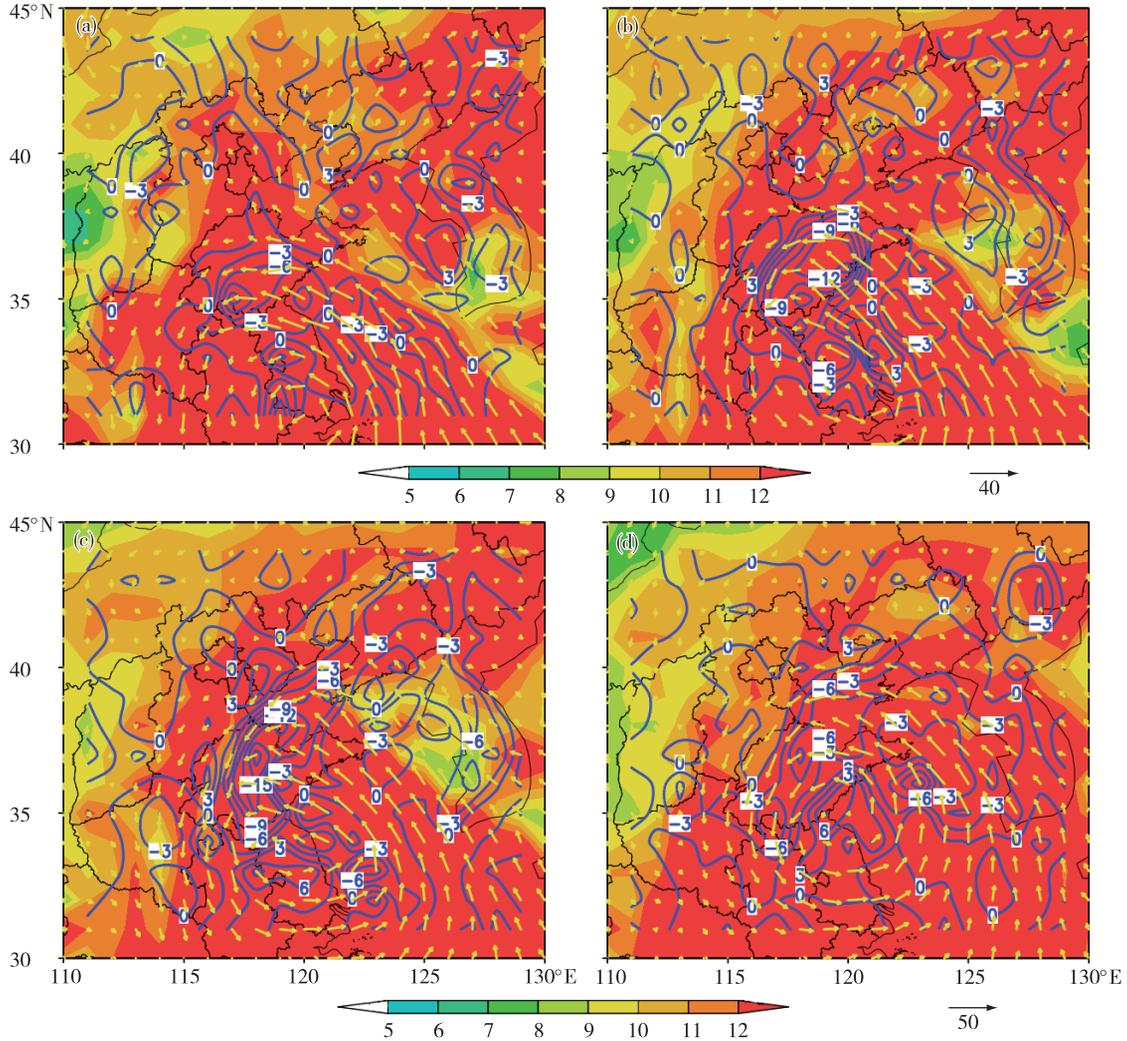


图3 2019年8月10日20时(a)和11日02时(b)、08时(c)、14时(d)850 hPa比湿(色阶,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、水汽通量散度(实线,单位: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )和风场(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig.3 Specific humidity (color scale, units:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), vapor flux divergence (solid line, units:  $10^{-7}\text{g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), and wind field (wind barb, units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa at 20:00 BST 10 (a), 02:00 BST 11 (b), 08:00 BST 11 (c), and 14:00 BST 11 (d) August 2019

### 3.2 低空急流的作用

低空急流是一支较强的风速带,能够把大量水汽和不安定能量向降水区输送。由10—11日低空风场可以看出,山东上空东南气流比较旺盛,低层850 hPa(图2b)显示10日20时青岛站的东南风风速高达 $24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,随着低空东南急流源源不断向山东输送水汽,有利于对流不稳定层结的建立和维持,触发不稳定能量释放,产生强降水。刘淑媛等<sup>[14]</sup>定义了一个低空急流指数 $I(V/D)$ ,它是

(单位: $\text{km}$ )的比值定量地表示低空急流向下扩展的程度和风速脉动的强度。为了更清楚地显示此次台风暴雨强度的变化趋势与低空急流的关系,本文也参照该方法,以 $1.5\text{km}$ 以下边界层急流中心的最大风速 $V$ (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速在该小时中的最低位置 $D$ (单位: $\text{km}$ )的比值定义低空急流指数 $I(V/D)$ 来分析此次大暴雨过程<sup>[16]</sup>。

由低空急流指数和雨强的时间演变(图4)可见,全省台风过程出现最大降雨量的淄博西河镇在2019年8月10日09—10时、10—11时无降水,11—12时的小时雨量达到 $10.4\text{mm}$ ,对应的09—10

时低空急流指数 1 h 的脉动从 0 增大到 10—11 时的 6.2, 即低空急流指数提前 1 h 预示了降水的出现。11—12 时指数 1 h 脉动突降为 0, 对应 12—13 时的小时降雨量为 0, 12—13 时指数 1 h 脉动增大到 7.4, 对应的 13—14 时又出现降水。后面的时段中小时雨量与低空急流指数的变化依然如此, 虽然 11 日 06—07 时低空急流指数较小而小时降雨量却很大, 这与此阶段正是中低纬系统相互作用造成强降水的时段有关, 但其低空急流指数增大或减小的变化与未来 1 h 雨强增强或减弱是一致的, 即低空急流指数的增大或减小能提前 1 h 预示未来雨强的增大或减小。另外, 图 4 显示低空急流指数出现的 2 次峰值, 分别是 11 日 02 时的 91.9、05 时的 98.3, 分别对应着 03—05 时、06—08 时未来 3 h 降雨量超过 60 mm 的强降雨时段, 且指数  $I$  的峰值出现预示着未来 3 h 将出现强降水。这说明每次强降水的发生, 都对应低空急流指数提前 1 h 的突然加强。综上, 分析低空急流指数的增大或减小可以提前 1 h 预判未来是否出现降水及未来降雨的强弱程度, 其峰值的出现能预示未来出现强降雨的时段。

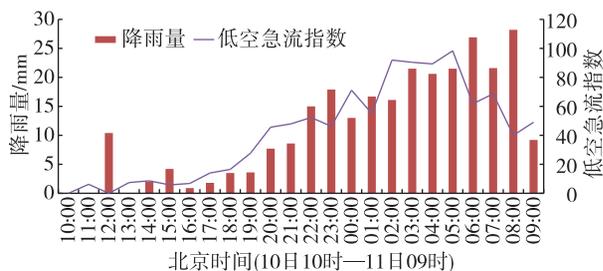


图4 2019年8月10日10时—11日09时低空急流指数及淄博西河镇每小时降雨量(单位:mm)变化

Fig.4 Evolution of low-level jet index and hourly precipitation (units: mm) in Xihe Town of Zibo from 10:00 BST 10 to 09:00 BST 11 August 2019

### 3.3 风廓线雷达风场演变特征和冷空气与强降水的关系

对流层风廓线雷达的探测高度较高, 其资料可以显示出天气系统连续详细的变化过程, 能清楚地揭示对流层和边界层风场特征。此次强降水过程潍坊地区西部县市(青州、临朐、昌乐)的平均降雨量都超过了 300 mm, 而且全省的最大小时雨量出现在临朐县辛寨镇, 为 67.6 mm, 昌乐县城南和青州市仁河水库分别出现了 634.9 mm 和 618.4 mm 的特大暴雨(降雨量全省排名第 2 和第 3), 因此利用潍坊的对流层风廓线雷达(119.18°E, 36.77°N)对此次天气的垂直风廓线结构进行分析, 研究台风降水

发生前后的风场演变特征。观测站点以临朐县辛寨镇(118.36°E, 36.23°N)、昌乐县城南(118.49°E, 36.39°N)、青州市仁河水库(118.15°E, 36.32°N)的小时降雨量(图 5a)与潍坊风廓线雷达的风场结构进行对比分析(图 5b)。此次过程潍坊全市的强降雨时段主要出现在 8 月 10 日下午到夜间, 降雨于 10 日 01:20 开始, 开始为弱降雨。降雨出现之前, 即 10 日 01:20 之前, 低空 2.5 km 以下风场以东到东南风为主(图 5b), 风向随高度呈逆时针旋转, 风速不大, 即低空有弱冷平流, 高空为一致的偏南风; 01:20 降雨开始时的风场从低空到高空都为一致的东南风, 特别是 1~2 km 之间的风向由偏东风顺转为东南风, 和 1 km 以下风向一致, 此时低空无冷平流, 但中空并无急流存在, 因此雨强很小。由此可知, 低空无冷平流是此次弱降雨出现的指标。该风场结构一直持续到 12 时。自 02 时开始, 风廓线雷达探测高度从 5~6 km 逐渐增大到 8 km 以上。12 时之后, 探测高度突增到 12 km 以上, 雷达探测高度的突然增大预示着强降水的发生。与之对应, 由 3 个观测站的小时雨量(图 5a)可以看出, 从 12 时到 13 时降雨量明显骤增, 辛寨、城南、仁河水库的小时降雨量分别由 12 时的 19.2、17.8、7.6 mm 骤增到 13 时的 32.1、31.1、15.7 mm。这是由于降水骤增后大气高层的水汽含量增大, 使得折射率结构常数变大, 从而使风廓线雷达的探测高度增加<sup>[17]</sup>。地面降水出现后探测高度逐渐升高, 当降雨强度骤增后探测高度更有明显的升高。而与降水骤增相对应的, 13 时在 1.5~3.5 km 之间有 12~16 m·s<sup>-1</sup> 的东南风速带出现, 即中低空东南风急流建立。风场垂直结构也发生变化, 近地面层 600 m 以下风场的风向发生突变, 由 12 时的东南风转为 13 时的偏北风, 0.6~1.5 km 为北到东北风, 随时间增加, 偏北风逐渐顺转为东北风, 出现了东北风冷垫, 同时风速加大, 东南风急流继续加强。辛寨站 15—16 时出现了 67.6 mm、城南 17—18 时出现了 61.5 mm 的短时强降水(图 5a), 该时段正与 16 m·s<sup>-1</sup> 以上的东南风急流加强相对应, 因此短时强降水的产生与东南风急流的加强密切相关。可以说, 中层东南暖湿气流在近地面层东北风建立的冷垫上滑行, 引发强烈的短时强降水。该强降水时段为潍坊出现明显短时强降水的第一阶段。

10 日 21 时之后, 2~5 km 高度之间东南风速增强至 20 m·s<sup>-1</sup>, 20 m·s<sup>-1</sup> 的急流中心下降至 1.5 km 高度, 到 11 日 01 时的短时强降水开始时更是降到

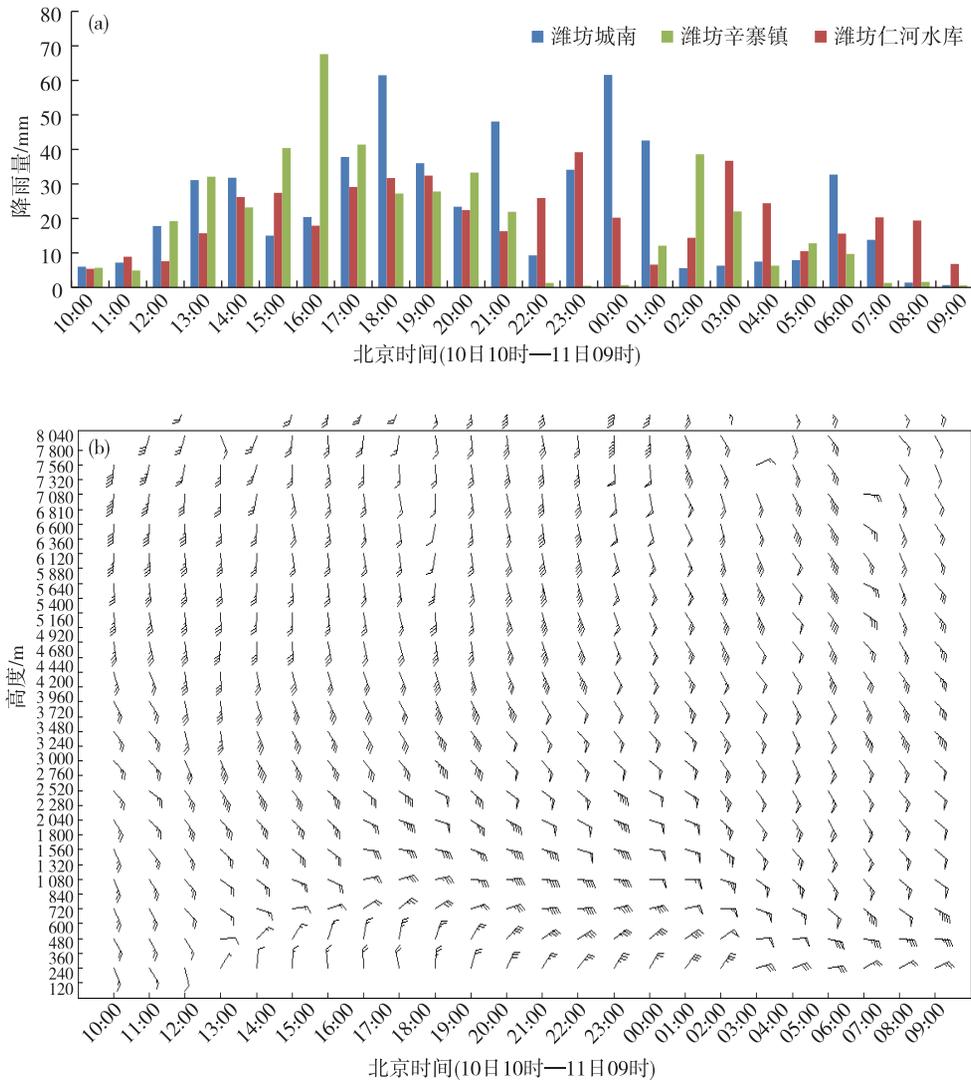


图 5 2019 年 8 月 10 日 10 时—11 日 09 时潍坊城南、仁河水库、辛寨镇降雨量 (a, 单位: mm) 分布和潍坊风廓线雷达垂直风场演变 (b)

Fig.5 Distribution of precipitation (a, units: mm) in Chengnan, Renhe Reservoir, and Xinzhai Town of Weifang and evolution of vertical wind field (b) from Weifang wind profile radar from 10:00 BST 10 to 09:00 BST 11 August 2019

1 km 高度附近,与潍坊第二阶段的短时强降水时段相吻合,说明低空急流向低空的快速扩展对应着短时强降水的开始。而 20 时之后,高空槽持续东移南压,槽后冷空气向南侵入叠加在台风倒槽东侧的东南暖湿平流之上,潍坊正处在冷暖平流交界处,其上空对流不稳定层结进一步增强。同时由于低层暖湿平流维持时间较长,造成水汽和能量的大量积聚,随着冷暖空气逐渐交汇触发了不稳定能量的急剧释放,造成短时强降水的产生。此强降水时段正是中低纬系统相结合造成的强降水。而 11 日 04 时之后一直到 19 时,高低空风速一直较强,但低空 500~1 500 m 之间由东北风转为东到东南风后,雨强逐渐减弱,减弱的原因是由于近地面层暖平流减

弱。因此近地面层暖平流的强弱变化影响着此次强降雨的雨强大小。而风廓线雷达超低空风场的变化对雨强大小有着明显的指示意义。11 日 20 时之后,从低空到高空的风速迅速减小,强降水趋于结束。

分析发现冷空气在此次山东台风强降水过程中起着重要作用。2019 年 8 月 10—11 日在贝加尔湖以东 108°E 附近有一发展加强的高空槽(图 2),温度槽落后于高空槽,槽后携带的冷空气与台风倒槽北侧的东南暖湿气流相互作用,为山东大部带来较强降水。高空 500 hPa 图(图 2c)显示 11 日 08 时冷空气主体侵入到台风倒槽内,山东大暴雨区正处在台风倒槽西侧的冷暖空气汇合处,冷暖空气交汇

使得上述地区动力辐合和上升运动得以加强和维持,有利于大暴雨的产生。另外,鲁中地区在10日下午低层已经由南风转东北风,这从潍坊风廓线雷达的风场(图5b)可以看出。潍坊风廓线雷达显示10日12时的南风在13时转为东北风,与之对应,根据前面所述,潍坊辛寨和城南12—13时有了小时雨量的骤增(图5a),特大暴雨站点东营史口的小时降雨量也由12时的3.1 mm明显骤增到13时的38.7 mm(图略),即低层南风转东北风是降雨量骤增的标志。10日下午至夜间,随着时间的推移,冷空气增强,东北风继续加大,中层较强的偏南暖湿气流在低层东北风形成明显的冷垫上滑行,对特大暴雨区短时强降水的增强起了很大作用。综上,此次台风特大暴雨过程与冷空气密切相关。强降水期间冷空气一直有两个冷平流中心,一个在中高层,一个在低层。中高层冷空气强度更强范围更大些,代表冷空气主体主要从中高层侵入,与台风倒槽北部的暖湿气流逐渐交汇,有利于山东大部地区稳定性降水长时间持续发生。另外一股中纬度冷空气从低层不断侵入台风倒槽暖湿气流底部,与来自东部海面上的偏东风气流在台风倒槽顶部汇合,形成东北风冷垫,使得台风倒槽中的暖湿气流在冷垫上滑行,加大了山东中部、西北部等地的降水强度。随着冷空气主体和较强冷平流南下侵入台风倒槽本体,低层冷空气又不断侵入暖湿气流底部,冷暖空气在山东特大暴雨区交汇使得台风倒槽北部的动力辐合和上升运动得以加强和维持,导致暴雨过程显著加强,有利于该区域特大暴雨发生。

### 3.4 地形与强降水的关系

此次台风暴雨过程全省最大降雨量出现在淄博西河镇,为676.6 mm。分析发现,地形在此次特大暴雨过程中起了较大作用。淄博西河镇地处鲁中山区,系丘陵地带,东部(山脉为桃山、北黄岐顶)、西部(山脉为虎山、黑山、禹王山)和南部(山脉为老山顶、西黑山、紫罗山)三面环山,北部地形平坦,处在地势较低处,因而形成了南高北低的地势,是典型的朝向东北方向的喇叭口地形(图6)。由前面分析可知,低层850 hPa以下风场的风向在10日13时发生突变(图5b),由东南风转为偏北风,20时以后偏北风逐渐顺转为东北风,低层为偏北风的时段西河镇的小时降雨量不大,但当低层北风20时以后转为东北风时,西河镇的小时降雨量迅速增大(图4),这与对流层低层(850 hPa以下)东北风倒灌有关。当东北风朝着喇叭口地形

灌进时,由于西部、东部和南部山脉的阻挡,形成地形的收缩作用,致使淄博西河镇辐合上升运动加强和降水量的增幅,导致特大暴雨的发生。通过以上分析发现,有利的系统配置,加上周边地形的共同作用,造成了淄博西河镇出现山东最大台风暴雨点。

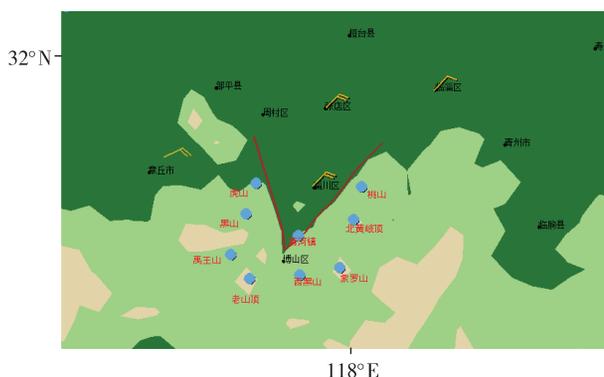


图6 淄博西河镇地形图叠加8月10日23时风场  
Fig.6 Topographic map overlaid with wind field at 23:00 BST 10 August 2019 in Xihe Town of Zibo

### 3.5 非地转湿 $Q$ 矢量散度诊断

HOSKINS et al.<sup>[18]</sup>在1978年提出 $Q$ 矢量概念,并推导出以准地转 $Q$ 矢量散度作为唯一强迫项的准地转 $X$ 方程。 $Q$ 矢量散度是非地转上升运动的强迫机制,可用于垂直运动的诊断<sup>[19-23]</sup>。图7是700 hPa  $Q$ 矢量散度分布图,可以看出,“利奇马”影响期间,2019年11月08时 $Q$ 矢量散度辐合区的密集带位于山东中部、西北部的南北方向上(图7b),鲁中和鲁西北东部有较强辐合上升带,山东半岛为较弱辐散区。图中显示台风倒槽环流内并非是一致的辐合上升运动,而是具有辐合(负值区)、辐散(正值区)并存的中尺度水平运动场。另外,分析700 hPa的 $Q$ 矢量散度场发现 $Q$ 矢量散度负值中心区域随时间的演变和台风强降水分布有较好相关性。台风“利奇马”影响山东期间,2019年8月10日08时(图7a), $Q$ 矢量散度负值中心在山东西部,从西北方向移入山东境内,强度非常强,最小值达 $-2.0 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 以下,对应山东西部在聊城出现了6 h降水量为139 mm的强降水;随着时间演变, $Q$ 矢量散度负值区逐渐东移,雨强在负值中心东侧附近明显增强,出现了小时雨量达30 mm以上的强降雨。11日08时, $Q$ 矢量散度负值区到达山东中部和西北部地区(图7b),辐合强度最大,达到 $-4.5 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 以下。对应山东中部西侧、西北部及南部出现强降水。11日14时, $Q$ 矢量散度大的辐合区仍位于山东中部西侧和西北部(图

7c), 其中淄博西河镇、东营广饶在 11 日 08—14 时分别出现 6 h 雨量为 119.7 mm、111 mm 的强降雨。20 时(图 7d),  $Q$  矢量散度负值区东移到山东半岛, 负值减小, 强度减弱, 为山东半岛带来弱降水。13 日 11 时

(图略), 随着  $Q$  矢量散度负值区域逐渐移向东北入海, 降雨也随之逐渐减弱结束。由此可见,  $Q$  矢量散度负值的强弱对于未来 6 h 的雨强大小有较好的指示意义。

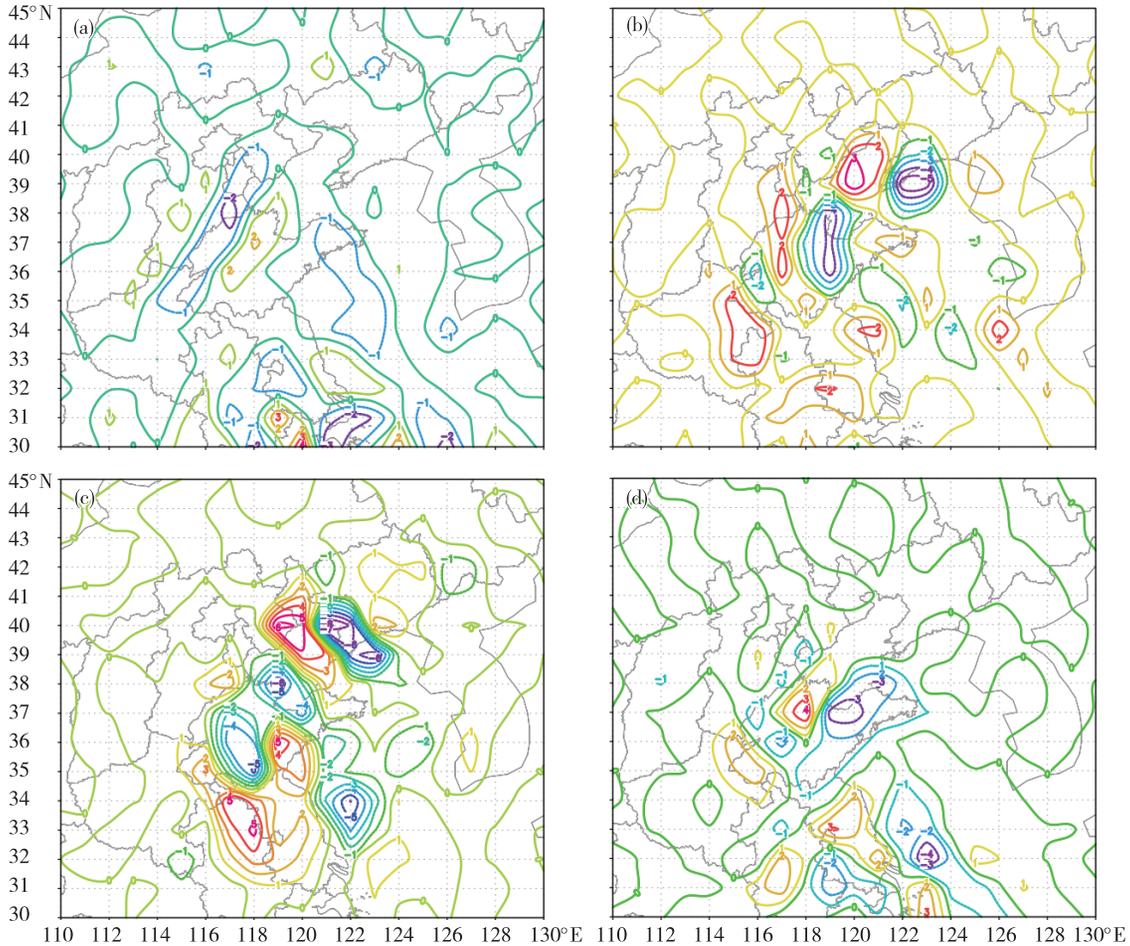


图7 2019年8月10—11日700 hPa  $Q$  矢量散度(a. 10日08时, b. 11日08时, c. 11日14时, d. 11日20时;单位:  $10^{-15} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ) 分布

Fig.7 Distribution of  $Q$ -vector divergence (units:  $10^{-15} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ) at 700 hPa at 08:00 BST 10 (a), 08:00 BST 11 (b), 14:00 BST 11 (c), and 20:00 BST 11 (d) August 2019

#### 4 卫星云图 TBB 分析

云顶亮温(TBB)能够很好地反映强天气系统的发生、发展和消亡。利用TBB<sup>[24]</sup>亮温等值线的分布及梯度特征,可以推断对流层上空垂直方向上风的分布,从而诊断出可能伴随的天气现象和暴雨落区。TBB的密集预示着云团的进一步发展,稀疏时预示着降水逐渐结束<sup>[25-26]</sup>。在云区,TBB温度越低,表明云顶高度越高,对流越旺盛。

对于山东此次特大暴雨过程,从FY-2C红外TBB云图(图8)上可以看到,2019年8月10日14时(图8a),台风倒槽结构清晰,在鲁中和鲁南有弱的强降雨云团开始产生,与中纬度冷空气侵入到

台风倒槽内的位置相对应,外围螺旋云系延伸至鲁中至鲁南一带,该区域有亮温值 $< -50^\circ\text{C}$ 的对流云团,对应开始出现强降雨。同时西风槽前云系东移鲁西北一带。10日20时(图8b),受引导气流影响,台风向北移动,台风螺旋雨带随之向北推进,中心云系已达到鲁中至鲁西北东部。随着西风槽向东南移动,对流云团处于冷暖空气交汇处的鲁中和鲁西北东部地区。11日02时(图8c),对流云团增强,鲁中和鲁西北东部的对流云团最为强盛,该区域都处在亮温值 $< -50^\circ\text{C}$ 的区域内,该区域与等 $\theta_{se}$ 密集带、 $Q$ 矢量散度辐合区、低层正涡度及上升运动中心相对应,低空正涡度的不断加强和辐合上升运动的发展进一步促进对流云团

的加强发展和维持,这正与10日夜间鲁中和鲁西北东部出现的持续不断的短时强降水相对应。同时在鲁中北部不断有小的对流云团产生并不断发展,说明此时强降水处在冷暖空气交汇的时段内,台风螺旋云系和西风槽云系逐渐靠近合并,冷空气侵入台风倒槽内,对流发展旺盛,降水效率高,鲁中和鲁西北东部持续出现小时雨量超过30 mm的短时强降水。11日08时(图8d),对流云团发展到鼎盛阶段,强度增强,范围增大,山东除半岛和鲁西以外其他地区都处在云顶亮温低值区内,在鲁南出现大片亮温值 $<-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的对流云团,并不断发展,此时冷空气主体侵入台风倒槽内,引起山

东大范围持续时间长的降水。11日14时(图8e),亮温值 $<-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的对流云团呈南北向分布,位于鲁中、鲁南和鲁西北东部,且水汽随引导气流北移,引起该区域上空不稳定能量得到释放,引发强降水。11日20时(图8f),强云团减弱北移,TBB继续减弱,山东大部TBB在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,强降水基本结束。综上,此次对流云团的稳定维持、发展并缓慢移动,意味着西风槽和台风倒槽之间的相互作用及其加强发展的程度。因此,TBB场能较直观地反映强降水过程中降水的分布和强度,对流云团TBB值降低,降水强度加大,山东强降水中心处于TBB低值中心北侧。

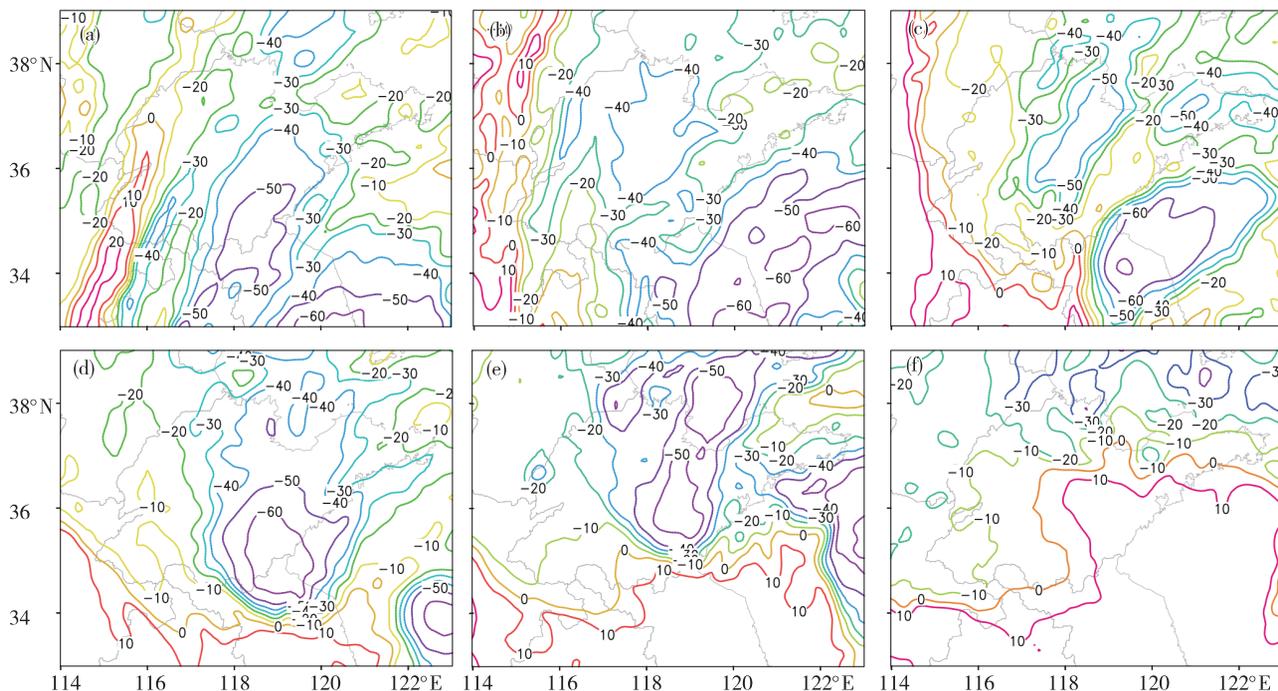


图8 2019年8月10—11日云顶亮温(a. 10日14时,b. 10日20时,c. 11日02时,d. 11日08时,e. 11日14时,f. 11日20时;单位: $^{\circ}\text{C}$ )

Fig.8 Black-body temperature (TBB) (units:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 14:00 BST 10 (a), 20:00 BST 10 (b), 02:00 BST 11 (c), 08:00 BST 11 (d), 14:00 BST 11 (e), and 20:00 BST 11 (f) August 2019

## 5 结论

(1) 台风“利奇马”影响山东引起降水发生有三个阶段。第一阶段(10日08时—11日08时)强降水主要由高空槽与台风倒槽即中低纬系统相互作用造成。第二阶段(11日白天)强降水是受台风倒槽本体直接影响产生的。第三阶段(11日夜间之后)降水是由登陆后的台风影响山东产生的,干冷空气持续侵入造成台风减弱是山东降水强度迅速减弱的关键,另外,与下垫面摩擦、无强水汽输送等有关。山东特大暴雨主要在第一阶段和第二阶段

产生。

(2) 此次台风特大暴雨与两股冷空气密切相关。冷空气与台风倒槽北部的暖湿气流逐渐交汇,使其动力辐合和上升运动得以加强和维持,有利于山东大部地区稳定性降水长时间持续发生。冷空气在850 hPa以下低层不断侵入暖湿气流底部,形成东北风冷垫,使得暖湿气流在冷垫上滑行,加大降水强度,有利于特大暴雨的发生。

(3) 低空急流指数提前1 h预示了降水的出现,它的增大或减小也提前1 h预示着未来小时雨量的增大或减小,增大程度与雨强成正比。另外,其峰

值出现预示着未来 3 h 的强降雨时段, 即对强降雨时段的出现和雨强大小有一定的预示性, 可以用于强降雨的短时临近预报。

(4) 此次台风暴雨过程全省最大降雨量出现在淄博西河镇, 这与其朝向东北的喇叭口地形和对流层低层(850 hPa 以下) 东北风倒灌有关。 $Q$  矢量散度负值的强弱对于未来 6 h 的雨强大小有较好的指示意义。

(5) 卫星云图 TBB 场能较直观地反映强降水过程中降水的分布和强度, 山东强降水中心处于 TBB 低值中心北侧。风廓线雷达超低空风场的变化对雨强大小有着明显的指示意义。近地面层风向发生突变, 由东南风转北风的时段与潍坊出现全省最大小时雨强的时段是一致的。低空急流向低空的快速扩展对应着短时强降雨的开始。近地面层暖平流的强弱变化影响着此次强降雨的雨强大小。

#### 参考文献:

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西北太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 491.
- [2] 官晓军, 潘宁, 黄待静, 等. 基于降水极端预报指数的福建台风极端降水预报研究[J]. 气象学报, 2021, 79(3): 414-427.
- [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] 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 19-28.
- [5] 周雪松, 孙兴池. 台风“达维”(1210)非对称性结构及其对风雨分布的影响分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 58-64.
- [6] 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 717-727.
- [7] 高晓梅, 江静, 刘畅, 等. 近 67 a 影响山东台风频数的变化特征及其与若干气候因子的关系[J]. 气象科学, 2018, 38(6): 749-758.
- [8] 高留喜, 刘畅, 丛春华, 等. 两个相似路径台风造成山东降水明显差异的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(4): 60-68.
- [9] 周淑玲, 王科, 闫淑莲, 等. 山东半岛两次秋季台风远距离大暴雨的特征分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(2): 84-93.
- [10] 秦思, 姚美, 任福民, 等. 强台风“菲特”(1323)极端降水研究进展[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(1): 11-18.
- [11] 王丽芳, 张雪蓉, 廖一帆, 等. 一次秋季台风倒槽大暴雨过程诊断及中尺度分析[J]. 气象科学, 2021, 41(2): 209-220.
- [12] 叶龙彬, 谌芸, 李晟祺, 等. 1513 号台风“苏迪罗”不同阶段降水的中尺度特征分析[J]. 热带气象学报, 2018, 34(3): 371-382.
- [13] 任丽, 赵玲, 马国忠, 等. 台风残涡北上引发东北地区北部大暴雨的中尺度特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1671-1683.
- [14] 刘淑媛, 郑永光, 陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨的关系[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 285-290.
- [15] 许映龙, 韩桂荣, 麻素红, 等. 1109 号超强台风“梅花”预报误差分析及思考[J]. 气象, 2011, 37(10): 1196-1205.
- [16] 曹春燕, 江崑, 孙向明. 一次大暴雨过程低空急流脉动与强降水关系分析[J]. 气象, 2006, 32(6): 102-106.
- [17] LONFAT M, MARKS F D Jr, CHEN S S. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) microwave imager: a global perspective[J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(7): 1645-1660.
- [18] HOSKINS B J, DRAGHICI I, DAVIES H C. A new look at the  $\omega$ -equation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1978, 104(439): 31-38.
- [19] 姚秀萍, 于玉斌. 完全  $Q$  矢量的引入及其诊断分析[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 208-213.
- [20] 张兴旺. 湿  $Q$  矢量表达式及其应用[J]. 气象, 1998, 24(8): 3-7.
- [21] KEYSER D, REEDER M J, REED R J. A generalization of Petterssen's frontogenesis function and its relation to the forcing of vertical motion[J]. Mon Wea Rev, 1988, 116(3): 762-781.
- [22] SDNDERS F, HOSKINS B J. An easy method for estimation of  $Q$ -vectors from weather maps[J]. Wea Forecasting, 1990, 5(2): 346-353.
- [23] 李英, 陈联寿, 雷小途. 变性台风 Winnie (9711) 环流中的锋生现象[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 629-639.
- [24] 杨璐, 费建芳, 黄小刚, 等. 西北太平洋环境风垂直切变和热带气旋移动对涡旋内对流非对称分布影响的特征分析[J]. 气象学报, 2017, 75(6): 943-954.
- [25] 何平, 朱小燕, 阮征, 等. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 465-470.
- [26] 陈渭民. 卫星气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 18.