

王楠喻,王雪,娄盼星,等. 台风“利奇马”引发山东强降水成因分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(1): 119–128.  
WANG Nanyu, WANG Xue, LOU Panxing, et al. Analysis on causes of heavy precipitation by Typhoon LEKIMA in Shandong[J].  
Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(1): 119–128. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096–3599.2021.01.012. (in Chinese)

## 台风“利奇马”引发山东强降水成因分析

王楠喻<sup>1</sup>, 王雪<sup>2,3</sup>, 娄盼星<sup>4</sup>, 林曲凤<sup>1</sup>, 吴彦洁<sup>5</sup>, 秦璐<sup>6</sup>, 孙世军<sup>7</sup>

(1. 烟台市气象局, 山东 烟台 264000; 2. 北京玖天气象科技有限公司, 北京 100081; 3. 华风气象传媒集团有限责任公司, 北京 100081; 4. 陕西省气象科学研究所, 陕西 西安 710016; 5. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室和青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266100; 6. 烟台市牟平区气象局, 山东 烟台 264100; 7. 山东省电力公司应急管理中心, 山东 济南 250001)

**摘要:** 利用常规气象观测资料、台风最佳路径数据集资料、地面-卫星-雷达三源融合逐小时降水产品( $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ )、FY-2G 云顶亮温( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ )、NCEP/NCAR FNL( $1^\circ \times 1^\circ$ )再分析资料, 对2019年9号台风“利奇马”影响期间2019年8月11日发生的山东特大暴雨过程进行分析。结果表明: 1) 强降水主要受台风倒槽的影响, 台风倒槽在山东中部暴雨区长时间稳定维持, 台风东侧的低空东南急流把东海水汽和能量向暴雨区输送, 配合200 hPa高空急流的“抽吸作用”, 在暴雨区上空辐合抬升, 造成具有中尺度特征的暴雨。2) 强降水区存在的正涡度区伴随强烈的上升运动、低层辐合、高层辐散的结构和次级环流耦合发展, 为此次台风暴雨过程提供了有利的动力条件, 而且动力条件的演变在此次台风暴雨过程中的作用比热力条件更重要。3) 850 hPa水汽通量辐合中心, 以及相匹配的在垂直方向的强上升运动区, 对强降水落区和雨强有一定的指示意义。

**关键词:** 台风“利奇马”; 暴雨; 台风倒槽; 降水成因

**中图分类号:** P457.8; P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096–3599(2021)01–0119–10  
**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096–3599.2021.01.012

## Analysis on causes of heavy precipitation by Typhoon LEKIMA in Shandong

WANG Nanyu<sup>1</sup>, WANG Xue<sup>2,3</sup>, LOU Panxing<sup>4</sup>, LIN Qufeng<sup>1</sup>,  
WU Yanjie<sup>5</sup>, QIN Lu<sup>6</sup>, SUN Shijun<sup>7</sup>

(1. Yantai Meteorological Bureau, Yantai 264000, China; 2. Beijing JiuTian Meteorology Science & Technology Co., Ltd, Beijing 100081, China; 3. Huafeng Meteorological Media Group Co., Ltd, Beijing 100081, China; 4. Shaanxi Institute of Meteorological Sciences, Xi'an 710016, China; 5. Key Laboratory of Physical Oceanography (Ocean University of China) of Ministry of Education and Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266100, China; 6. Muping Meteorological Bureau of Yantai, Yantai 264100, China; 7. Emergency Management Center of Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

**Abstract** Based on conventional observation data, typhoon best-track dataset, gauge-satellite-radar combined hourly precipitation products ( $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ), black-body temperature from FY-2G satellite ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ), and NCEP/NCAR FNL reanalysis data ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), the heavy rainstorm in Shandong on 11 August 2019 triggered by Typhoon LEKIMA is analyzed. The results are listed as follows. 1) The heavy

收稿日期: 2020-04-21; 修订日期: 2020-07-10

基金项目: 山东省气象局科研项目(SDYBY2018-09); 国家自然科学基金项目(41975065); 国网2019年度科技项目(520613180060)

第一作者: 王楠喻, 女, 硕士, 工程师, 主要从事天气预报业务及海气相互作用相关研究, wangnanyu@stu.ouc.edu.cn。

通信作者: 林曲凤, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事天气预报业务及相关研究, 1070559518@qq.com。

precipitation is mainly affected by typhoon inverted trough that maintains for a long time in the rainstorm area in the central part of Shandong. The low-level southeast jet on the east side of the typhoon transports the water vapor and energy in the north of East China Sea to the rainstorm area, and combining with the pumping action of upper-level jet stream at 200 hPa, the water vapor converges and is lifted over the rainstorm area, which jointly result in the rainstorm with mesoscale characteristics. 2) The positive vorticity area in the rainstorm area is accompanied with strong ascending motion by the configuration of low-level convergence and high-level divergence and the coupling of secondary circulation, which provides favorable dynamic conditions for the typhoon rainstorm, and the dynamic conditions are more important than thermal conditions for the rainstorm process. 3) The water vapor flux convergence center at 850 hPa and corresponding vertical area of strong ascending motion have a good indication for predicting the heavy precipitation area and intensity.

**Key words** Typhoon LEKIMA; heavy precipitation; typhoon inverted trough; cause of precipitation

## 引言

山东地处中国东部沿海,台风是比较严重的气象灾害之一<sup>[1]</sup>。台风造成的暴雨一方面可以给山东带来充沛的降水,另一方面,台风造成的降水一般情况下雨强较大且降水时间集中,容易引发洪涝等次生灾害,可对经济、农业等方面造成严重的损失<sup>[2-5]</sup>。所以,对山东台风暴雨的研究一直是山东气象工作者关注的重点。高晓梅等<sup>[1]</sup>统计出1949—2015年影响山东的台风个数有112个,平均每年有1.7个台风影响山东。影响山东的台风路径类型中北上类<sup>[1-2]</sup>较多,孙兴池等<sup>[6]</sup>对登陆北上影响山东的两个路径相似、落区不同的0421号台风“海马”和0509号台风“麦莎”进行对比分析得出,中纬度系统可以对影响山东的台风暴雨落区造成影响,西风槽和副热带高压可以影响降水落区的分布。高留喜等<sup>[7]</sup>对北上影响山东的1814号台风“摩羯”的路径预报进行研究,结果表明:环流形势分析是准确预报台风路径的一个重要前提,大陆高压增强是环流形势调整的显著信号。郑怡等<sup>[8]</sup>对登陆北上型的1818号台风“温比亚”造成山东的强降水进行分析认为,850 hPa水汽通量辐合强度对暴雨落区的形态和位置有一定的指示作用。以上结论在山东台风预报业务工作中起到了很好的参考作用。

近几年极端天气频发,台风“摩羯”(1814)、“温比亚”(1818)和“利奇马”(1909),都给山东造成了严重的气象灾害<sup>[9-13]</sup>,产生了巨大的经济损失,其中2019年9号(以下简称“1909号”)台风“利奇马”为山东有气象记录以来影响时间最长<sup>[14]</sup>的台风。“利奇马”外围云系自8月10日06时开始影响山东并

产生降雨,至13日14时降雨结束,持续时间长达80 h。山东省内各地应急管理局、农业农村局等部门通过初步灾情调查表明,“利奇马”影响期间,强降雨及台风环流造成的大风导致大范围的农作物倒伏,设施农业大棚和房屋倒塌,渤海内所有航线停航,对经济造成巨大损失,给人民生活带来极大不便。

1909号台风“利奇马”虽然对山东的影响时间长,但较强降水时间主要出现在8月11日,其造成的强降雨强度和落区预报难度大,给灾害天气预警工作增加了难度。本文通过对2019年8月10日20时—11日20时期间“利奇马”对山东所形成的特大暴雨进行初步分析,重点探讨此时段强降雨的强度和落区出现的可能原因,希望可以为今后台风暴雨预报提供思路,提高此类暴雨的预报水平。

## 1 资料与方法

文中所描述的时间均为北京时(BST),数据时间若为世界时,计算绘图处理为北京时。所用的方法主要为诊断分析方法。

所采用的资料分别为中国气象局提供的台风最佳路径数据集(tcdata.typhoon.org.cn)<sup>[15]</sup>,国家级地面气象观测站逐小时降水数据,国家气象信息中心的“地面-卫星-雷达三源融合逐小时降水产品”(水平分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ,该数据精度高于任何单一来源降水产品的精度<sup>[16-18]</sup>),中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)FY-2G气象卫星9210格式中水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的逐小时平均相当黑体温度(black-body temperature, TBB)和NCEP/NCAR FNL( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ )再分析数据。

## 2 台风“利奇马”路径及山东强降水概况

1909 号台风“利奇马”于 8 月 4 日下午在西北太平洋生成(图 1a),生成后在副热带高压(以下简称“副高”)南侧东南气流引导下向西北方向移动,逐渐向我国东部沿海靠近,10 日 01:45(北京时,下同)前后在浙江温岭城南镇沿海登陆,登陆时强度为超强台风级(中心附近最大风速  $52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,中心

气压 930 hPa)。“利奇马”登陆后转向偏北方向移动,经过浙江和江苏两省后移入黄海,并继续北上,于 11 日 20:50 前后以热带风暴级在山东青岛黄岛区附近再次登陆,登陆后向北偏西方向移动,强度继续减弱,先后途经青岛、潍坊等地后移入渤海,在渤海移动缓慢,强度继续减弱,于 12 日 11 时左右在山东潍坊第三次登陆,13 日 08 时减弱为热带低压后在山东半岛北部附近海域活动,14 时中央气象台

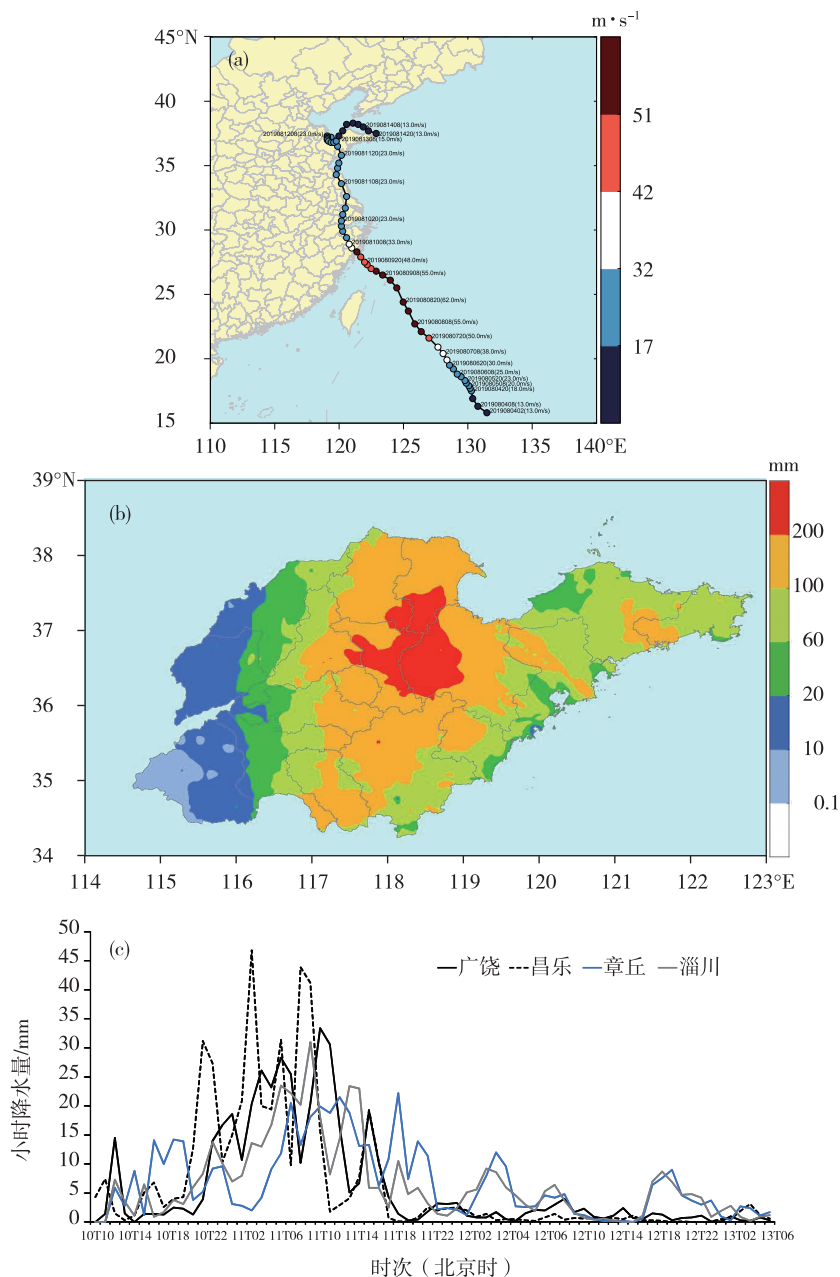


图 1 台风“利奇马”移动路径图(a;填色表示中心附近最大风速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、2019 年 8 月 10 日 20 时—11 日 20 时山东 24 h 累计降水量(b;单位:mm)和 2019 年 8 月 10 日 10 时—13 日 14 时昌乐、淄川、广饶、章丘四站雨量逐时变化(c;单位:mm)

Fig.1 Track (a; maximum average wind speed near bottom center, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of Typhoon LEKIMA, 24-h precipitation (b; units: mm) in Shandong from 20:00 BST 10 to 20:00 BST 11, and hourly variation of precipitation (c; units: mm) at Changle, Zichuan, Guangrao, and Zhangqiu stations from 10:00 BST 10 to 14:00 BST 13 August 2019

对其停止编号。

8月10日06时—13日14时,山东省国家级地面气象观测站平均降水量172.5 mm,其中49个站点降水量在50~99.9 mm之间,40个站点降水量在100~249.9 mm之间,28个站点降水量超过250 mm,以20时为日界划分,强降水主要出现在11日(8月10日20时—11日20时)(图1b)。此过程降水分布不均,强降水中心主要在潍坊西部、东营南部和淄博中部(36.0°~37.5°N,117.5°~119.0°E)等地。强降水中心的雨强较大,最大1 h雨量出现在2019年8月11日00时的潍坊临朐站(区域气象观测站),为67.6 mm。潍坊昌乐站2019年8月11日07时和08时,连续2 h的最大1 h雨量超过40 mm。在强降水中心选取4个代表站点(昌乐、淄川、广饶、章丘,图1c)分析降水随时间变化,可见台风“利奇马”带给山东的强降水时段(超过 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )主要集中在10日20—22时和11日01—13时。

### 3 降水条件分析

#### 3.1 高低空环流形势特征

8月11日山东的特大暴雨发生在较有利的高

低空环境场配置下。9日20时(图2a)500 hPa欧亚大陆中高纬维持三脊两槽的环流型,在巴尔喀什湖、蒙古国中部—我国河套地区各存在一冷槽,高空脊分别位于里海附近、新疆、东北地区,未来位于河套地区的高空槽将携带弱冷空气东移。高原地区存在一大陆高压,西太平洋副热带高压的中心在日本南部,副高脊线位于36°N附近。此时台风“利奇马”的中心位于浙江近海附近(27.5°N,122.0°E)。10日20时(图2b),中高纬度的脊、槽向东移动,巴尔喀什湖冷槽移到蒙古国西部—我国新疆东部(90°E附近),蒙古国中部—我国河套地区的冷槽减弱、分裂,北段东移到内蒙古东北部,南段移动缓慢,位于内蒙古中部—山西南部,部分减弱的冷空气残存在河套地区—山西—河南一带。高原上的大陆高压维持,西太平洋副热带高压与我国东北地区的高压脊同位相叠加而形成“高压坝”。台风“利奇马”已移至浙江北部,中心位于30.7°N,120.2°E,台风倒槽伸至江苏与山东南部交界附近。山东中东部受反气旋性环流控制。11日08时(图略),台风“利奇马”的中心位于江苏东部沿海附近(33.6°N,120.2°E),倒槽伸至山东中部。

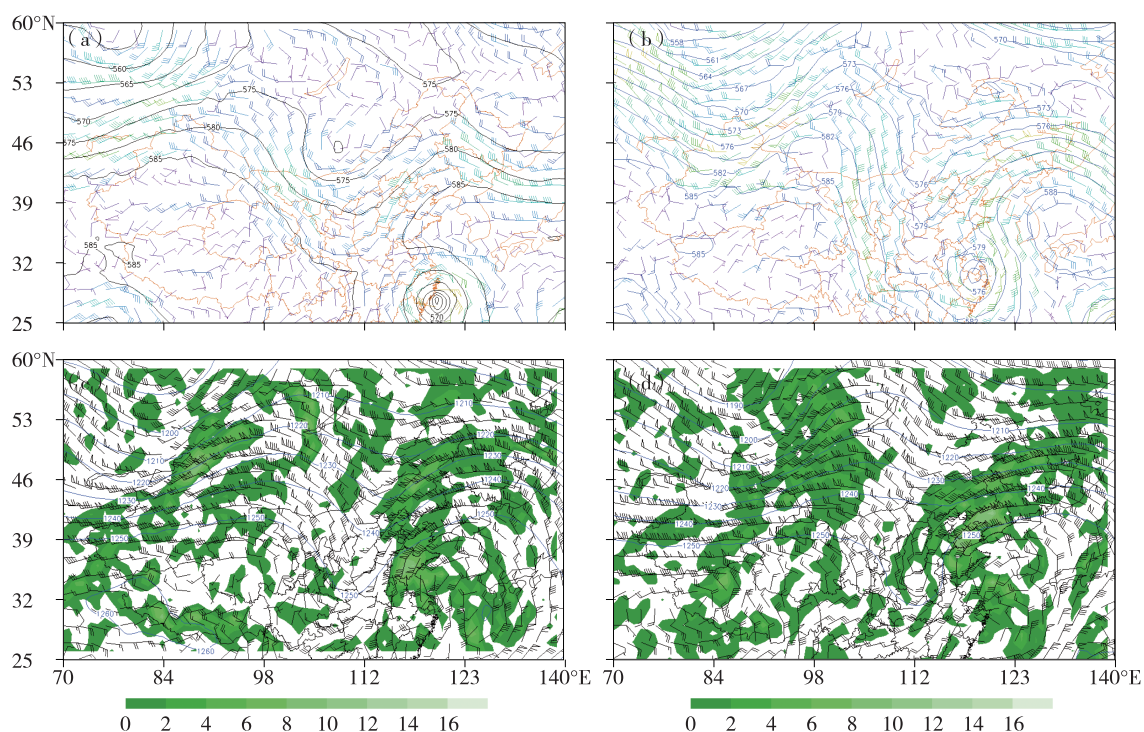


图2 2019年8月9日20时(a)、10日20时(b)500 hPa天气形势图,10日20时(c)、11日08时(d)200 hPa天气形势图(黑色实线:位势高度场,单位:dagpm;风向杆:风场,每一长杆代表 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;填色:散度场,单位: $10^{-5}\text{ s}^{-1}$ )

Fig.2 Synoptic situation at 500 hPa at 20:00 BST 9 (a) and 20:00 BST 10 (b) and synoptic situation at 200 hPa at 20:00 BST 10 (c) and 08:00 BST 11 (d) August 2019 (black solid line for geopotential height, units: dagpm; wind field in wind barb, a long shaft for  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; colored area for divergence field, units:  $10^{-5}\text{ s}^{-1}$ )



10日20时200 hPa原位于华北地区北部到东北地区的高空急流迅猛发展东移靠近山东西北部,此时山东位于高空急流入口区的右后侧(图2c)。10日夜间,高空急流进一步增强,向东北方向移动,逐渐移出山东,11日08时急流轴位于河北东北部—东北地区(图2d)。对应时次的200 hPa散度场上,山东境内为明显的辐散区并且强度增幅明显。11日08时200 hPa急流区逐渐东移,急流轴上的强风维持,山东境内强辐散区面积减小,强度有所减弱但仍较强。10日下午到11日上午是山东发生强降雨的时段,此时正是高空急流迅速增强且处于对山东降水最有利的位置。

10日20时(图3a)850 hPa台风“利奇马”的倒槽已伸到山东中部,即此时对流层低层山东主要受台风环流的影响,倒槽后部的低空东南急流到达山东半岛的北部,山东中部主要是偏东风急流控制,20  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  及以上的风抵达山东半岛东南部沿海一带。夜间随着台风继续北上,倒槽略有西移,低空东南急流强度增强,11日08时20  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  及以上的风已进入山东半岛(图3b)。这表明10日夜间,低空东南急流的增强造成山东中部低层的辐合不断增强,低空急流源源不断地将黄海和渤海的水汽向山东中部输送,有利于产生强降水。

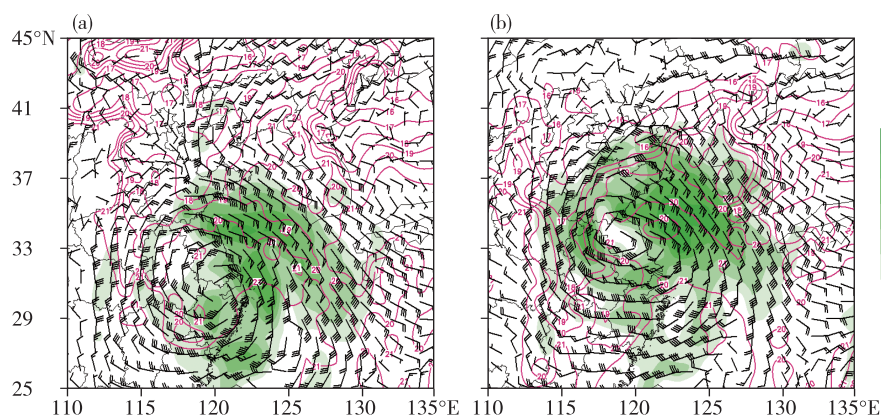


图3 2019年8月10日20时(a)、11日08时(b)850 hPa天气形势图(粉色实线:850 hPa温度场,图中仅画出了16~21  $^{\circ}\text{C}$ ,数值间隔为1  $^{\circ}\text{C}$ ,单位:  $^{\circ}\text{C}$ ;风向杆:风场,每一长杆代表4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;填色:低空急流,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.3 Synoptic situation at 850 hPa at 20:00 BST 10 (a) and 08:00 BST 11 (b) August 2019 (pink solid line for temperature field at 850 hPa between 16  $^{\circ}\text{C}$  and 21  $^{\circ}\text{C}$ , interval: 1  $^{\circ}\text{C}$ , units:  $^{\circ}\text{C}$ ; wind field in wind barb, a long shaft for 4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; colored area for low-level jet, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

最强降雨发生在高空急流的右后侧、低空急流左侧的强上升运动区,高、低空急流耦合作用产生次级环流,山东中部位于次级环流的上升区,暴雨区上空200 hPa存在明显辐散增幅,高层“抽吸作用”加强,有利于产生暴雨。

### 3.2 卫星云图 TBB 特征

10日16时(图4a),除山东西部、半岛东部外,全省大部地区都被台风外围云系覆盖。原山东东南部的冷云顶低于230 K的面积增加,强TBB中心略有北移,山东临沂上空有低于220 K的强TBB分布,与午后山东省东南部的较大降水区域(图略)对应;山东中西部有一近乎南北向的狭长窄螺旋云带,该狭长窄螺旋云带边缘的TBB梯度较大,表明云顶高度较高,云体的直展性很好,垂直运动深厚,在该狭长窄螺旋云带覆盖区域附近,地面有对应呈窄带状的降水落区(图略)。此时高空槽云系主要

位于蒙古国—我国华北地区、华中地区,结构较松散,左边界不规则,有向北减弱的趋势。

10日20时(图4b),原位于山东临沂上空TBB低于230 K的冷云区向北移动,强度略有下降,东营、淄博等地TBB低于230 K覆盖面积有所增大,原中西部狭长螺旋云系减弱。高空槽云系向北收缩,强度减弱。11日02时原位于黄海和江苏东部TBB低于210 K的对流云区,随着台风北上,黄海台风云系逆时针旋转移移动到山东中部,山东中部有TBB低于220 K的冷云区中心(图4c),表明山东中部的深厚垂直运动完成更新。此时在红外云图(图略)上显示分别在山东半岛东南部、东部和东北部有三条云线在山东中部交汇,这是低空急流水汽强辐合输送在云图上的反映。11日02—05时(图4c/d),山东中部TBB低于230 K的冷云顶覆盖面积继续增加,向北延伸覆盖到渤海,淄博、潍坊和东

营等局部地区上空有低于 220 K 的 TBB 在此阶段维持,表明垂直运动进一步增强,与山东中部的特大暴雨区位置对应;05 时台风眼壁云系已影响山东东南部、半岛南部等地,在山东东南部和江苏北部交界处有低于 200 K 的强 TBB 中心,说明此前山东中部的强降水并非台风眼壁云系造成。11 日 08 时(图 4e),台风眼壁云系略有减弱向北移动,强 TBB 中心在山东的临沂和日照交界处,山东中部大多被低于 230 K 的冷云区覆盖,即中部的 TBB 升高,垂直运动略有减弱。11 日 14 时(图 4f),台风眼壁云

系北抬,较低 TBB 范围缩小、数值升高,表明垂直运动继续减弱。

结合逐小时降水量资料(图 1c)分析,此次台风影响山东的强降水可以分为两个阶段:首先是 10 日 20—22 时,台风环流外围影响强降水初始阶段;其次是 11 日 01—13 时,台风环流的直接影响造成强降水的第二阶段。强降水第二阶段持续时间较长,雨量较大。本文着重对台风环流影响下强降水第二阶段产生原因进行分析。

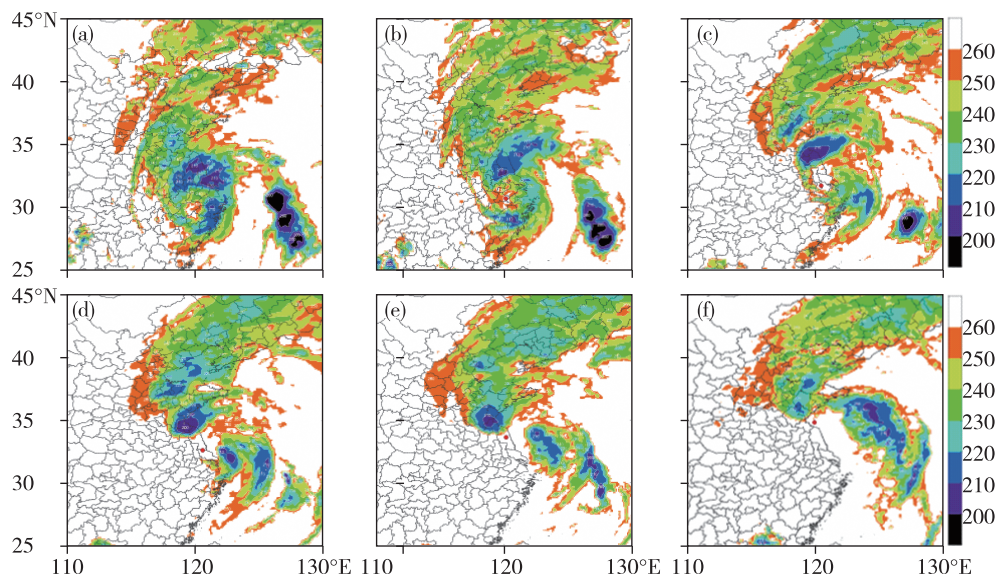


图4 2019年8月10—11日不同时刻FY-2G云顶亮温(TBB)分布(a. 10日16时,b. 10日20时,c. 11日02时,d. 11日05时,e. 11日08时,f. 11日14时;单位:K)

Fig.4 Distribution of black-body temperature (TBB) by FY-2G satellite from 10 to 11 August 2019 (a. 16:00 BST 10, b. 20:00 BST 10, c. 02:00 BST 11, d. 05:00 BST 11, e. 08:00 BST 11, f. 14:00 BST 11; units: K)

### 3.3 雷达回波特征

强降水落区主要在山东中部(图 1b),选取位于其附近的滨州雷达对暴雨区进行分析,可以看到在 10 日 20 时后  $0.5^\circ$  仰角基本反射率因子图(图 5)上,山东中部偏北的区域较长时间存在大于 30 dBZ 的强回波带,为层积混合云降水回波。在这个强回波带中,又有更强的回波(大于 40 dBZ)生成并不断自东南向西北移动经过山东中部暴雨区,较高降水效率的强回波维持时间较长,产生类似“列车效应”的效果。这与上述利用逐小时降水分析的强降水时段基本吻合,在台风影响的强降水第二阶段(图 5e,f),大于 40 dBZ 的强回波面积比强降水第一阶段(图 5d)的大。11 日午后,回波强度逐渐减弱,对应实况的降水强度也呈减弱的趋势。另外,在 10 日上午,受高空槽影响,山东西部对应有一弱的降水

回波(图 5a—c),随着台风北上,台风外围螺旋雨带逐渐逆时针旋转接近山东中部,在午后(图 5b)可以看到较强窄带回波向西北移动,而山东西部降水回波进一步减弱,至 10 日 15 时左右在滨州雷达探测范围内消失。台风环流造成的回波并未与高空槽造成的回波相“连接”,从一个侧面说明高空槽并未与台风环流“合并”。这与上述天气形势和卫星云图分析相一致,即山东的两个强降水时段主要受台风本体环流的影响。

### 3.4 水汽条件分析

充足的水汽输送及辐合上升运动是暴雨产生的必要条件。10 日夜间,850 hPa 东海北部存在大于  $50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的水汽通量中心,位于台风的东侧,与东南风急流位置相对应,形成一条向山东中部输送的水汽通道,为大暴雨的产生提供了



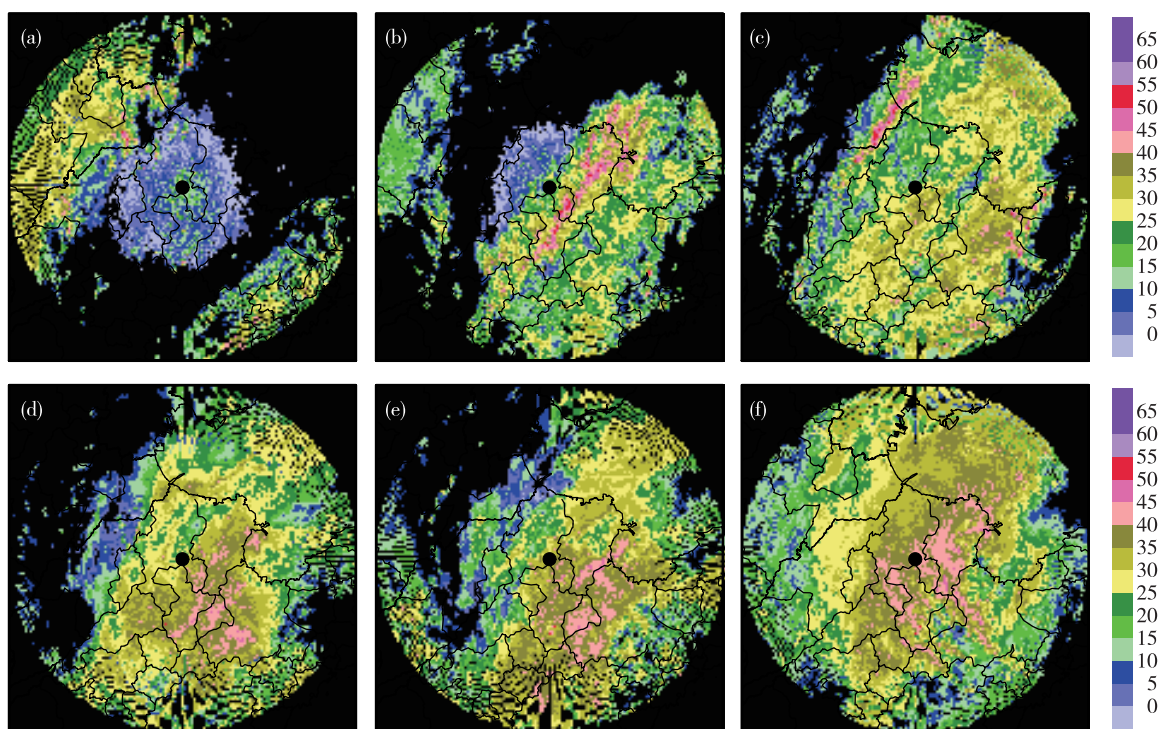


图5 2019年8月10日08:02(a)、12:00(b)、15:00(c)、22:40(d)和11日02:04(e)、08:03(f)0.5°仰角滨州雷达基本反射率因子图(单位: dBZ, 黑圆点表示滨州雷达站位置)

Fig.5 Base reflectivity factor at 0.5° elevation from Binzhou radar at 08:02 BST 10 (a), 12:00 BST 10 (b), 15:00 BST 10 (c), 22:40 BST 10 (d), 02:04 BST 11 (e), and 08:03 BST 11 (f) August 2019 (units: dBZ, black dot for location of Binzhou radar)

充足的水汽来源。东海北部暖湿气流被低空急流持续输送到强降水区,由图6可以发现,水汽通量中心和水汽辐合中心位置并不接近,11日02时(图6b),在山东中部有一小于 $-2 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量散度强辐合区,11日08时(图6c)水汽通量辐合区强度增强,强辐合区面积减小。这表明夜间低层的水汽强辐合保障了强降水的水汽补充,这两个时次的水汽通量强辐合区形状与未来6 h的强降水落区有较好的对应(图略)。11日14时(图6d),850 hPa的水汽通量虽然仍较强,但此时通量散度小于 $-1 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,水汽辐合条件弱于前两个时次,14时后,降水强度不如前两个时次。这说明850 hPa水汽通量辐合强度对雨强的变化和强降水落区有较好的指示意义,在今后的台风降水预报中可进行参考。

### 3.5 不稳定层结

图7是台风环流影响下强降水时段沿37°N逐6 h做出的垂直速度、假相当位温( $\theta_{se}$ )和水汽通量散度的垂直剖面。在这个时段,主要的水汽通量辐合区域位置变动较小,11日02时(图7a)有两个水汽辐合中心,一个位于117°~118°E的700 hPa附

近,另一个位于120°E的950 hPa附近。11日08时(图7b),水汽通量辐合最大值主要仍位于117°~118°E(特大暴雨区附近)的850~700 hPa。11日14时(图7c),这个强水汽辐合中心显著减弱,表明08时前后有充足且不断增强的水汽输送至暴雨中心及其附近,为大暴雨的形成提供了非常有利的水汽条件。

图7显示,11日02时,暴雨中心(118°E)附近,约900 hPa以下 $\theta_{se}$ 表现为弱热力湿对流不稳定层结,900 hPa以上为对流稳定层结。之后,对流不稳定层结的层次很快变薄、降低,700~600 hPa也出现弱湿对流不稳定。通过以上分析说明台风“利奇马”造成的强降水过程中,存在一定的对流性,但对流强度弱,实况中也没有观测到有明显的雷电现象。

11日02时(图7a),暴雨区118°E附近上空,700 hPa及以下 $\theta_{se}$ 低于350 K,600 hPa附近有一个355 K的闭合中心。08时(图7b),118°E附近850~700 hPa的 $\theta_{se}$ 超过350 K,达到355 K,600~500 hPa之间存在一个355 K的闭合中心,相对前一时次位置有所“抬升”;345~355 K的三根等假相当位温线在850~700 hPa之间基本呈垂直状。14时(图

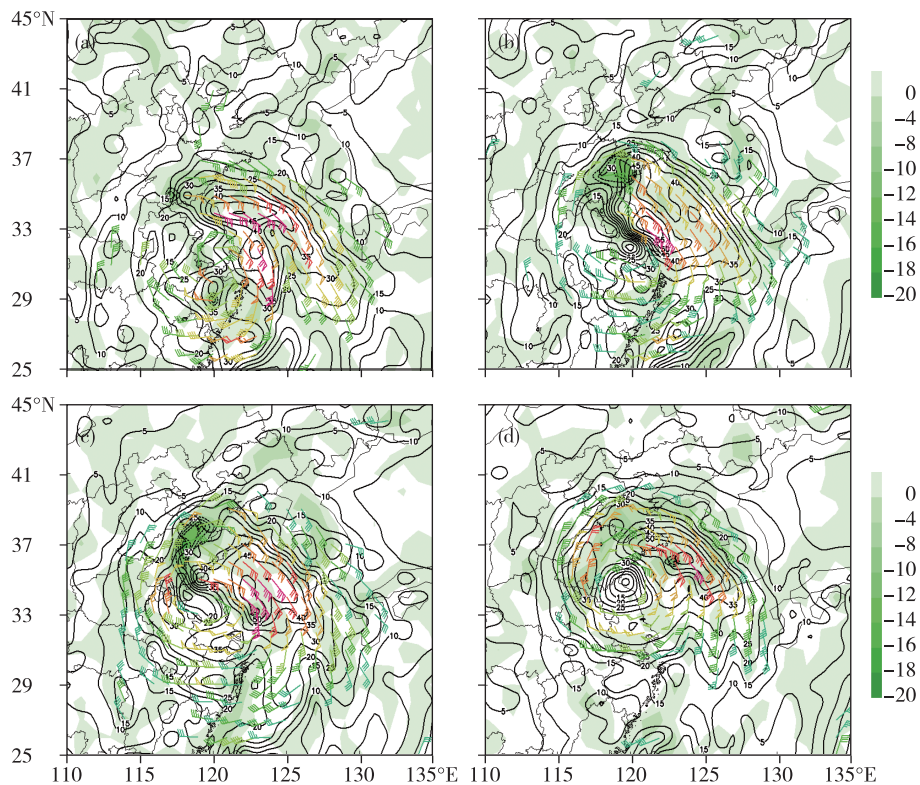


图6 2019年8月10日20时(a)和11日02时(b)、08时(c)、14时(d)850 hPa急流(风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风场,风向杆的每一长杆代表 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、水汽通量(黑色实线,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.6 Jet stream (wind field of speed higher than  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , a long shaft for  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), water vapor flux (black solid line, units:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), and water vapor flux divergence (colored, units:  $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 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

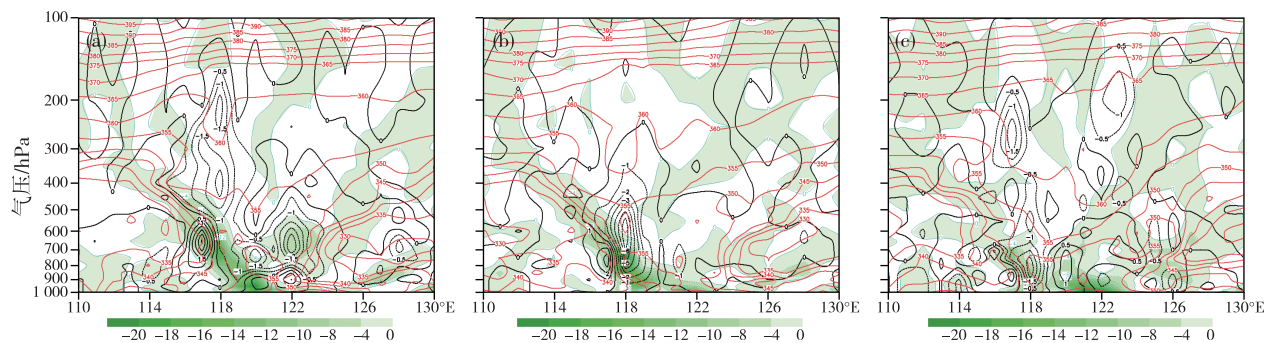


图7 2019年8月11日02时(a)、08时(b)、14时(c)水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和垂直速度(黑色实线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )沿 $37^\circ \text{N}$ 的垂直剖面图

Fig.7 Vertical cross section of water vapor flux divergence (colored, units:  $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and vertical velocity (black solid line, units:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along  $37^\circ \text{N}$  at 02:00 BST (a), 08:00 BST (b), and 14:00 BST (c) 11 August 2019

7c),  $118^\circ \text{E}$  附近 850~700 hPa 的假相当位温基本无变化,但上升运动明显减弱,水汽辐合强度减弱。通过分析表明,台风“利奇马”低层的气流将高温高湿的空气输送到了  $118^\circ \text{E}$  及以西的地方,且在低层保持相当的厚度,非常有利于 08 时前后出现强降

水。11 日 14 时,暴雨区降水强度明显减弱,说明此过程中动力条件作用更大。

### 3.6 动力辐合条件

11 日 08 时(图 7b),强垂直上升运动区域与强水汽辐合中心重合,相较于 11 日 02 时(图 7a),不



仅上升速度数值跃增,而且前一个时次的多上升运动中心的分布变为位于 $118^{\circ}\text{E}$ 附近的一个强上升运动区,垂直速度中心( $-6\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )位于 $600\text{ hPa}$ 附近。强烈的上升运动有利于水汽的抬升凝结,为暴雨的维持和发展提供了有利的动力条件。

由11日02时、08时沿 $37^{\circ}\text{N}$ 经暴雨区的散度纬向剖面图(图8)可见,暴雨区上空 $400\text{ hPa}$ 以上存在强辐散。11日02时(图8a), $300\sim 200\text{ hPa}$ 之

间存在 $12\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐散中心,中低层存在强辐合。11日08时(图8b),低层辐合加强,高层强辐散中心下降, $400\sim 300\text{ hPa}$ 之间,高低空辐合辐散增强。在 $115^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$ 之间出现呈向西倾斜的纬向次级环流,这应该是由降水区西侧附近的下沉补偿气流导致的。这种高低空互耦和次级环流结构有利于垂直运动的发展和维持。

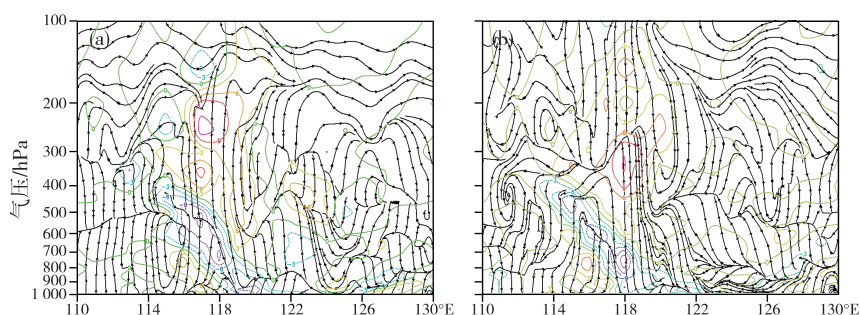


图8 2019年8月11日02时(a)、08时(b)散度(彩色实线,单位: $10^{-5}\text{ s}^{-1}$ )和流场(黑色流线)沿 $37^{\circ}\text{N}$ 的纬向剖面图

Fig.8 Vertical cross section of divergence (colored solid line, units:  $10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ) and flow field (black streamline) along  $37^{\circ}\text{N}$  at 02:00 BST (a) and 08:00 BST (b) 11 August 2019

#### 4 结论与讨论

使用常规观测资料、台风最佳路径数据集资料、中国地面-卫星-雷达三源融合逐小时降水产品、FY-2G卫星云顶亮温、NCEP/NCAR FNL再分析资料,从大尺度环流背景、水汽条件、TBB演变特征、动力条件等方面,对1909号台风“利奇马”影响期间造成的2019年8月11日发生在山东的特大暴雨进行诊断分析。主要得到以下结论:

1)强降水主要受台风倒槽的影响,台风倒槽在山东中部暴雨区长时间稳定维持,台风东侧的低空东南急流把东海水汽和能量向暴雨区输送,配合 $200\text{ hPa}$ 高空急流的“抽吸作用”,在暴雨区上空辐合抬升,造成具有中尺度特征的暴雨。

2)强降水区存在的正涡度区伴随强烈的上升运动、低层辐合、高层辐散的结构和次级环流耦合发展,为此次台风暴雨过程提供了有利的动力条件。

3) $850\text{ hPa}$ 水汽通量辐合中心以及相匹配的在垂直方向的强上升运动区,对强降水落区和雨强有一定的指示意义。

本文仅从天气学角度,利用诊断分析的方法对台风“利奇马”导致的山东中部暴雨的成因进行了分析,但由于未对该过程开展数值模拟试验,中尺度暴雨的动力热力结构有待今后进行细致剖析。

同时上述结论是对单个例进行分析,结论可能存在一定的片面性。针对山东的类似暴雨灾害天气预报,下一步工作需要在预报业务工作中检验本文初步得到的参考物理量,并且增加与影响山东的台风历史相似个例的不稳定能量等物理量进行对比研究,以期得到更具指导意义的预报指标。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴志彦,李宏江,石燕清,等.山东半岛一次台风暴雨过程的冷空气侵入特征分析[J].暴雨灾害,2016,35(1):61-68.
- [3] 赵宇,李静,杨成芳.与台风“海鸥”相关暴雨过程的水汽和干侵入研究[J].高原气象,2016,35(2):444-459.
- [4] 陈雄飞,刘峰,杨群超,等.相似路径台风“麦莎”和“韦帕”暴雨成因对比分析[J].山东气象,2013,33(2):5-11.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张子涵, 郑丽娜. 登陆北上台风突然转向的预报着眼点[J]. 海洋预报, 2020, 37(3): 46-53.
- [10] 朱男男, 王彦, 苏杭, 等. 台风“摩羯”(1814)残涡经渤海突然增强成因分析[J]. 海洋通报, 2020, 39(4): 464-474.
- [11] 朱君鉴, 蔡康龙, 龚佃利, 等. 登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 21-34.
- [12] 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.
- [13] 高拴柱. 2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象, 2020, 46(6): 792-800.
- [14] 王海军, 冯平, 王豪. 山东省防御台风“利奇马”主要经验及思考[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(11): 16-18.
- [15] CHEN L, LI Y, CHENG Z. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. Adv Atmos Sci, 2010, 27(5): 967-976.
- [16] XIE P, XIONG A Y. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses [J]. J Geophys Res: Atmos, 2011, 116(D21): D21106.
- [17] DUAN Q Y, AJAMI N K, GAO X G, et al. Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging [J]. Adv Water Resour, 2007, 30(5): 1371-1386.
- [18] 潘旻, 谷军霞, 宇婧婧, 等. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 2018, 76(5): 95-106.