

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.
GAO Liuxi, LIU Chang, CONG Chunhua, et al. Analysis on causes of distinct precipitation features in Shandong caused by two typhoons with similar tracks[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4):60-68. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.007. (in Chinese)

两个相似路径台风造成山东降水明显差异的成因分析

高留喜,刘畅,丛春华,杨晓霞
(山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要: 利用常规气象资料、自动气象站资料、气象卫星资料及 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料对以相似路径影响山东的登陆北上类台风“利奇马”(1909)和“桃芝”(0108)进行对比分析,得到以下主要结论:1)暴雨分布特征和强度与热带气旋位置存在显著差异。2)中纬度台风暴雨比较复杂,台风降水地形增幅作用尽管明显,但主要与台风结构和强度差异有关。3)小时最大雨量与台风强弱没有必然联系,强降水维持时间长短是“利奇马”与“桃芝”累计降水有较大差别的重要因素。4)环流形势的显著差异是导致两个台风影响山东时间、降水明显不同的一个重要原因。5)“利奇马”和“桃芝”降水水汽输送条件差异是降水分布存在明显差异的重要因素,动力条件也存在明显差异。6)对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)在两次台风暴雨中反应效果不同。

关键词: 台风路径;暴雨;非对称性;环流形势;急流

中图分类号: P458.124 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)04-0060-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.007

Analysis on causes of distinct precipitation features in Shandong caused by two typhoons with similar tracks

GAO Liuxi, LIU Chang, CONG Chunhua, YANG Xiaoxia
(Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Using conventional meteorological data, data of automatic meteorological stations and satellites, and NCEP FNL reanalysis data ($1^\circ \times 1^\circ$), a comparative analysis is conducted on Typhoon LEKIMA (2019) and TORAJI (2001) which affected Shandong Province with similar tracks, and the results are as follows. 1) There are significant differences in the distribution and intensity of rainstorms and the locations of tropical cyclones. 2) Typhoon rainstorms are complex in the middle latitudes. Though the typhoon precipitation increases obviously caused by the topography, it is mainly related to the differences in typhoon structure and intensity. 3) There is no inevitable connection between the maximum hourly precipitation and typhoon intensity. The duration of heavy precipitation is an important factor for the distinct cumulative precipitation between LEKIMA and TORAJI. 4) The significant differences in circulation patterns are important reasons for different duration and precipitation in Shandong Province caused by the two typhoons. 5) The distinct water vapor transport conditions account for the obvious difference in precipitation distribution between LEKIMA and TORAJI, and the dynamic conditions are obviously different as well. 6) CAPE (convective available potential energy) performs differently in the two typhoons' heavy rain.

Key words typhoon track; rainstorm; asymmetry; circulation pattern; jet stream

收稿日期:2020-08-05; 修订日期:2020-09-02

基金项目:华东区域合作基金项目(QYHZ201812);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201802);山东气象局预报员专项(SDYBY2020-01)

通信作者:高留喜,男,硕士,正高级工程师,主要从事天气气候研究,glx1000@sohu.com。

引言

中国是受台风影响最严重的国家之一,台风每年造成的直接经济损失逾千亿元,人员伤亡数千人^[1-2]。山东位于华东沿海,直接影响山东的台风年平均1~2个,数目虽然不多,但常与中纬度系统相互作用,带来较强的降水。台风暴雨是山东省汛期主要灾害性天气之一,造成的直接经济损失在各种自然灾害中排在第2位^[3],因此受到各级政府和科学家的高度关注。近些年对台风暴雨的研究较为广泛^[4-9],涉及引发台风暴雨的气候背景及多尺度动力、热力机制分析,地形、冷空气对台风暴雨增幅作用,台风海洋相互作用和数值模拟研究,对台风的认识越来越深刻。随着探测手段和数值预报技术的不断发展,我国台风路径预报水平取得明显进展^[10],24 h 台风路径预报误差小于70 km,但台风强度业务预报误差呈现逐年波动状态,预报水平没有明显改善^[11]。台风暴雨预报有较大不确定性,是很复杂的问题^[12],实际业务工作中相似预报法往往是台风暴雨预报的最常用方法之一^[13]。由于地形下垫面及多尺度系统相互作用等复杂性,台风明显的个体差异,登陆台风经常发生异常变化,相关物理机制仍不十分清楚^[14]。WMO指出登陆台风降水预报是台风预报面临的三大挑战之一^[15],登陆台风的降水预报(落区和雨量)至今仍是业务预报中的难点^[16-17]。路径相似的台风,降水并不相似的情况时有发生^[18-21],并往往造成预报失误。因此,非常有必要对相似路径的台风暴雨成因进行对比分析和探讨。

“桃芝”(0108)和“利奇马”(1909)两个路径相似的台风给山东带来严重灾害,降水存在显著差异,值得进行分析研究。本文利用常规气象资料、自动气象站资料、气象卫星资料和美国国家环境预报中心 NCEP 1°×1°的客观分析资料对这两个路径相似的北上台风进行对比分析,探讨大暴雨落区差异的可能成因,以期防台减灾提供参考。

1 台风概况

1.1 台风路径

2001年7月25日14:00,“桃芝”在菲律宾以东洋面(13.6°N,133.4°E)生成,向西北方向移动,7月28日02:00加强为台风,最强时风力为13级(风速40 m·s⁻¹)。30日00:10在台湾东部花莲县登陆,横穿台湾岛,风力减弱。31日01:45以强热带

风暴级别(风力11级)在福建省连江县登陆,登陆后迅速减弱北上。31日上午减弱为热带低压(风力7级,风速15 m·s⁻¹),由江苏省燕尾港南部进入黄海继续北上,8月1日21:00在青岛附近登陆,然后快速穿越山东半岛于2日00:00进入渤海(图1)。

2019年8月4日14:00,“利奇马”在菲律宾以东洋面(17.4°N,131.0°E)生成,向西北方向移动(与“桃芝”在西太平洋上的路径几乎平行),8日02:00加强为超强台风,最强时风力为17级(风速62 m·s⁻¹),西北行过程中避开台湾岛,10日01:45在浙江台州以超强台风级(风力16级,风速52 m·s⁻¹)登陆,10日17:00到达浙江杭州附近,后转向偏北移动,由江苏省灌云县进入黄海。11日20:50由青岛黄岛区进入山东,强度为热带风暴级(风力9级,风速23 m·s⁻¹),12日05:00从潍坊昌邑进入莱州湾,12日白天到夜间在莱州湾徘徊(其间登陆山东东营并重新入海),13日08:00减弱为热带低压(风力7级,风速16 m·s⁻¹),14时停止编号。

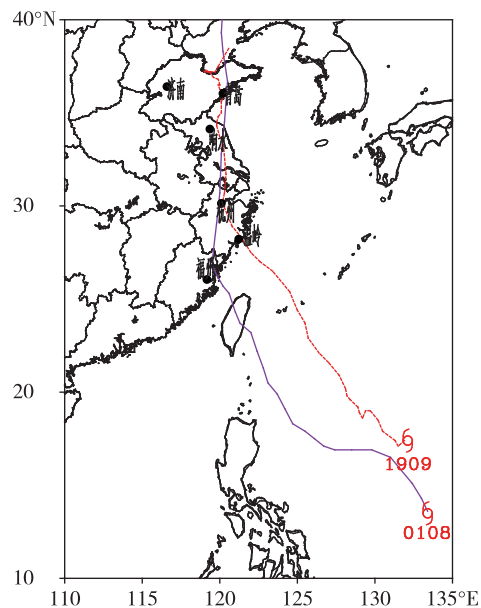


图1 台风移动路径(红线为“利奇马”,紫线为“桃芝”)
 Fig.1 Track of typhoon (red solid line for Typhoon LEKIMA, purple solid line for Typhoon TORAJI)

由图1可以看出,“桃芝”和“利奇马”登陆后,从杭州到莱州湾的移动路径十分接近,在陆地上的路径相似。

1.2 台风暴雨过程降水分布特征与地形影响

受“利奇马”影响,2019年8月10日06:00—13日14:00,山东普遍出现暴雨、大暴雨天气,鲁中山区及其北侧的济南、淄博、潍坊、东营和滨州地区出现特

大暴雨,全省平均降水量为 160.1 mm,为有气象记录以来首位,21 个国家级地面气象观测站日降水量突破历史极值。大暴雨、特大暴雨区主要位于台风移动路径的左侧,最大降水(淄川西河梨峪口,降水量 676.6 mm)产生在左侧,有很强的非对称性(图 2a)。“桃芝”暴雨范围小、降水弱,2001 年 7 月 31 日 20:00—8 月 2 日 08:00,仅山东半岛出现暴雨、大暴雨天气,在台风路径附近呈对称分布,大暴雨及中心位于青岛和日照沿海,最大降水(崂山北九水,降水量 387.0 mm)产生在台风路径附近,东营、淄博以西的

广大地区无明显降水(图 2b)。LONFAT et al.^[22] 研究 1998—2000 年的 260 个热带气旋发现,台风非对称降水随风暴强度和地理位置有显著变化,强度较弱的台风最大降水发生在左前象限,而强度强的台风最大降水则出现在右前象限,且强度较弱的台风显示出更大的非对称性。有研究^[23]认为台风右前方向岸风地形抬升比较显著,最大雨量往往出现在台风右前象限或前半部。“利奇马”“桃芝”降水分布特征和强度与热带气旋位置存在显著差异,与已有研究^[22-23]明显不同,中纬度台风暴雨更加复杂。

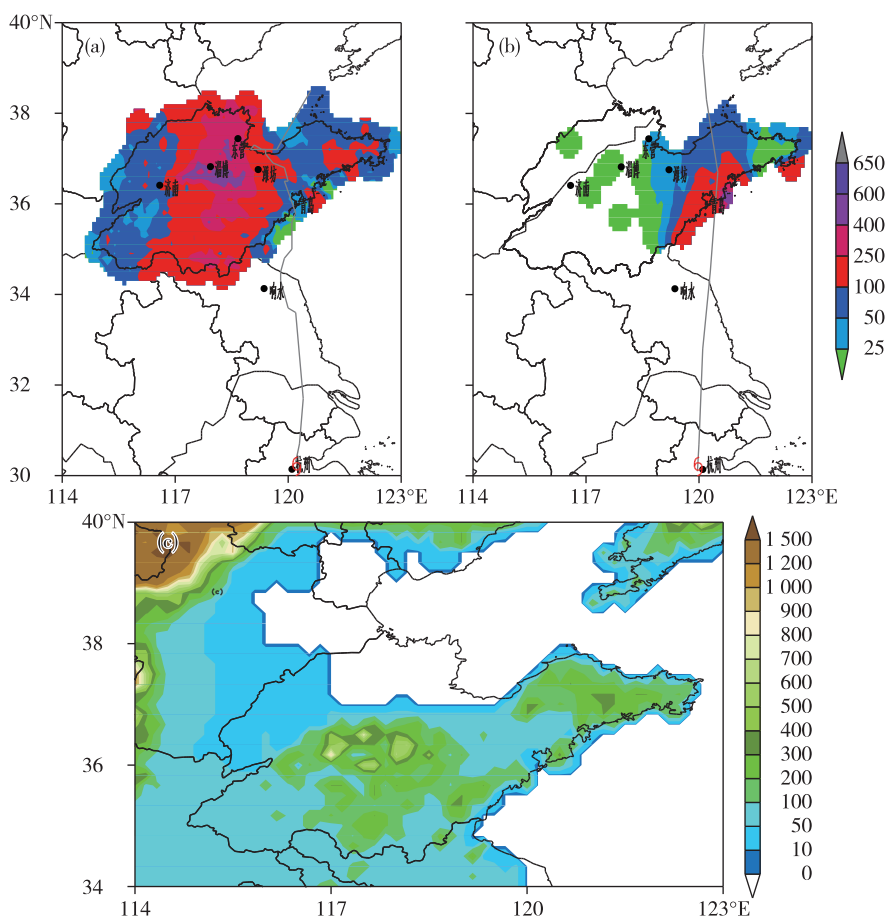


图 2 台风路径(实线)和山东降水量(填色,单位:mm)分布(a.利奇马,b.桃芝)及山东地形(c;填色为海拔高度,单位:m)
Fig.2 Track of typhoon (solid line), distribution of precipitation (colored, units: mm) (a. LEKIMA, b. TORAJI), and topography of Shandong (c; colored for altitude, units: m)

由图 2c 看出,山东半岛有丘陵和复杂的海岸地形,鲁中有高大的山地,鲁东南也有很多丘陵山地。陈联寿和丁一汇^[24]指出,在台风登陆前后,与海岸相交气流受海岸地形作用产生辐合及风速辐合将加强台风中心东侧降雨。由于海岸地形摩擦辐合作用,在半岛沿海处出现强烈辐合,上升速度急剧增加,降水效率更高,从而引发台风“桃芝”影响期

间 100 mm 以上的大暴雨、特大暴雨在半岛南部沿海发生。台风继续向前移动且深入半岛内陆后,不再有这样的变化机制存在,系统能量逐步消耗,降水效率相对变低。由于存在丘陵地形的抬升作用,半岛北部降水虽比南部沿海少,但还是出现暴雨天气。“利奇马”降水分布与山东地形比较一致,最大降水位于鲁中山地,半岛南部沿岸降水比半岛北部

大。台风降水与地形有很大关系,地形增幅作用明显。但两个路径相似台风在山东降水分布呈现明显地理差异和强度差异,说明有比地形更重要的影响因素。

1.3 降水特点与持续时间对比分析

2019年“利奇马”影响山东期间,梨峪口降水持续时间大于70 h(图3a),呈现多峰型分布,小时降水量超过20 mm的持续时间不少于8 h,最大小时降水量小于30 mm,累计降水量为676.6 mm,强降水持续时间长,累计降水量大。2001年“桃芝”影响山东期间,青岛降水持续时间小于20 h(图3b),持续时间短,呈现单峰型分布,最大小时降水量为64.6 mm,超过20 mm的强降水仅维持3 h(3 h降水占比达70%),强降水时间短,集中程度高,累计降水量为219.4 mm,低于“利奇马”。“利奇马”强度比“桃芝”强,梨峪口最大小时雨量远低于“桃芝”暴雨时的青岛雨强,“利奇马”过程最大雨强($67.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)远比“桃芝”(崂山北九水超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)小,小时最大雨量与台风强弱没有必然联系。累计降水量由降水强度和降水时间共同决定,分析看出强降水维持时间长短是“利奇马”与“桃芝”累计降水有较大差别的重要因素。

2 环流形势对比分析

“桃芝”影响期间,副热带高压(以下简称“副高”)和大陆高压发展强盛。2001年7月31日08时,500 hPa上空河套地区高压脊强烈发展,与鄂霍次克海高压合并形成阻塞高压,副高逐渐加强西伸。8月1日14时,副高中心在日本上空,中心值达592 dagpm,呈方头块状,大陆高压中心值超过588 dagpm,呈现两高对峙形势(图4a)。“桃芝”位于两高之间,已越过副高脊线,离副高比较近(台风中心距外围588 dagpm线约4经度)。中国东北到华北地区有明显的西风槽,内蒙古东部直至华南地区维持南北向较深的低槽,“桃芝”处于副高边缘和明显的西风槽前的偏南引导气流里北上,快速移过山东(仅用3 h),导致山东降水持续时间短。

与“桃芝”相比,“利奇马”影响山东时也有大陆高压和海上副高的对峙,形状相似,高压中心位置基本一样,500 hPa环流形势上有相似之处,但也存在很多不同。不同之处,“利奇马”影响时两高压强度明显偏弱,2019年8月11日20时副高中心值为588 dagpm,大陆高压中心值为584 dagpm,离副

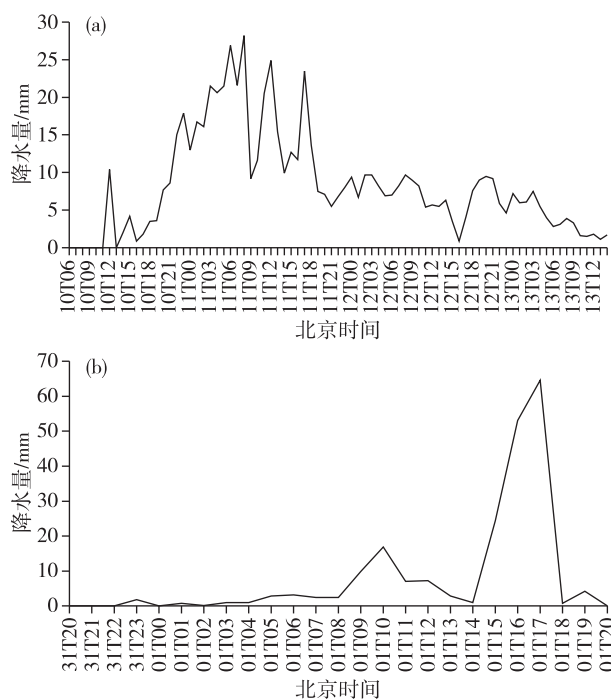


图3 逐小时降水量(a.梨峪口,2019年8月10日06时—13日14时,b.青岛,2001年7月31日20时—8月1日20时;单位:mm)

Fig.3 Hourly precipitation (units: mm) at Liyukou from 06:00 BST 10 to 14:00 BST 13 August 2019 (a) and Qingdao from 20:00 BST 31 July to 20:00 BST 1 August 2001 (b)

高距离远(超过10经度),副高西侧偏南引导气流弱(图4b)。副热带高压南侧有台风“罗莎”(1910)存在,两者距离超过20经度,不考虑双台风效应,但“罗莎”阻挡了副高南落,使两高对峙形势更加稳定,间接对“利奇马”移动产生重大影响。中纬度华北地区无明显西风槽,浅槽减弱移过,华北地区变成弱的反气旋环流,阻挡台风北上。“利奇马”引导气流弱,移动慢,前进方向出现高压阻挡,出现打转现象,影响山东时间长。

环流形势的显著差异是导致台风影响山东时间、降水明显不同的一个重要原因。

3 台风强度与结构

2001年7月31日夜间鲁东南开始出现降水时,“桃芝”中心最大风力只有7级。8月1日上午由江苏入海后,在海上再次加强,由于“桃芝”本身强度弱,衰减的台风云系在海上仅发展成空间分布近乎圆形的雷暴云团(图略),范围较小,直径仅100~200 km,造成山东半岛出现暴雨,大降水区与雷暴云团吻合较好。

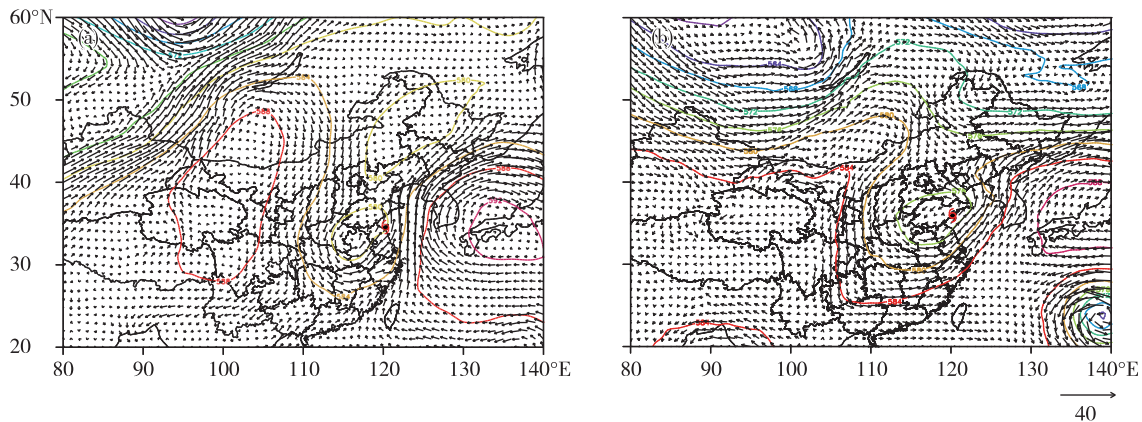


图4 500 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a. 2001年8月1日14时,b. 2019年8月11日20时)

Fig.4 Geopotential height (isoline, units: dagpm) and wind (wind barb, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa (a. 14:00 BST 1 August 2001, b. 20:00 BST 11 August 2019)

“利奇马”经过台湾岛北部近海海域,没有受到台湾地形削弱,2019年8月10日01:45登陆浙江台州时仍然是超强台风。云系庞大,长轴近1500 km,短轴近1000 km,后缓慢西北行,受地形摩擦等因素作用,10日06:00在浙北减弱为台风级,鲁东南地区开始出现降水。之后向偏北移动,强度继续减弱,10日15:00台风云系覆盖整个山东地区。台风外围的螺旋雨带主要在其移动路径的左前侧(图5),强降雨落区与其外围的螺旋云带密切相关。台风在缓慢北移过程中北侧的螺旋云带不断有中尺度对流云团新生,给山东带来明显降水。11日20:50以热带风暴级(风力9级)登陆青岛黄岛区,12日05:00进入莱州湾,12—13日在莱州湾打转,

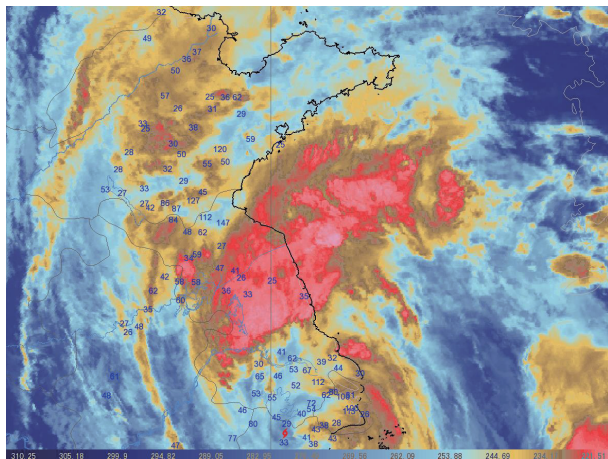


图5 2019年8月10日20时卫星云图(填色)及过去6 h降水(蓝色数字,单位:mm)

Fig.5 Satellite cloud imagery (colored) at 20:00 BST 10 August 2019 and precipitation of the past 6 h (blue number, units: mm)

13日07:00前维持热带风暴级别。“利奇马”强度高、影响时间长,螺旋雨带主要在其移动路径的左前侧,导致降水主要在其移动路径左侧。

初步分析表明,二者结构、强度的差异可能是导致台风强降雨落区差异的主要原因。

4 水汽、热力与动力条件分析

4.1 水汽输送及低空急流

台风北上造成的强降雨与水汽条件、气旋性环流维持时间及强度关系密切。李英等^[25]通过数值研究揭示强的水汽输送对暖心的发展与维持有促进作用,加强热带气旋雨带中的对流活动,从而使暴雨得以加强。

两台风影响时,都有低空和超低空急流向山东暴雨区输送水汽,“利奇马”影响期间低空急流($v \geq 34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、超低空急流($v \geq 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)比“桃芝”强,水汽输送条件有显著差异。

“桃芝”影响时,2001年8月1日14时,850 hPa以下黄海中部和半岛南部有明显水汽辐合,主要在

900 hPa以下边界层内,水汽通量散度 $\nabla \cdot \frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \leq -40 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,越靠近地面水汽辐合越明显,降雨分布与边界层的水汽辐合有很好的对应关系。1000 hPa台风中心东侧有 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的超低空急流和强水汽通量区(中心值 $\frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \geq 300 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),强水汽辐合带主要在其北到东北侧,半岛暴雨区水汽输送主要来自黄海。

$\nabla \cdot \frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \leq -100 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot$

$\text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的黄海中部的强水汽辐合区域(呈圆形)和云图上的雷暴云团非常吻合(图 6a), 山东陆地上强降雨开始在半岛南部沿海出现。台风向北稍偏东方向移动, 强降水范围向半岛内陆北扩, 随着水汽辐合程度减弱, 降水随之减弱。2 日 02 时山东半岛水汽通量散度逐渐转为正值(图 6b), 降水结束。暴雨对称分布与水汽强辐合区的形态比较一致, 说明超低空急流向暴雨区上空输送了充足的水汽和能量, 对山东半岛暴雨的产生起到了重要的组织和促进作用。

“利奇马”在登陆浙江前, 对称性结构已发生改变^[26], 水汽输送高值中心不再围绕眼区, 其输送强度分布逐渐变为东多西少、北高南少, 整层可降水量中心转为集中在台风中心的东部和东北部。2019 年 8 月 11 日 20 时, 山东平均累计降水量已达 138.7 mm, 占总降水的 86.6%, 其中 11 日降水量达 109.7 mm, 占 68.5%, 降水主要是台风螺旋云带降水。“利奇马”影响时, 山东暴雨区 700 hPa 以下有明显水汽辐合, 水汽输送深厚, 最强时 900~800 hPa 水

汽通量散度 $\nabla \cdot \frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \leq -180 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 水汽汇集远超“桃芝”, 降水分布与 850 hPa 水汽辐合有更好的对应关系。2019 年 8 月 10 日 08 时, “利奇马”远在浙江, 850 hPa 强水汽输送通量区位于其东侧, 中心值 $\frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \geq 500 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 北侧有一条宽广的低空急流带 ($v \geq 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 由黄海向苏皖北部和山东地区输送, 枣庄、临沂到淄博、东营的上空出现明显的水汽辐合区(图 6c), 中心值 $\nabla \cdot \frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \leq -30 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 山东水汽辐合区内随后(10 日白天)出现大范围暴雨, 水汽通量散度 $\nabla \cdot \frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \leq -30 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的兰陵、郯城出现大暴雨。随着“利奇马”北移, 低空急流加强 ($v \geq 34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 将黄海水汽向山东暴雨区

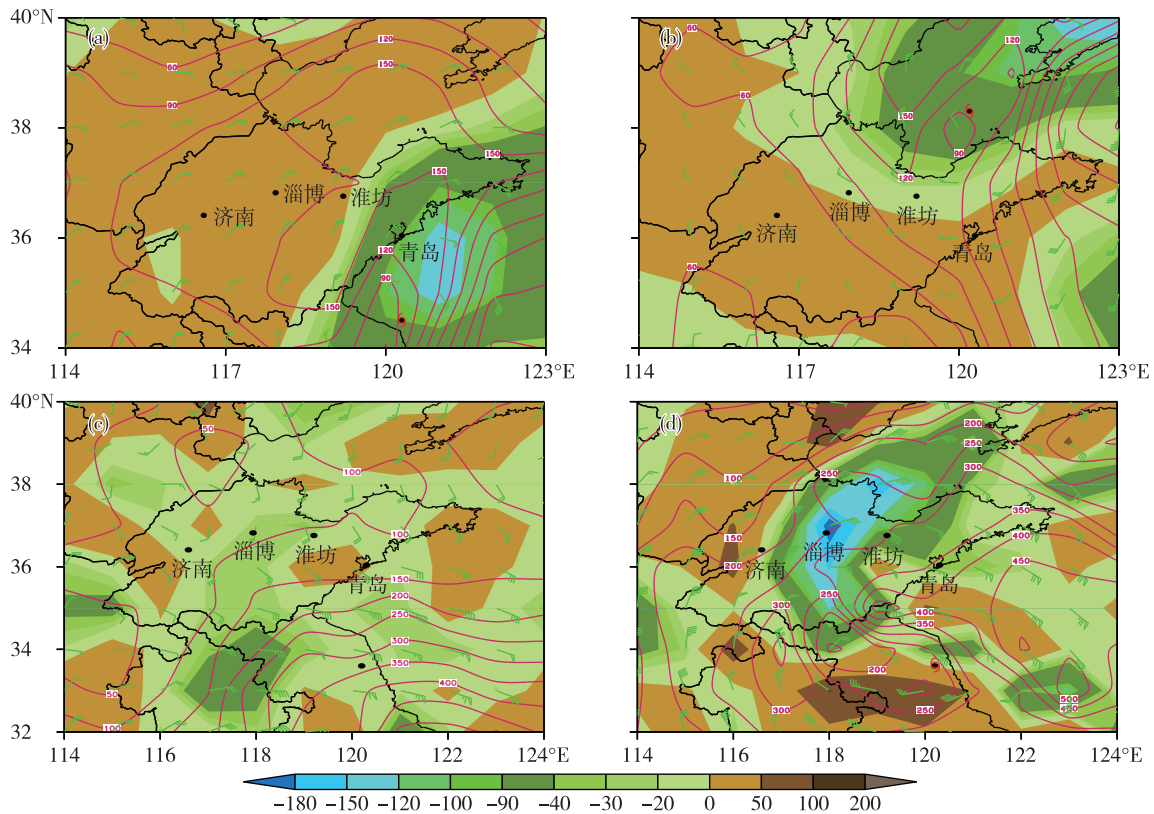


图 6 水汽通量(红线,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(填色区,单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及风场(绿色风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a. 2001 年 8 月 1 日 14 时 1 000 hPa, b. 2001 年 8 月 2 日 02 时 1 000 hPa, c. 2019 年 8 月 10 日 08 时 850 hPa, d. 2019 年 8 月 11 日 08 时 850 hPa)

Fig.6 Water vapor flux (red line, units: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), water vapor flux divergence (colored area, units: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), and wind (green wind barb, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1 000 hPa at 14:00 BST 1 August 2001 (a), 1 000 hPa at 02:00 BST 2 August 2001 (b), 850 hPa at 08:00 BST 10 August 2019 (c), and 850 hPa at 08:00 BST 11 August 2019 (d)

输送。11日08时,“利奇马”位于江苏中部沿海,除了黄海的东到东南风低空急流,渤海又有一支东北急流($v \geq 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)向山东中部暴雨区输送水汽,两支强水汽输送在山东暴雨区汇合,鲁东南、鲁中和鲁西北的东部大部分区域水汽通量散度 $\nabla \cdot \frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \leq -90 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,淄博附近水汽通量散度 $\nabla \cdot \frac{1}{g} | \mathbf{V} | \cdot q \leq -180 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6d)。上述地区出现大暴雨天气,济南东部、淄博、东营和潍坊附近出现大范围特大暴雨,局部降水量超过500 mm。11日14时,黄海和渤海的水汽输送减弱,下午降水强度明显减弱。由于水汽辐合区主要在台风移动路径的左前侧,导致山东大降水主要出现在台风路径左侧,降水呈现显著不对称分布。强低空急流在“利奇马”暴雨中作用明显,组织和促进了螺旋云带中尺度对流发展。

4.2 热力条件

对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)是一种与大气中对流现象密切关联的指标,是强对流天气分析预报的重要参数,已在天气预报和模式产品中得到广泛应用。NCEP资料产品提供两种不同类型的CAPE数据,第一种为CAPE_{sfc},第二种为CAPE_{180_0mb}。有研究^[27]指出:将CAPE_{180_0mb}应用于强降水预报,其指示效果比CAPE_{sfc}更好,对强降水预报的改善有一定的帮助。下面所用资料是CAPE_{180_0mb}(简称CAPE)。

图7是2001年台风“桃芝”和2019年台风“利奇马”影响期间部分山东CAPE值分布图。由图7看出,2001年7月31日20时半岛南部沿海CAPE值为 $400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,之后不稳定能量继续增强,8月1日14时半岛南部地区CAPE值 $\geq 400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,沿海中心值 $\geq 600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,随后半岛出现暴雨、大暴雨天气,能量得到释放,20时山东半岛大部地区CAPE

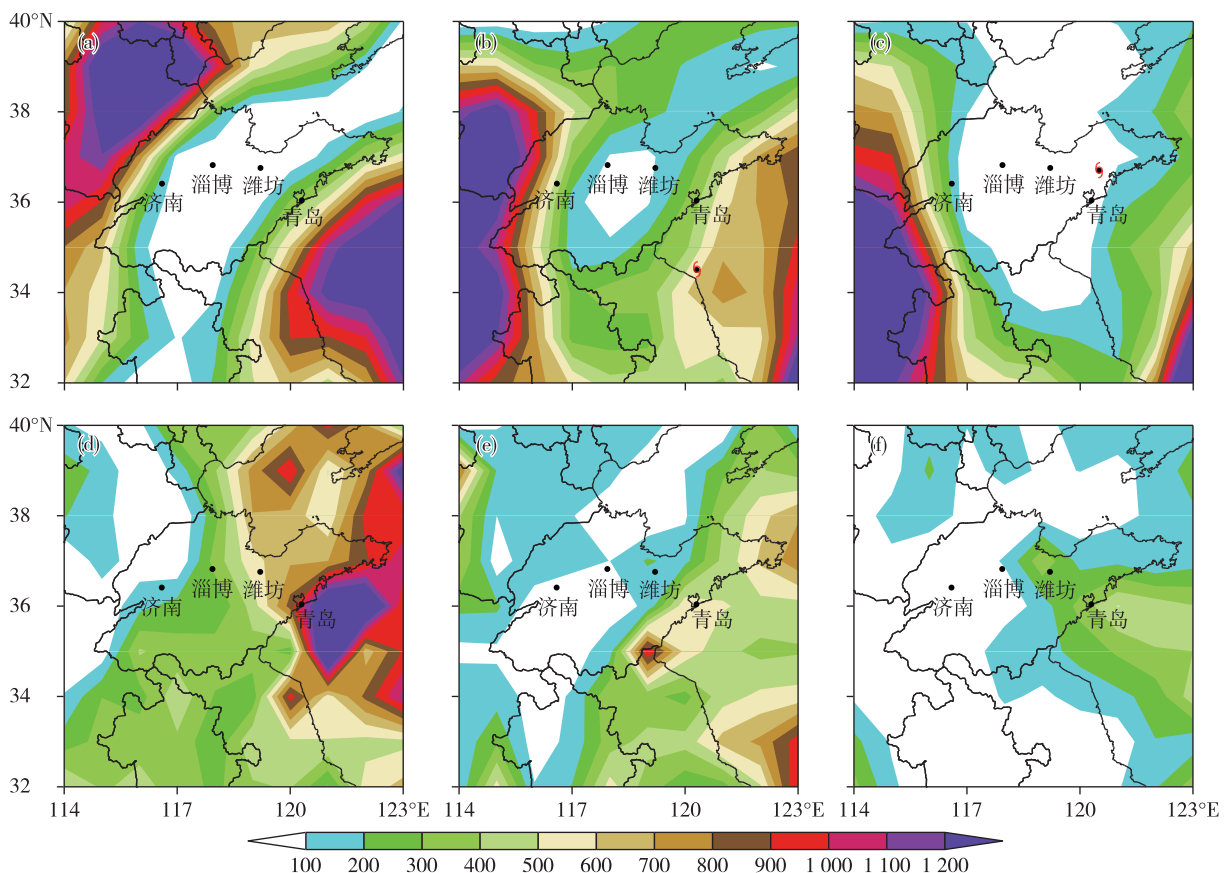


图7 2001年台风“桃芝”和2019年台风“利奇马”影响期间山东部分地区CAPE值(填色,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)分布(a. 2001年7月31日20时,b. 2001年8月1日14时,c. 2001年8月1日20时,d. 2019年8月10日08时,e. 2019年8月10日20时,f. 2019年8月11日08时)

Fig.7 Distribution of CAPE (colored area, units: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) in partial areas of Shandong during Typhoon TORAJI (2001) and LEKIMA (2019) (a. 20:00 BST 31 July 2001, b. 14:00 BST 1 August 2001, c. 20:00 BST 1 August 2001, d. 08:00 BST 10 August 2019, e. 20:00 BST 10 August 2019, f. 08:00 BST 11 August 2019)

值 $\leq 100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,降水基本结束。CAPE对“桃芝”暴雨有很好的反应。2019年8月10日08时,淄博、枣庄以东地区CAPE值 $\geq 400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,半岛地区CAPE值 $\geq 700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,10日20时和11日08时CAPE减弱明显,但半岛地区相对其他地区CAPE值仍然比较明显。10日白天鲁东南、鲁中地区出现暴雨、大暴雨,半岛西部地区出现小雨,CAPE值最大的半岛东部地区没有降水。降水最强时段(11日)CAPE值比较小,且CAPE值最大的半岛地区降水量最小,CAPE值较小的鲁中、鲁西北东部出现特大暴雨。CAPE对“利奇马”暴雨反应差。

4.3 动力条件

2001年8月1日中午,暴雨中心(青岛)低层有明显辐合,边界层辐合,散度 $D \leq -150 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,高层有明显的辐散,300 hPa散度 $D \geq 150 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,抽吸作用强。300 hPa以下有较强的上升运动,最强上升出现在700~500 hPa,中心值 $w \leq -120 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,动力条件好(图8a)。400 hPa以下是正涡度,低层涡度大,边界层最大值 $\zeta \geq 400 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,且存在正涡度环流和低层辐合叠加,产生的次级环流利于局地涡度增长和暴雨发生,随后涡度明显增长,下午出

现大暴雨天气。8月1日17:00—20:00,正涡度达到最强,由于垂直上升运动和低层辐合迅速减弱,动力条件变差,对应的降水迅速减弱并逐渐停止。2019年8月11日02—14时,“利奇马”暴雨中心(梨峪口)600 hPa以下有明显的辐合,850~750 hPa辐合,散度 $D \leq -250 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,高层辐散,450~300 hPa散度 $D \geq 200 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,比“桃芝”抽吸作用更强(图8b)。上升运动位于300 hPa以下,中心在800~600 hPa,中心值 $w \leq -600 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,远超“桃芝”暴雨时的 $-120 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。400 hPa以下有明显正涡度,750~600 hPa涡度值 $\zeta \geq 400 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,中心值 $\zeta \geq 500 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,比“桃芝”的涡度大。“利奇马”比“桃芝”动力条件好,梨峪口强降水持续时间长。11日14:00—12日08:00上升运动主要在700 hPa以下,中心值 $w \leq -100 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直速度明显减弱,辐合主要在900 hPa以下,辐合条件变差,400 hPa以下虽仍有很强正涡度,中心值 $\zeta \geq 500 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,但中心明显降低至800 hPa以下,是降水减弱的信号,梨峪口降水强度明显减弱。由于强的正涡度环流有利于更长时间维持一个深厚的垂直结构,梨峪口仍长时间维持 $5 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水。

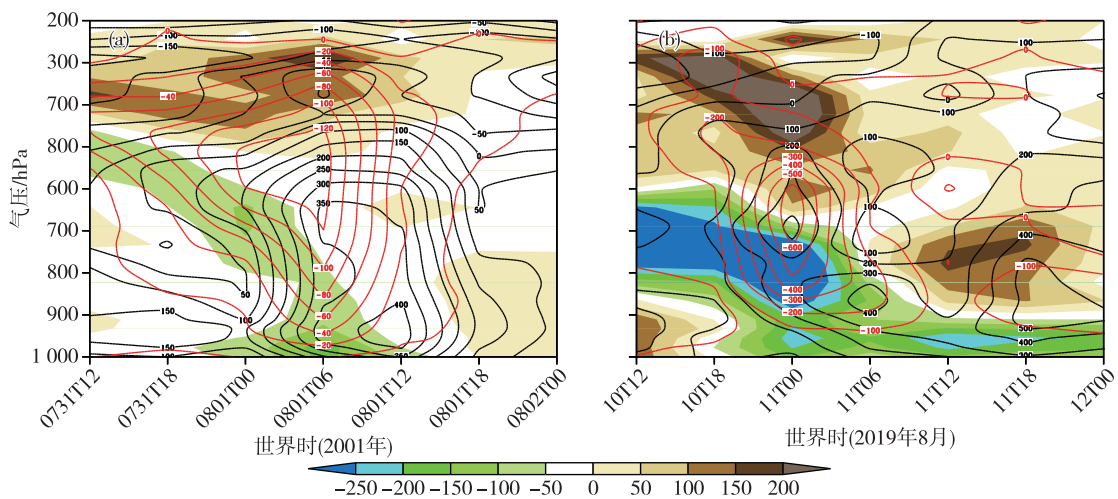


图8 “桃芝”和“利奇马”影响时暴雨中心的涡度(黑色等值线,单位: 10^{-6} s^{-1})和散度(填色,单位: 10^{-6} s^{-1})以及垂直速度(红色等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)时间-高度剖面(a.桃芝,b.利奇马)

Fig.8 Time-height cross section of vorticity (black isoline, units: 10^{-6} s^{-1}), divergence (colored area, units: 10^{-6} s^{-1}), and vertical velocity (red isoline, units: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) of rainstorm center (a. TORAJI, b. LEKIMA)

5 结论

1)两个台风降水分布表现出显著的地理差异和强度差异。“桃芝”影响时间短,强降水范围小,雨强大,降雨集中,呈现单峰型分布,强降水均匀分布在台风移动路径两侧,具有明显的对称性分布;

“利奇马”影响时间长,强降水范围大,呈现多峰型分布,强降水主要分布在移动路径左侧,有很强的非对称性。小时最大雨量与台风强弱没有必然联系,强降水维持时间长短是“利奇马”与“桃芝”累计降水有较大差别的重要因素。

2)中纬度台风暴雨比较复杂,台风降水尽管与

地形有很大关系,地形增幅作用明显,但主要与台风结构和强度差异有关。

3)两个台风在环流形势上有相似之处,都存在两高对峙,高压形状相似,位置基本一样,但也存在很多不同。不同之处:“利奇马”影响时两高压强度弱,中纬度华北地区无明显西风槽,副热带高压南侧有1910号台风存在,台风中心离副热带高压距离远;“桃芝”影响时两高压强度强,中纬度华北地区有西风槽存在,副热带高压南侧没有台风,台风中心离副热带高压距离近。环流形势的显著差异是导致台风影响山东时间、降水明显不同的一个重要原因。

4)“利奇马”影响期间低空和超低空急流强于“桃芝”,有黄海和渤海的明显水汽汇合,水汽输送能力强于“桃芝”,低空急流作用明显,“桃芝”超低空急流作用明显,水汽输送条件差异是两台风降水分布明显差异的重要因素。“利奇马”比“桃芝”动力条件好,强的正涡度环流有利于更长时间维持一个深厚的垂直结构,降水持续时间长。

5)CAPE对“利奇马”暴雨指示意义较差,在“桃芝”暴雨中表现较好。

参考文献:

- [1] 丁一汇,朱定真,石曙卫,等.中国自然灾害要览(上卷)[M].北京:北京大学出版社,2013:158-190.
- [2] 周磊,陈大可,雷小途,等.海洋与台风相互作用研究进展[J].科学通报,2019,64(1):60-72.
- [3] 阎丽风,杨成芳.山东省灾害性天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2014:236-252,2-3.
- [4] 郭达烽,周芳,陈翔翔,等.登陆台风“麦德姆”的空心结构及其特征[J].气象与环境学报,2017,33(3):10-20.
- [5] 王尚宏,汤杰,雷小途.登陆过程中台风高层暖心结构演变特征分析[J].气象,2018,44(5):612-620.
- [6] 吴志彦,李宏江,赵海军,等.卫星水汽图像和位势涡度场在一次变性台风暴雨过程中的解译应用[J].气象与环境学报,2018,34(3):1-8.
- [7] 黄莉,白龙,李紫甜.适当冷空气对秋季台风暴雨增幅作用研究[J].灾害学,2018,33(2):38-44.
- [8] 赵玉春,王叶红.台湾岛地形对登陆台风“莫兰蒂”(1614)强对流雨带发展影响的模拟研究[J].大气科学,2019,43(1):27-48.
- [9] 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.
- [10] 雷小途.中国台风科研业务百年发展历程概述[J].中国科学:地球科学,2020,50(3):321-338.
- [11] 张守峰,余晖,向纯怡.中央气象台台风强度综合预报误差分析[J].气象,2015,41(10):1278-1285.
- [12] 陈联寿,孟智勇,丛春华.台风暴雨落区研究综述[J].海洋气象学报,2017,37(4):1-7.
- [13] 陈剑,孔玉寿.卫星云图资料在台风路径相似预报中的应用[J].海洋预报,2004,21(3):22-28.
- [14] 端义宏,陈联寿,梁建茵,等.台风登陆前后异常变化的研究进展[J].气象学报,2014,72(5):969-986.
- [15] WMO. Pre-Workshop TOPIC Reports [C]//WMO. The Eighth International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-VIII), Jeju, Republic of Korea, 2-10 December 2014. Geneva: WMO, 2014.
- [16] 施春红,吴君婧,漆梁波.两例相似路径台风降水差异的成因及预报分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):36-45.
- [17] 孙力,董伟,药明,等.1215号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析[J].气象学报,2015,73(1):36-49.
- [18] 黄滢,郭亮,江源源.“黑格比”和“莎莉”两个相似台风暴雨对比分析[J].海洋预报,2010,27(1):49-52.
- [19] 陈红专,叶成志,唐群,等.2013年影响湖南的两次相似路径台风暴雨对比分析[J].气象科学,2016,36(4):537-546.
- [20] 李慧琳,高松影,徐璐璐,等.影响辽东半岛两次相似路径的台风对比分析[J].气象与环境学报,2015,31(1):6-13.
- [21] 颜玲,周玉淑,王咏青.相似路径台风 Soudelor(1513)与 Matmo(1410)登陆前后的降水分布特征及成因的对比分析[J].大气科学,2019,43(2):297-310.
- [22] LONFAT M, MARKS F D Jr, CHEN S Y 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.
- [23] 斯公望.暴雨和强对流环流系统[M].北京:气象出版社,1990:128.
- [24] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979:1-26.
- [25] 李英,陈联寿,徐祥德.水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J].大气科学,2005,29(1):91-98.
- [26] 刘晓汝,谢作威.2019年超强台风“利奇马”引发浙江特大暴雨过程分析[J].气象科学,2020,40(1):89-96.
- [27] 张夏琨,朱跃建,郭品文.对流有效位能的不同计算方法及其对比[C]//中国气象学会.第33届中国气象学会年会.西安:中国气象学会,2016:2124-2134.