

# 两个相似路径台风引发的东部沿海地区降水分布特征及成因对比分析

李君<sup>1,2</sup>, 李妍<sup>1,2</sup>, 贾瑞<sup>1,2</sup>, 田云菲<sup>1,2</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省淄博市气象局, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 利用美国国家环境预报中心的再分析资料和中国气象局观测站点的实况降水观测数据, 分析了路径相似的1909号台风“利奇马”(Lekima)和0509号台风“麦莎”(Matsa)影响期间东部沿海地区降水强度和落区的明显差异, 对比了两个登陆台风的大尺度环流和动热力结构特点。结果表明: 台风“利奇马”与西风槽在山东中西部(台风路径西侧)结合, 与高空急流入口区右侧的垂直运动相叠加, 形成深厚而强烈的上升运动, 台风东侧的低空东南急流持续输送水汽, 降水增幅明显且中心偏西, 台风减弱变缓; 同时, 东北亚环流受下游台风阻挡稳定少动, 降水系统长时间维持是造成突破历史记录极端降水的又一重要原因。与台风“利奇马”不同, 台风“麦莎”影响期间大尺度环流没有西风槽和高空急流活动, 低层辐合浅薄且上升运动弱, 水汽来自减弱的台风环流; 台风移动速度快, 是台风“麦莎”降水明显小于台风“利奇马”的原因。

**关键词:** 登陆台风; 东部沿海; 降水分布; 水汽输送; 高空急流

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)03-0025-12

## 1 引言

受全球变暖影响, 1970年以来西北太平洋台风的平均强度明显增强, 强台风频数增大<sup>[1-2]</sup>, 我国以登陆台风为代表的极端降水事件呈明显增多的趋势<sup>[3-4]</sup>。台风暴雨经常导致洪水、山体滑坡和泥石流等次生灾害, 给人类社会造成巨大损失。随着中国经济迅猛发展, 沿海地区人口更加稠密, 台风暴雨高度的脆弱性和敏感性造成的总体直接经济损失显著增长<sup>[5]</sup>。台风暴雨损失的减少在很大程度上依赖于登陆台风暴雨预报能力的提高。

不同台风的大气环流背景场并不相同。研究台风与环境场的相互作用, 分析登陆台风暴雨强度和分布规律, 能为登陆台风造成的强降水预报提供极为重要的依据。研究发现大尺度环流与台风暴雨有密切联系。西风槽在登陆台风与中纬度环流

系统的相互作用中占有重要地位<sup>[6-8]</sup>, 与台风变性有直接关系, 西风槽强度的变化将直接导致降水强度的不同。中低空西南急流是登陆后台风获取水汽和不稳定能量的主要通道<sup>[7]</sup>, 李英等<sup>[9]</sup>和方艳莹等<sup>[10]</sup>分别用数值模式模拟和个例分析证明了低空急流持续的水汽供应可减缓登陆台风强度的衰减, 增强强对流活动, 使降水增加。台风降水与高空急流的位置和强弱也密切相关, 高空流出气流的增强可使低层减压并产生气旋式变风场, 对其南侧的台风有重要作用<sup>[11]</sup>。9711号台风数值试验表明, 较强的槽前高空辐散有利于台风的维持和长久发展, 从而影响降水的强度<sup>[11]</sup>。由此可见, 台风登陆后降水的强弱与大尺度环流背景关系密切, 加强对登陆台风大尺度背景场的分析是台风暴雨研究中不可或缺的一环。

山东地处我国东部沿海地区, 北上影响山东的

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-06-05。

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-074)。

作者简介: 李君(1968-), 女, 副研究员, 硕士, 主要从事灾害性天气预报预警研究。E-mail: 810665680@qq.com

通讯作者: 李妍(1994-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事灾害性天气预报预警研究。E-mail: freedom-yan@qq.com

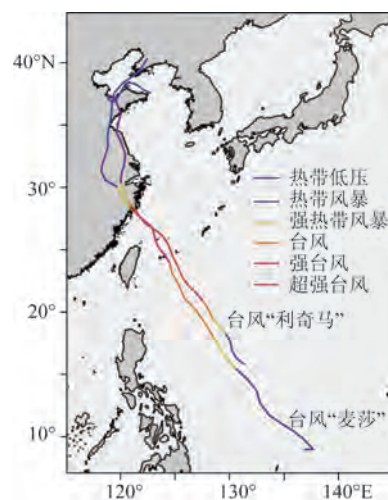
热带气旋平均每年有2个,最多为7个,造成的灾害以暴雨最为严重<sup>[12]</sup>。热带气旋经过长距离移动影响山东,受冷或粗糙的下垫面影响,多数热带气旋强度减弱或变性。北上路径相似的变性台风所经地区的降水可能有较大差异<sup>[13-14]</sup>。本文利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的再分析资料和中国气象局观测站点的实况降水观测数据及济南多普勒雷达资料,对影响山东的两个路径相似台风“利奇马”和台风“麦莎”的降水分布特征进行对比;应用天气学诊断分析的方法,研究两个台风的大尺度环流背景和动力热力结构特点;探讨大尺度环流与台风相互作用对降水分布及强度的影响,以期为中纬度登陆台风预报提供有益参考。

## 2 台风“利奇马”和台风“麦莎”造成的山东降水特征分析

台风“利奇马”是2019年登陆中国最强的台风,影响范围大(见图1),持续时间长,极端降水区集中,引发了洪水和泥石流等自然灾害。山东平均降水量170.3 mm,最大降水量479.3 mm(济南市章丘),72 h累积降水大于250 mm的区域位于鲁中(见图2a),出现在台风路径的西侧,21个站点日降水量突破历史记录。2005年9号台风“麦莎”登陆后降水也较强(见图1),但明显弱于台风“利奇马”,山东平均降水量49.8 mm,最大降水量199.7 mm(淄博市博山),72 h累积降水大于100 mm的区域出现在鲁中

山区北部和半岛东南部(见图2b),分布在台风路径的东西两侧,但东侧范围更大。这两个路径相似但降水强度及分布显著不同的台风,为理解和预报登陆台风降水提供了较好的对比分析个例。

台风影响山东的24 h累积降水分布显示(见图3,图中时间均为北京时,下同),台风“利奇马”降水集中在登陆山东之前的2019年8月10—11日,占总降水量的近9成。10日较强降水区域出现在鲁西、鲁中和鲁南(见图3a),沿黄河小于25 mm的狭长区域将降水区清晰的分为东西两部分,提示可能是不同系统造成的;11日降水明显增强(见图3b),大于



(引自中国台风网 <http://typhoon.nmc.cn/web.html>)

图1 台风“利奇马”和台风“麦莎”的移动路径

Fig.1 Tracks of typhoon "Lekima" and "Matsa"

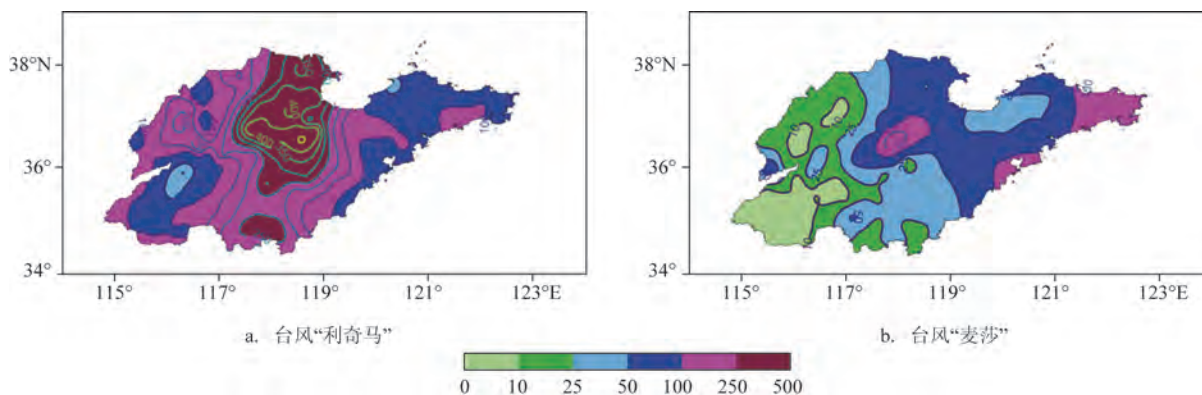


图2 台风“利奇马”和台风“麦莎”登陆山东前后的72 h累积降水分布(单位:mm)

Fig.2 The distribution of 72-hour cumulative precipitation (unit:mm) in Shandong before and after the landing of typhoon "Lekima" and "Matsha"

100 mm 的区域贯穿山东中部,鲁中北部的降水量大于 350 mm,位于路径左侧,半岛有少量大于 100 mm 的降水区;12 日登陆后降水减弱(见图 3c),50~100 mm 的区域仍然位于路径左侧。陈联寿等<sup>[15]</sup>指出,台风登陆前后的海岸地形作用将加强台风中心东侧降雨,台风东侧半岛部分地区大于 100 mm 的降水说明台风登陆降水与海岸地形有较大关系,其西侧鲁中地区的强降水则说明有更重要的影响因

素。Atallah 等<sup>[16]</sup>的相关研究证明,在美国东部,登陆热带气旋路径西侧的降水与西风槽密切相关。与台风“利奇马”不同,台风“麦莎”的降水主要出现在台风登陆后的 2005 年 8 月 8 日(见图 3f),降水中心出现在路径的东侧,说明海岸地形是台风“麦莎”降水重要的影响因素。

以上分析了相似路径的两个台风的降水强度和时空分布的明显差异。下面将从环流形势入手,

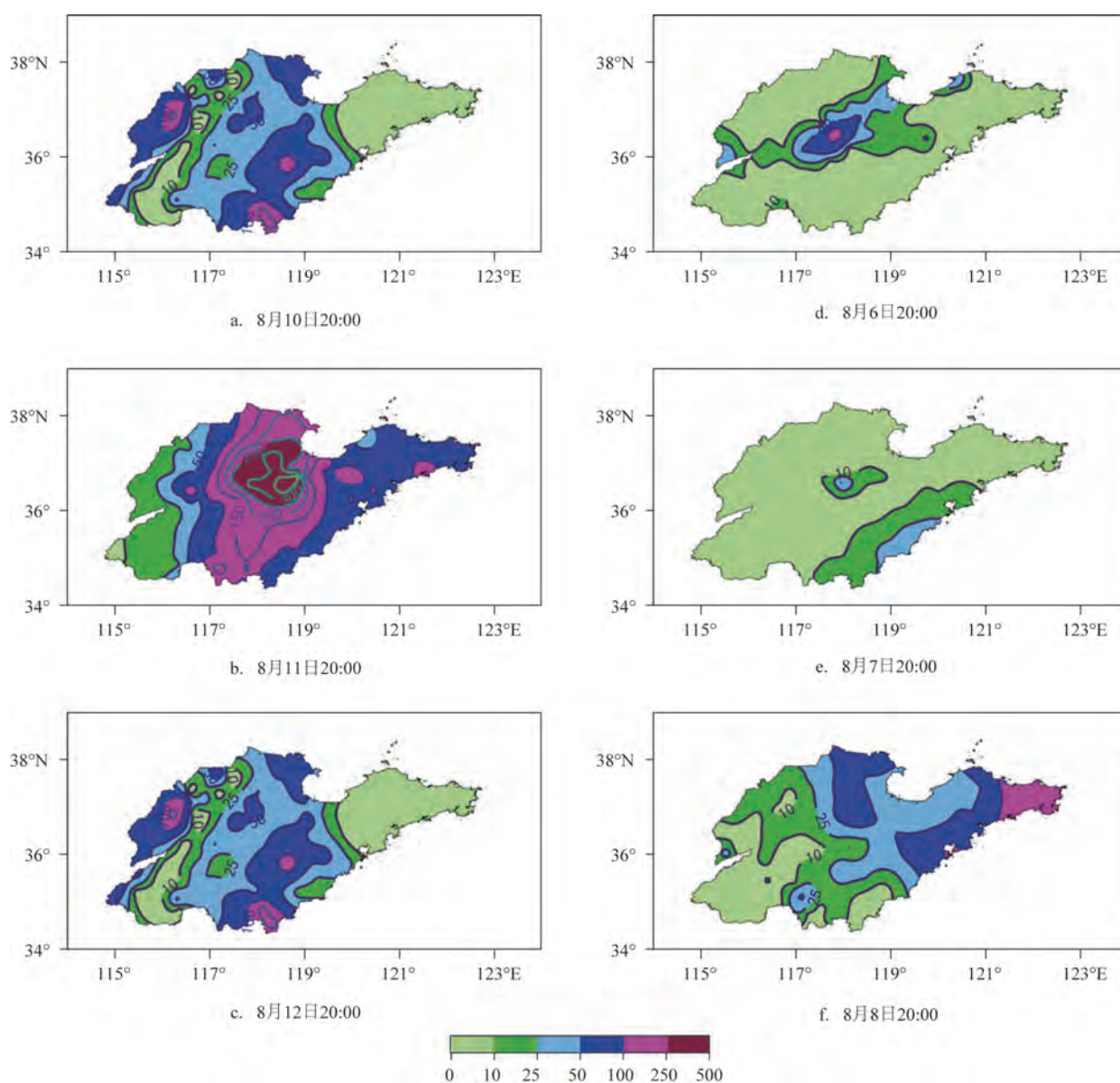


图3 台风“利奇马”(a—c,2019年)和台风“麦莎”(d—f,2005年)24 h 累积降水分布(单位:mm)

Fig.3 The distribution of 24-hour cumulative precipitation (unit: mm) of typhoon "Lekima" (a—c,2019) and typhoon "Matsa" (d—f,2005)



对比水汽收支和热力动力条件等方面的差异并分析原因,为今后此类过程的预报提供依据。

### 3 大尺度环流形势特征对比分析

在 500 hPa 高度场上,台风“利奇马”登陆浙江时(见图 4a),西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)控制着日本海南部及其以东的洋面,台风“利奇马”登陆后沿偏南气流北上(见图 4b),副高向东移到日本海以南地区;副高南侧的另外一个台风“罗莎”(1910)沿副高南侧的东南气流向西北缓慢移动,由台风减弱为强热带风暴。台风“罗莎”使日本海副高稳定在日本海及其以南地区,阻挡上游系统东移;贝加尔湖阻塞高压(以下简称“阻高”)东移发展,副高与阻高之间是西风带深槽,东北亚大气环流两脊一槽的形势稳定少动,为强降水的长时间持续提供背景条件。槽前西南气流与北上台风东侧的偏南气流在东部沿海合并加强,减弱后的台风环流逐渐并入槽区,槽加深成低涡;山东处于低涡东北象限,强劲的东南气流控制,该区域水汽充沛、垂直运动活跃且不稳定能量集中,极端强降水发生在大尺度形势稳定少动、低涡形成和维持期间,随低涡缓慢向东北移动,降水逐渐减弱(见图 4c)。台风“麦莎”登陆时,强盛的副高控制朝鲜半岛及其以东地区(见图 4d),台风“麦莎”沿副高外围的东南气流向北略偏西方向移动,路径较台风“利奇马”偏西。随着台风“麦莎”北上(见图 4e),副高显著减弱东撤南移;台风北部及西北部西风带地区一直由副高西伸的高压脊控制,不利于降水产生,这可以很好地解释台风“麦莎”登陆山东之前降水稀少的原因。台风登陆后副高迅速西伸加强(见图 4f),西北侧的西南气流引导减弱后的台风“麦莎”加速向北移动,影响山东时间较短,不利于降水的长时间维持。

### 4 水汽输送及高空急流

充分的水汽供应是暴雨发生的必要条件。本节从两个台风的水汽输送特点分析其对应的急流变化对降水差异的影响。

台风“利奇马”登陆浙江时的水汽输送包括来

自南海的西南水汽(见图 5a)以及其东南部来自台风“罗莎”的水汽输送。台风“利奇马”北移过程中强度虽然减弱(见图 5b),但其北侧的东南风与南海西南风及台风“罗莎”北部的东风汇合为强劲的东南风急流(中心风速 29.0 m/s),强度与刚登陆浙江时(中心风速 31.0 m/s)相近,在东南洋面上形成一条水汽输送带。这是台风“利奇马”的主要水汽来源,将充沛的暖湿气流输送到台风北到西北部上空,与山东的强降水分布相一致(见图 3b),该区域上空水汽辐合( $-3.4 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s/kg}$ )几乎达到刚登陆时的强度( $-3.7 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s/kg}$ )。强水汽辐合区的西北侧是强辐散区,之间为东南急流和东北风切变,与强降水区西部边界一致。东南风急流提供了充沛的水汽和不稳定能量,东北风切变则意味着冷空气的加入。在大尺度环流背景稳定少动的情况下,东南急流、950 hPa 强辐合区以及东北风切变从 10 日 20:00—11 日 8:00 一直存在,维持 12 h 以上,向上延伸至 400 hPa,深厚持久。北移的台风降水回波从 10 日 18:00 后显著增强并在鲁中地区停滞,直到 11 日 11:00 回波开始减弱,持续时间大于 16 h,时间和空间分布上与东南急流、强辐合区和东北风切变吻合,与降水中心一致,是造成山东极端降水的主要因素。后期台风脱离水汽输送带(见图 5c),降水强度显著减小(见图 3c)。台风“麦莎”输送水汽通道也来自南海(见图 5d),较台风“利奇马”弱。台风向北移动中逐渐与水汽输送带断开,影响山东时更多是自身环流夹带的水汽(见图 5e),因此,台风“麦莎”登陆山东时降水才开始增大,水汽来自台风环流的东侧和北侧,辐合中心位于东北象限,其东侧的偏南风气流未能形成输送充沛水汽的急流,降水量远小于台风“利奇马”,降水中心在台风路径的东侧。

南亚高压是北半球夏季出现在青藏高原及邻近地区 300~100 hPa 上的行星尺度高压系统。2019 年 8 月 10 日 8:00 台风“利奇马”登陆浙江时,南亚高压被贝加尔湖及以南的大槽和台风分裂为两个中心(见图 6a),一个在青藏高原西侧,另一个在日本海附近。台风“罗莎”在其东南方向,南亚高压和贝加尔湖大槽都较台风“麦莎”登陆时更为强盛。贝加尔湖大槽槽前有一风速超过 40 m/s 的西南急流,急流入口区右侧为辐散区(中心为  $8.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ )。

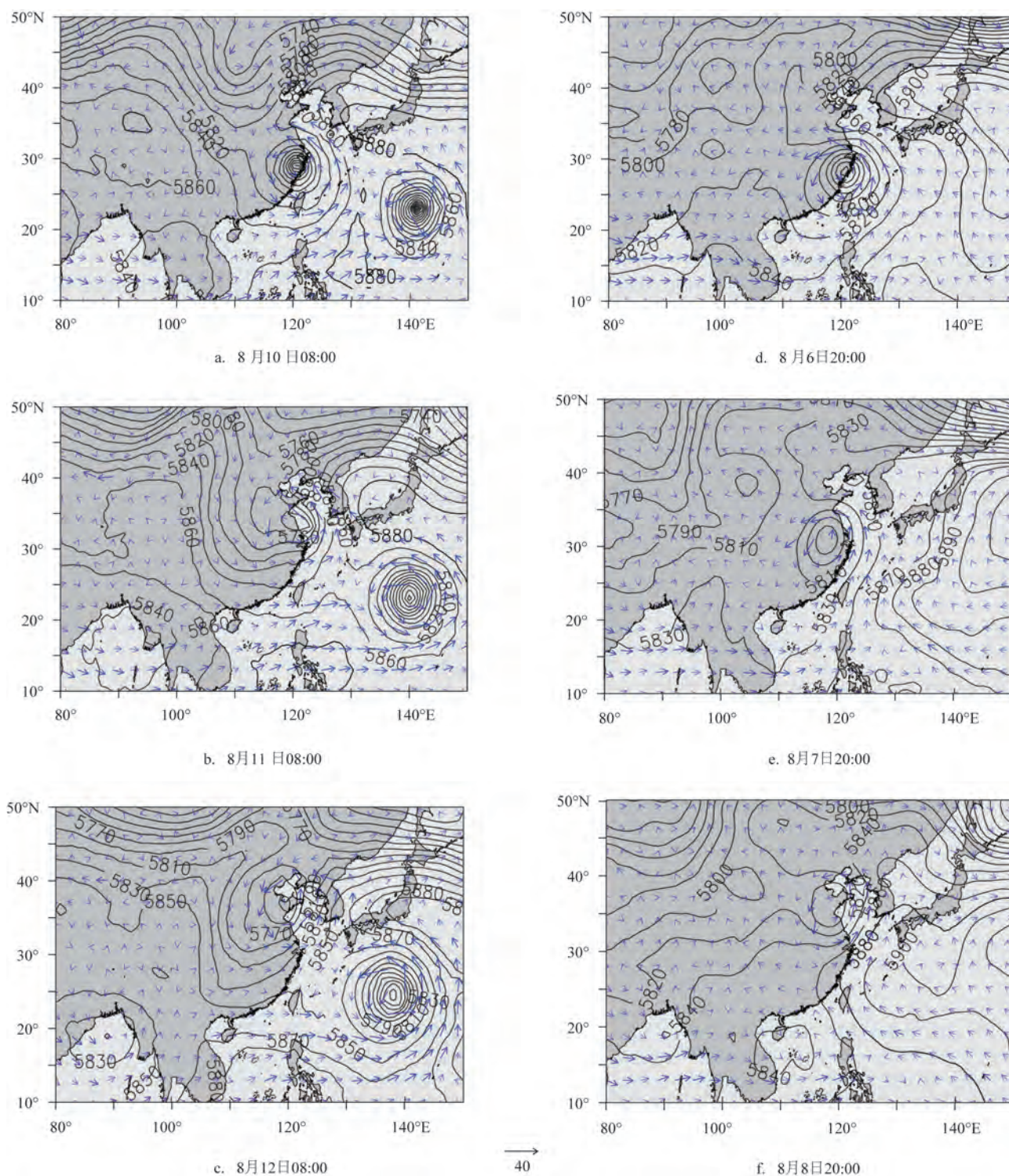


图4 台风“利奇马”(a—c,2019年)和台风“麦莎”(d—f,2005年)500 hPa位势高度场(等值线,单位:gpm)和850 hPa风场(箭头,单位:m/s)

Fig.4 The 500 hPa geopotential height field (contour, unit: gpm) and 850 hPa wind field (arrow, unit: m/s) during typhoon "Lekima" (a—c, 2019) and typhoon "Matsa" (d—f, 2005)



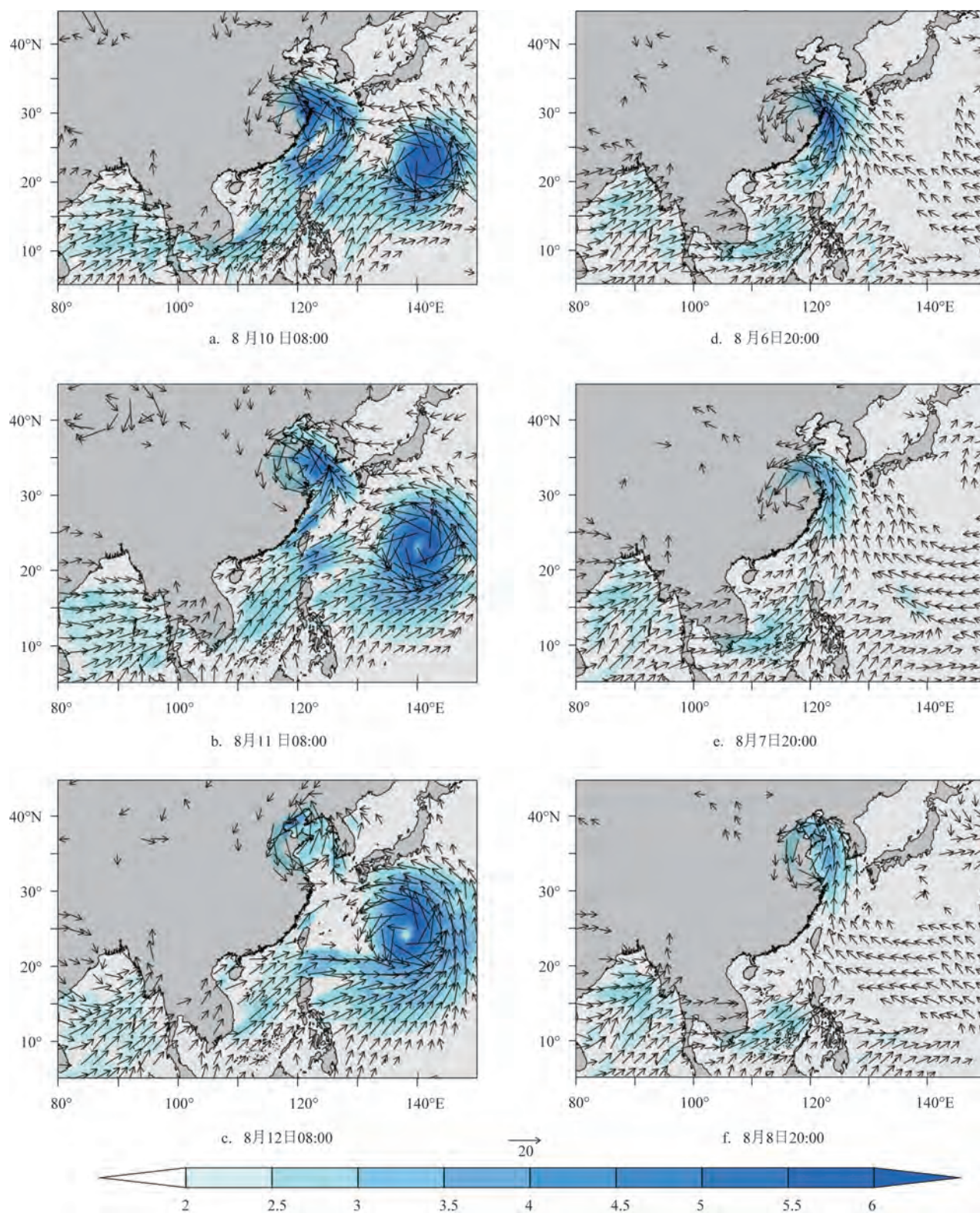


图5 台风“利奇马”(a—c, 2019年)和台风“麦莎”(d—f, 2005年)的950 hPa风场(箭头表示风速 $\geq 6$  m/s, 单位:m/s)、水汽通量(填色, 单位:g/kg·m/s)

Fig.5 The 950 hPa wind field (the arrow denotes velocity no less than 6 m/s, unit:m/s) and water vapor flux (color, unit:g/kg·m/s) during typhoon "Lekima" (a—c, 2019) and typhoon "Matsa" (d—f, 2005)



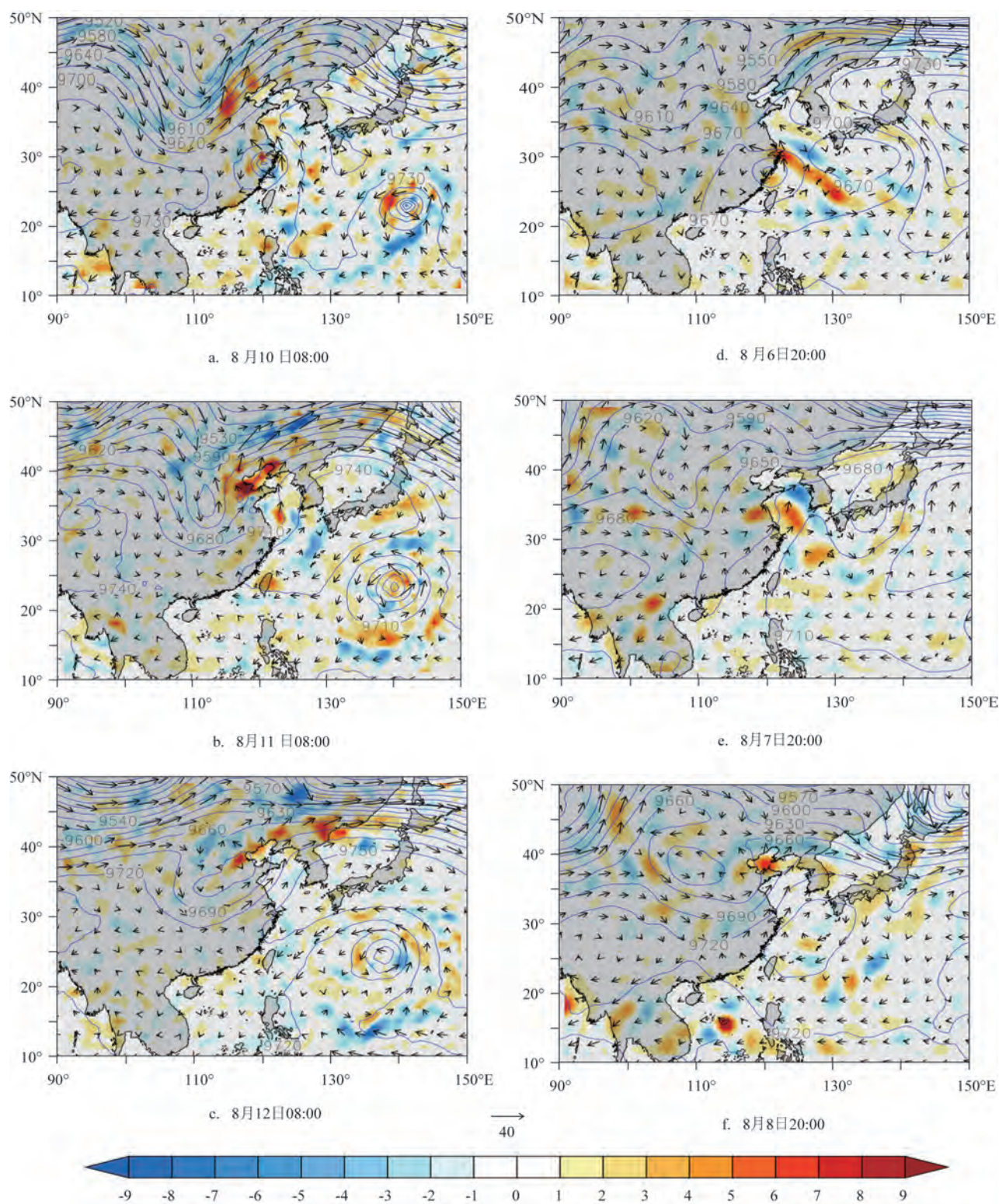


图6 台风“利奇马”(a—c, 2019年)和台风“麦莎”(d—f, 2005年)的300 hPa的高度场(等值线, 单位:gpm)、风场(箭头, 单位:m/s)以及散度场(单位: $10^{-4}/s$ , 红色部分为辐散区, 蓝色部分为辐合区)

Fig.6 The 300 hPa height field (contour, unit: gpm), wind field (arrow, unit: m/s) and the divergence field (color, unit:  $10^{-4}/s$ , red for divergence area and blue for convergence area) during typhoon "Lekima" (a—c, 2019) and typhoon "Matsa" (d—f, 2005)

研究证明<sup>[1]</sup>,高空急流入口区的次级环流在急流右侧会造成高空辐散低空辐合的上升运动,并与低层锋区相配合。雷达资料分析发现(图略),8月10日早上在山西和山东西部有东北-西南向的对流云带,并在鲁西造成局地强降水(见图3a),此时台风云带刚刚从鲁东南进入山东,显然不是一个系统造成的,此降水可能与高空急流入口区右侧辐散区对应的上升运动有关。随着台风向北移动靠近急流(见图6b),台风东部的南亚高压中心受北移台风“罗莎”的影响,稳定少动且强度增强,南亚高压西部中心沿西风带东移,贝加尔湖大槽因此加深且近乎停滞,此时槽区气压梯度增大。台风使对流层上层增暖<sup>[17]</sup>,根据热成风关系,可增强对流层上层的西南风。气压梯度增大和热成风合并使高空西南风速增大(中心风速57 m/s),气流高速流出,辐散中心增大( $1.6 \times 10^{-4}/s$ ),高空抽吸作用增强,垂直运动和低层辐合加强,形成深厚而强烈的上升运动,也使台风减弱且速度变慢。显然,台风与南亚高压、高空急流的配置和相互作用是鲁中地区降水增幅明显并持续的重要原因。台风“麦莎”虽然也伴有南亚高压和贝加尔湖槽的活动,但强度都明显偏弱,缺少高空急流和下游台风,辐散区弱且分散,不利于形成强烈的上升运动。

由此可见,台风环流与500 hPa副高、阻高、西风槽的相互作用、水汽输送的差异、300 hPa南亚高压的位置强度和下游台风及急流的不同位置,对登陆后台风暴雨的强度和分布均有重要影响。

## 5 台风“利奇马”和台风“麦莎”登陆前后动热力结构对比

本节分析台风自身的热力和动力结构,研究其对降水分布和强度的重要影响。图7a—c和7d—f分别给出了台风“利奇马”和台风“麦莎”中心附近的温度距平垂直剖面图。刚登陆时,台风“利奇马”维持一个对称且深厚的暖心结构,中心位于250 hPa附近,最大温度距平为6.1℃,是由水汽凝结释放的潜热加热作用造成的<sup>[15]</sup>,而强的潜热释放反映了较强的降水;随着台风“利奇马”向北移动,受下垫面摩擦影响,较强冷空气从西侧中高层逐渐侵入台风环流中,暖中心下降,结构变得松散,降水强度减

弱;之后暖中心向东偏离台风中心(见图7c),台风中心位于冷暖空气的分界处,此时的台风已经具有“半冷半暖”的锋面气旋非对称结构特点。台风“麦莎”登陆时暖心比台风“利奇马”弱得多(见图7d),温度距平梯度较台风“利奇马”小,垂直方向上热力不对称,冷空气从东侧低层侵入;向北移动过程中(见图7e),暖中心下降,更多的西侧冷空气加入,结构更松散,登陆山东前已经出现锋面气旋的热力不对称特点。

以上分析可知,登陆时台风“麦莎”的暖心结构强度明显弱于台风“利奇马”,登陆后暖心逐渐遭到破坏,登陆山东前已经出现锋面气旋的特征。台风“利奇马”的暖心结构维持时间更长,减弱缓慢,东侧的东南急流提供来自海洋的暖湿气流,有利于产生强降水,其凝结潜热释放使得暖心结构得以长时间维持,台风减弱缓慢。台风“麦莎”缺少低空急流的加入,是维持时间短和降水偏小的主要原因。

图8是台风“利奇马”和台风“麦莎”的涡度、散度以及垂直速度沿台风中心的纬向剖面图。涡度场上,台风“利奇马”登陆时(见图8a),中心涡度场维持一个深厚的垂直对称结构,强度明显比台风“麦莎”强,中心低层均为强辐合上升运动,达到400 hPa,强辐散区在200 hPa附近,符合成熟台风的基本结构;台风北移涡度随着台风强度的减弱而减小(图略),沿37°N做纬向剖面(见图8b),在台风“利奇马”北侧的强降水区上空发现一个随高度向西倾斜的辐合区,与深厚而强烈的上升运动叠加,向上达到400 hPa,甚至超过台风刚刚登陆时的强度,对应的强辐散区在300 hPa附近,与300 hPa高空急流入口区右侧的强辐散相吻合。随着台风“利奇马”继续向北移动,中心附近低层辐合强度及范围减小,仍然强于台风“麦莎”,上升运动依然旺盛,达到500 hPa,上空有明显的辐散区。低层辐合上升和高空辐散流出的这种配置结构在降水区长时间维持,是造成极端暴雨的主要动力因子。台风“麦莎”登陆时中心上空的涡度场分布均匀,散度场与垂直速度场呈明显不对称分布,除了台风中心低层辐合区外,另一个辐合中心在台风“麦莎”中心的东侧与上升运动区叠加,产生的次级环流造成海上降水;随着台风“麦莎”北上,涡度场减小,中心降低,浅薄的辐合区仅在台风中心存在,上升运动弱且向东远离台风中心,降水也向东偏离台风。因此登陆台风的热动力



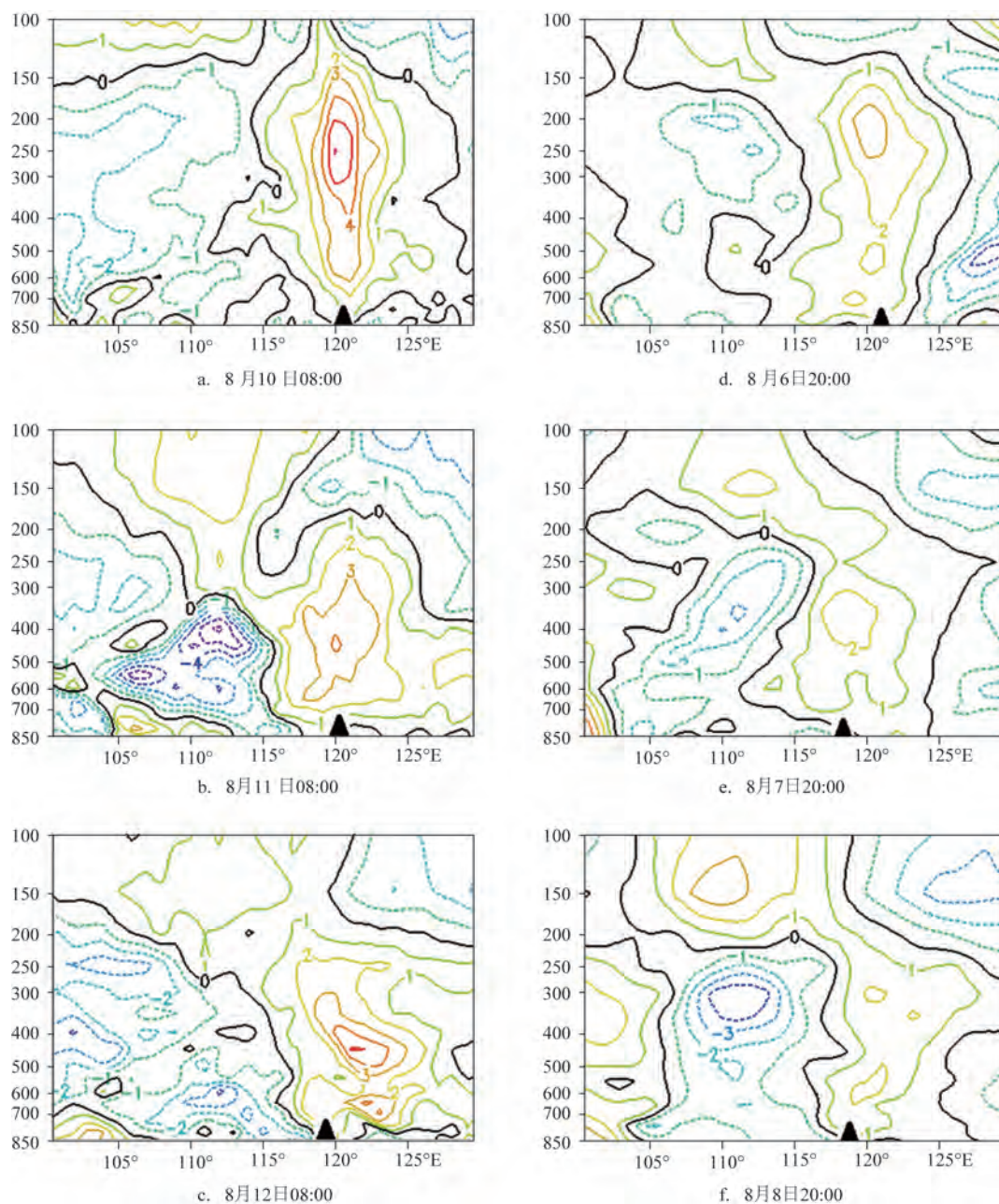


图7 台风“利奇马”(a—c,2019年)和台风“麦莎”(d—f,2005年)的温度距平场(单位:℃)沿台风中心的经向垂直剖面(▲为台风中心所在位置)

Fig.7 The meridional vertical profile of temperature anomaly field (unit: °C) crossing the typhoon center of typhoon "Lekima" (a—c, 2019) and typhoon "Matsa" (d—f, 2005) (The triangle is the location of the typhoon center)

结构的不同也是台风“利奇马”和台风“麦莎”降水分布特征不同的原因之一。

## 6 结论与讨论

台风“利奇马”和台风“麦莎”移动路径虽然相

似,但在山东产生的降水强度和分布差异明显。本文对两个台风的降水分布特征、大气环流形势、水汽输送、高空急流配置和动热力结构变化的异同点进行了分析。结论如下:

(1)大尺度环流差异是造成降水强度和分布差异的重要原因。台风“利奇马”与西风带深槽合并,

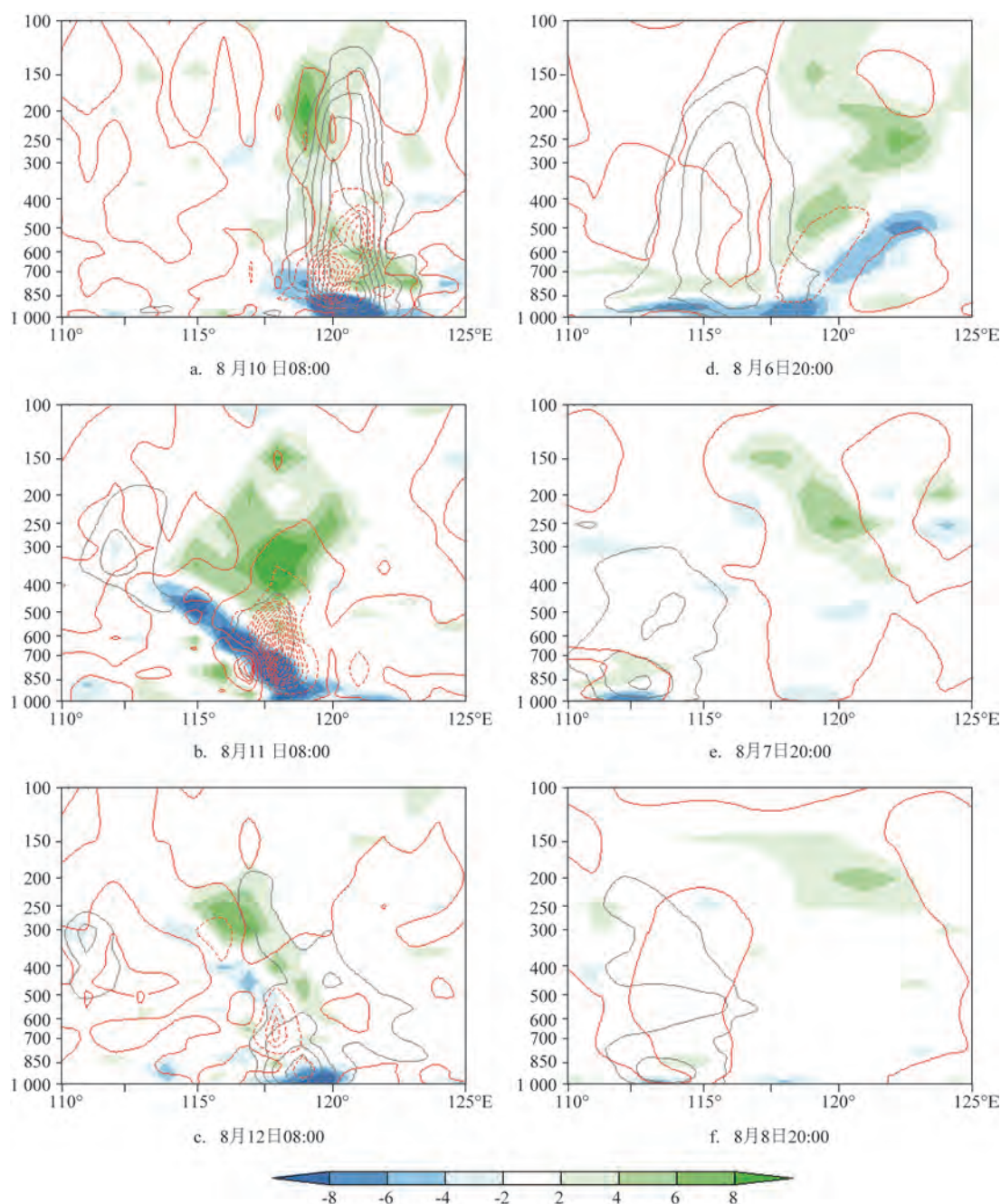


图8 台风“利奇马”(a—c, 2019年)和台风“麦莎”(d—f, 2005年)的垂直速度(单位:Pa/s, 红色线, 负值代表上升运动)、涡度(单位:  $10^{-4}/s$ , 黑色线, 实(虚)线为正(负)涡度)以及散度(单位:  $10^{-4}/s$ , 蓝色部分为辐合区, 绿色部分为辐散区)沿台风中心(b为沿  $37^{\circ}N$ )的纬向-垂直剖面

Fig.8 The zonal-vertical section along the typhoon center (b is along  $37^{\circ}N$ ) of the vertical speed (unit: Pa/s, red line, negative values for rising), vorticity (unit:  $10^{-4}/s$ , black line, solid for positive and dotted for negative) and divergence (unit:  $10^{-4}/s$ , blue for convergence area and green for divergence area) of typhoon "Lekima" (a—c, 2019) and typhoon "Matsa" (d—f, 2005)

有利于山东地区产生强降水,且降水分布偏向路径西侧;受下游台风“罗莎”阻挡,东北亚环流移动缓

慢停滞,提供了一个有利于降水长时间维持的背景场。台风“麦莎”受深入西风带的强盛副高影响,登



陆山东前降水稀少,登陆山东后受西南暖湿气流影响,产生强降水,但移动速度较快,降水不能长时间维持,降水量偏小。

(2)低空急流差异是导致降水强度和分布差异的重要因素。台风“利奇马”北侧的东南急流为降水区输送充沛水汽和不稳定能量,强水汽辐合中心在台风的西北侧,因此极端降水落区在路径的西侧;而台风“麦莎”更多是自身环流夹带的水汽,低层无急流,受海岸地形辐合影响,降水中心主要在路径的东侧。

(3)高空急流与台风的相对位置及其相互作用对降水有重要影响。台风“利奇马”高空急流入口区的次级环流造成的高空辐散低空辐合与台风系统相叠加,形成深厚而强烈的上升运动,导致降水显著增幅,也使台风系统减弱变缓;台风“麦莎”没有相应的高空急流,上升运动浅薄。

(4)台风动力和热力结构的不同也是造成降水分布特征不同的原因之一。台风“利奇马”东侧的持续东南急流使暖心结构得以长时间维持,系统减弱缓慢,降水持续时间长;台风“麦莎”缺少低空急流的影响,移动快,系统减弱快,降水偏小。另外,台风“利奇马”北侧的强辐合中心与旺盛的上升运动叠加的区域与暴雨区一致,与高空急流入口区右侧的强辐散相对应;台风“麦莎”低层辐合区浅薄且上升运动弱。

本文主要用天气学诊断分析的方法讨论了影响山东的两个路径相似台风的降水差异,所做的研究还较为初步。影响台风降水落区和强度的问题相当复杂,今后还需通过更多观测资料做中尺度分析诊断,并利用高分辨率数值模式进行更深入的研究。

## 参考文献:

- [1] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [2] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.
- [3] 杨玉华, 应明, 陈葆德. 近58年来登陆中国热带气旋气候变化特征[J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 689-696.  
Yang Y H, Ying M, Chen B D. The climatic changes of landfall tropical cyclones in China over the past 58 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(5): 689-696.
- [4] 罗小莉, 姚才, 谭金凯. 登陆华南台风的频数及强度变化特征分析[J]. *海洋预报*, 2018, 35(4): 58-67.  
Luo X L, Yao C, Tan J K. Analysis on numbers and intensity characteristics of typhoon landed in the South China[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(4): 58-67.
- [5] 张娇艳, 吴立广, 张强. 全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(4): 442-454.  
Zhang J Y, Wu L G, Zhang Q. Tropical cyclone damages in China under the background of global warming[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(4): 442-454.
- [6] 冯涛, 黄荣辉, 杨修群, 等. 2004年与2006年7~9月西北太平洋上空大尺度环流场与天气尺度波动的差别及其对热带气旋生成的影响[J]. *大气科学*, 2016, 40(1): 157-175.  
Feng T, Huang R H, Yang X Q, et al. Differences between the large-scale circulations and synoptic-scale waves in July-September 2004 and those in 2006 and their impacts on tropical cyclogenesis over the western North Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(1): 157-175.
- [7] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析[J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 840-850.  
Cheng Z Q, Chen L S, Li Y. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(5): 840-850.
- [8] 孙密娜, 杨洋, 姜皓严. 影响黄渤海区域两次北上台风的对比分析[J]. *海洋预报*, 2018, 35(5): 74-84.  
Sun M N, Yang Y, Jiang H Y. Comparative analysis of two northward typhoons affecting the Bohai and Yellow Sea areas[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(5): 74-84.
- [9] 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.  
Li Y, Chen L S, Xu X D. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(1): 91-98.
- [10] 方艳莹, 钱燕珍, 申华羽, 等. 1822号台风“山竹”引起浙江东北部大暴雨成因分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(4): 86-96.  
Fang Y Y, Qian Y Z, Shen H Y, et al. Causes analysis on the heavy rainfall in northeastern Zhejiang related to the typhoon “Mangkhut” (1822)[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(4): 86-96.
- [11] 丁治英, 张兴强, 何金海, 等. 非纬向高空急流与远距离台风中尺度暴雨的研究[J]. *热带气象学报*, 2001, 17(2): 144-154.  
Ding Z Y, Zhang X Q, He J H, et al. The study of storm rainfall caused by interaction between the non-zonal high level jet streak and the far distant typhoon[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2001, 17(2): 144-154.
- [12] 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.  
Cong C H, Wu W, Sun S S. Characteristics of tropical cyclones

- influencing Shandong Province from 1949 to 2012[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(5): 67-73.
- [13] 丁德平, 李英. 北京地区的台风降水特征研究[J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 864-874.
- Ding D P, Li Y. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoons[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(5): 864-874.
- [14] 杨亦萍, 刘力源, 倪钟萍, 等. ECMWF对不同天气形势下影响浙江台风的路径预报评估[J]. *海洋预报*, 2019, 36(2): 68-76.
- Yang Y P, Liu L Y, Ni Z P, et al. Evaluation on ECMWF typhoon track forecast that affects Zhejiang Province under different synoptic situation[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(2): 68-76.
- [15] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-105.
- Chen L S, Ding Y H. Introduction to the western Pacific typhoon [M]. Beijing: Science Press, 1979: 1-105.
- [16] Atallah E, Bosart L F, Ayyer A R. Precipitation distribution associated with landfalling tropical cyclones over the eastern United States[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(6): 2185-2206.
- [17] 丁一汇. 高等天气学[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2005: 138-149.
- Ding Y H. Advanced synoptic meteorology[M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 2005: 138-149.

## A comparison analysis of precipitation distribution over the eastern coastal area and their causes between two typhoons with similar paths

LI Jun<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>, JIA Rui<sup>1,2</sup>, TIAN Yunfei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031 China; 2. Zibo Meteorological Bureau of Shandong Province, Zibo 255000 China)

**Abstract:** Based on the reanalysis data of the National Centers for Environmental Prediction and precipitation data of the China Meteorological Administration observation stations, the significant difference of precipitation intensity and spatial distribution in the eastern coastal area during typhoon "Lekima" (1909) and typhoon "Matsa" (0509) are analyzed, and the characteristics of the large-scale circulation and dynamic thermal structural of the two landing typhoons with similar paths are compared in this paper. The results show that typhoon "Lekima" combined with the westerly trough in the central and western Shandong province (west of the typhoon path) and the vertical movement on the right side of the high-altitude jet inlet area induces a deep and strong upward movement. The low-altitude southeast jet on the east side of the typhoon constantly transports water vapor, which causes the significant increase of precipitation with a westward center and the slowing down of the typhoon intensity weakening. Meanwhile, the northeast Asian circulation is stable since it is blocked by the downstream typhoon, and the long-term maintenance of the precipitation system is another important reason for the extreme precipitation that breaks the historical record. Unlike typhoon "Lekima", there is no westerly trough and high-altitude jet in the large-scale circulation during typhoon "Matsa". The water vapor comes from the weakened typhoon circulation with shallow low-level convergence and weak ascending movement and the typhoon moves fast, which makes the precipitation during typhoon "Matsa" significantly less than that during typhoon "Lekima".

**Key words:** landing typhoon; the eastern coastal area; precipitation; water vapor transport; high-altitude jets