

登陆台风外围极端降水过程的中 α 尺度系统特征

李君^{1,2}, 胡晓琳^{1,2*}, 丛春华^{1,3}

(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; 3. 山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要: 采用全国多普勒雷达反射率因子拼图、山东省自动气象观测站数据, 结合 ERA5 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料, 分析台风“利奇马”造成山东极端暴雨的中 α 尺度系统特征。结果表明: 台风北侧东南急流与西风槽后偏西气流的切变引发的中 α 尺度辐合区是直接造成极端降水的中尺度系统; 对流始于 800~750 hPa, 随后沿西风槽向高层发展, 再伸展到低层, 在台风北侧低层切变附近强烈发展; 初始对流由低空急流触发, 后高空出流迅速增强, 促进上升运动发展, 高低空急流上下耦合的正反馈作用促进了中 α 尺度辐合区深度发展, 是极端降水发生发展的重要原因; 初始对流发生在对流不稳定环境中, 凝结潜热释放造成的湿斜压性和中低层垂直切变形成的条件性对称不稳定增长, 使对流发展为有组织而长时间维持的深对流; 水平风场将水汽汇集向暴雨区, 上升运动将水汽向中高层输送, 湿层逐渐增厚, 当水汽通量 $15 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 等值线向上伸展到 500 hPa 时, 降水强度超过 20 mm/h ; 鲁中山区地形是影响降水中心落区的重要因素。

关键词: 台风“利奇马”; 中 α 尺度系统; 高低空急流; 条件性对称不稳定; 水汽; 地形

中图分类号: P445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)06-0102-13

0 引言

台风暴雨是台风研究的重点和难点, 一直受到研究者的高度重视, 也取得了丰富的研究成果^[1-4]。当台风与中纬度环流系统如倒槽、西风槽等相互作用时, 往往能产生比台风环流本身降水大得多的暴雨^[5-11]。随着观测手段的提高, 大尺度系统相互作用引发的中尺度系统研究愈发受到关注^[12-13]。周玲丽等^[14]利用数值预报模式研究发现, 台风环流中冷暖空气的交汇处会形成一条很强的能量锋, 是中小尺度对流发生最活跃的区域; 多个台风暴雨模拟研究^[15]均发现在近地面存在与降水中心相对应的中尺度辐合带; 大气层结状况与暴雨系统的发生发展有着密切的关系, 学者利用湿位涡理论研究了登陆台风内部的中尺度对流系统的不稳定性在暴雨发展

中的作用, 并取得一些成果^[16-18]; 中尺度系统中水汽的水平辐合与垂直输送是中尺度对流系统发展不可缺少的条件之一^[19-20]。

山东地处中纬度区域, 受热带气旋影响每年暴雨平均发生 2.5 次, 杨晓霞等^[21]、丛春华等^[22-23]已经从台风影响路径、远距离暴雨等方面进行了深入研究。但是, 关于台风外围极端暴雨的中尺度系统研究仍然较少。

本文利用山东省国家气象站、区域自动气象站的降水量、探空资料、全国多普勒雷达反射率因子拼图、多点风廓线、雷达反演风场、欧洲中期天气预报中心 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的第五代大气再分析数据集 (ERA5) 等资料, 研究台风“利奇马”外围影响山东并引发极端暴雨的中 α 尺度系统的结构特点及其发展演变, 探讨极端降水过程中不同尺度系统的相互

收稿日期: 2022-09-20。

基金项目: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J015); 华东区域气象科技协同创新基金合作项目 (QYHZ201812); 山东省气象局引导类科研项目 (2021SDYD40)。

作者简介: 李君 (1968-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事灾害性天气中短期预报预警工作。E-mail: 810665680@qq.com

*通信作者: 胡晓琳 (1989-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事灾害性天气中短期预报预警工作。E-mail: 414297035@qq.com

作用,以期为类似极端降水的预报预警提供有益的参考。

1 台风“利奇马”给山东带来的降水

受1909号台风“利奇马”影响,山东省在2019年8月10—13日出现持续降水,平均降水量为170.3 mm,突破有记录以来的过程降水量极值,其中淄博市淄川区梨峪口的总雨量达676.3 mm。受灾地区遭受严重经济损失,5人死亡,7人失踪。8月

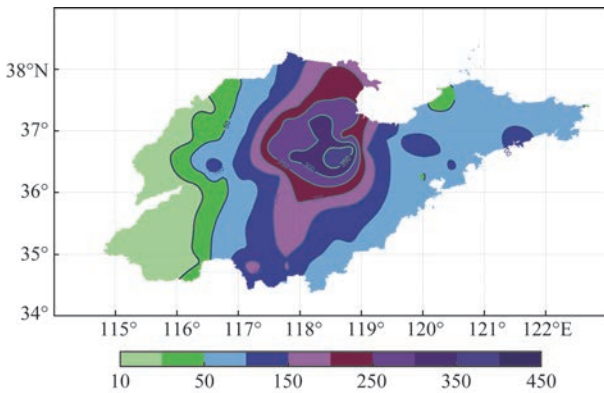


图1 山东省降水量分布图(2019年8月10日20时—11日20时,单位:mm)

Fig.1 Distribution of precipitation in the Shandong Province (20:00 on August 10th–20:00 on August 11th, 2019, unit: mm)

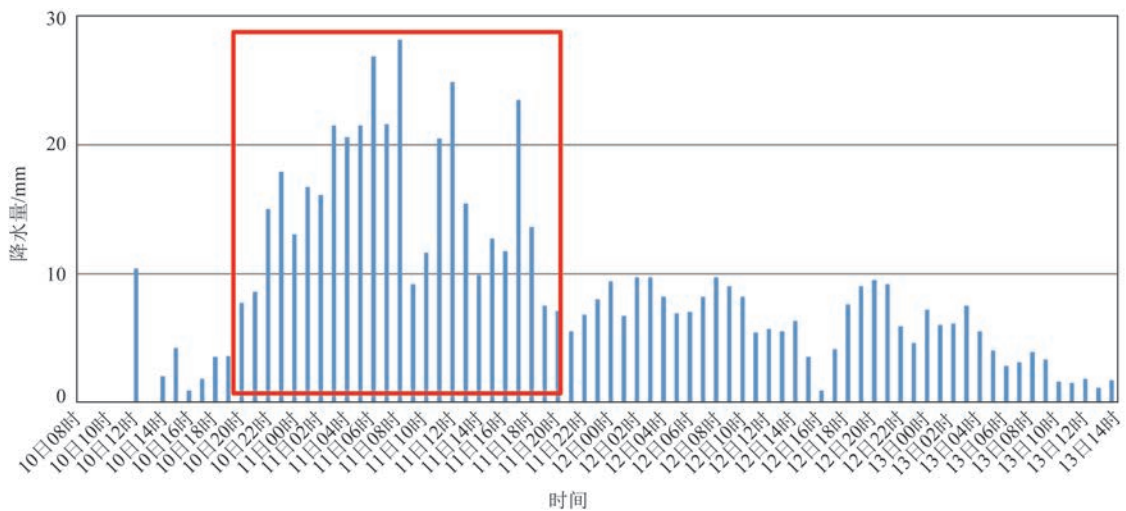
10日20时(北京时,下同)—11日20时,平均降水量为109.3 mm(见图1),占总降水量近7成,21个国家气象站日降水量突破历史极值,是降水最集中的时段(见图2),11日02—08时连续6 h的降水量超过20 mm/h。

2 环流背景

8月10日08时开始,台风“利奇马”登陆后沿副热带高压西侧偏南气流北上(见图3),另外一个台风“罗莎”(1910号)也向西北缓慢移动,贝加尔湖阻塞高压与副热带高压之间的深槽稳定少动,槽前西南气流与台风东侧的偏南气流逐渐汇合,11日08时减弱后的台风环流加入槽区。山东的极端强降水就发生在大尺度形势稳定少动、台风逐渐北上与西风带槽合并形成低涡期间(10日20时—11日08时)。环流形势稳定少动使降水长时间维持,是极端降水产生的重要因素。

3 降水过程的中 α 尺度系统

降水过程分为3个阶段。第一阶段,台风“利奇马”登陆时,回波呈轴对称的团状,东、北两侧有旺盛的螺旋雨带,山东西部西风槽呈带状分布,鲁东南和鲁中部分地区受台风外围螺旋雨带影响开始



注:红色框为10日20时—11日20时逐小时降水

图2 山东省淄博市淄川区西河镇梨峪口(118.07°E, 36.55°N)2019年8月10日06时—13日14时逐小时降水量(单位:mm)

Fig.2 Hourly precipitation at Liyukou, Xihe Town, Zichuan District, Zibo City, Shandong Province (118.07°E, 36.55°N) from 06:00 on August 10th to 14:00 on August 13th, 2019 (unit: mm)

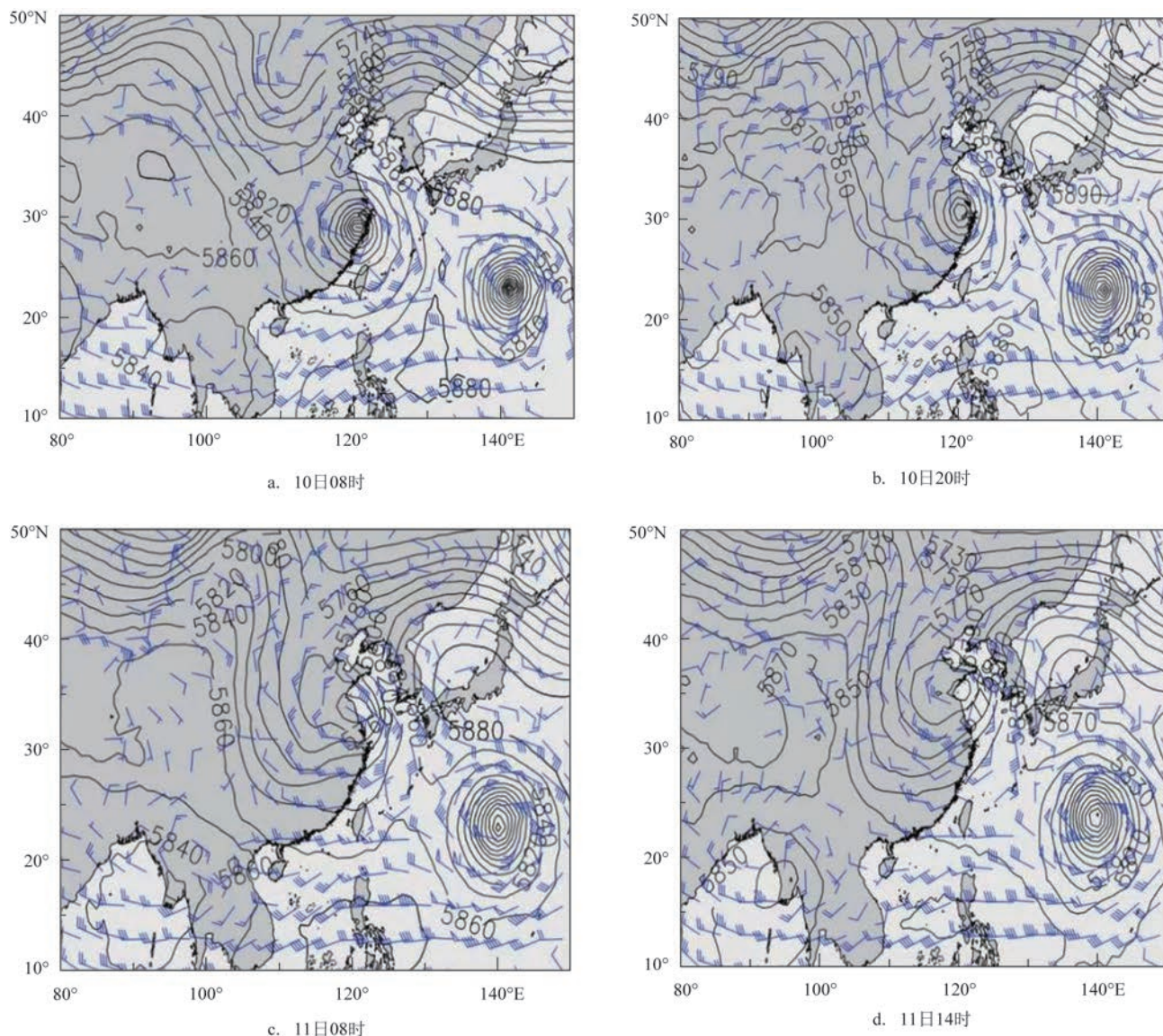


图3 2019年8月10—11日500 hPa高度场(黑色等值线,单位:位势米)和风场(风矢,大于12 m/s)

Fig.3 500 hPa height (black contour, unit: geopotential meter) and wind field (wind vector, greater than 12 m/s) from 10th to 11th, August 2019

出现降水;第二阶段,随台风逐渐北抬,窄带回波发展为长600~900 km、宽60~90 km的回波带,中心反射率因子大于40 dBz,具有中 α 尺度系统特征,受台风北侧中尺度回波带影响,鲁中地区出现连续强降水;第三阶段,11日08时后台风中心回波消散,台风环流出现温带气旋的逗点状回波特征,降水减弱。中尺度回波带及其长时间维持是造成此次强降水过程的直接原因,本文将以第二阶段为重点,从抬升触发、不稳定层结、水汽及地形影响等方面研究中 α 尺度系统的产生、发展和维持机制。

4 中 α 尺度系统的结构及其发展和维持机制

4.1 风场和散度场

700 hPa上,10日08时台风东北侧有东南气流与偏西气流的弱辐合区,对应鲁东南的螺旋雨带,西风槽对应鲁西的辐合区;随着台风北抬,14时东南气流增强为低空急流,两辐合区合并加强,在山东中部发展为一条东北-西南向辐合带,稳定少动,

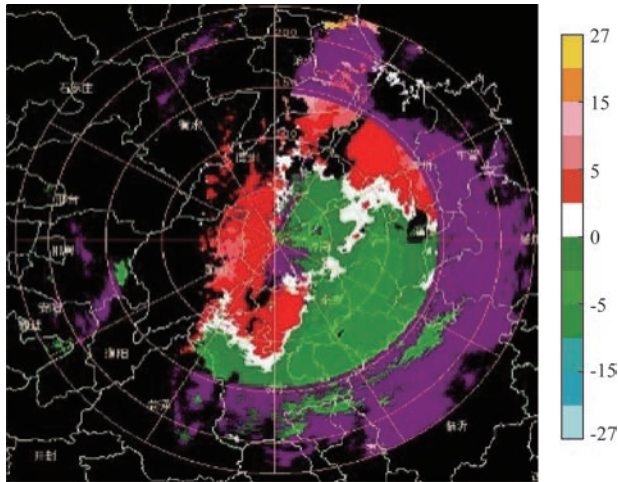


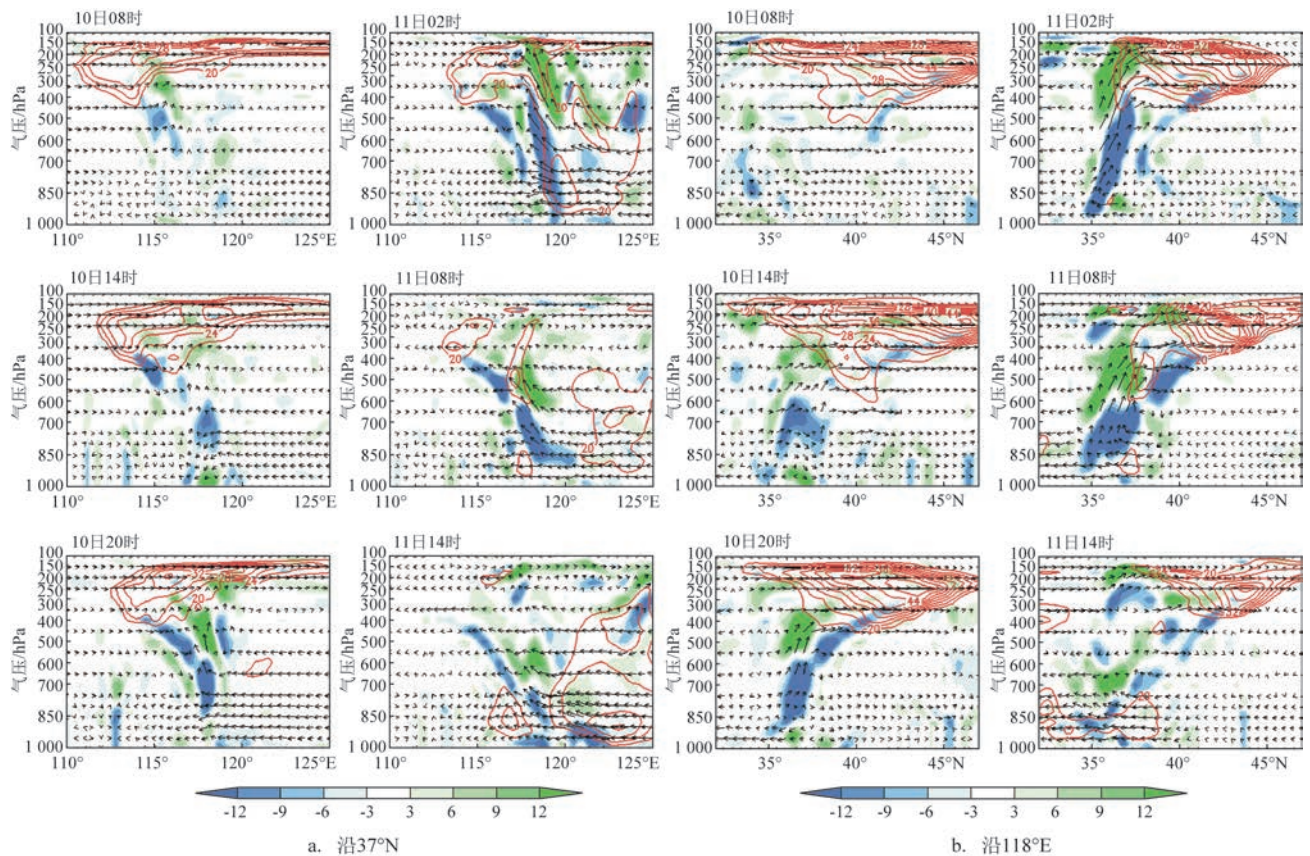
图4 2019年8月10日15时48分济南多普勒雷达1.5°径向速度(填色,单位:m/s)

Fig.4 Radial velocity (shaded area, unit: m/s) at 1.5° in Jinan at 15:48 on August 10, 2019

鲁中地区出现连续降水;10日20时—11日08时台风中心风速达到并超过32 m/s,辐合中心达到 $-3.0 \times 10^{-4}/s$,回波中心超过45 dBz,辐合区及低空急流的长时间维持造成持续性暴雨,形成突破历史记录的极端降水。辐合区的出现、发展和消失,均与雷达拼图上中尺度回波带的演变吻合,是直接造成极端降水的中尺度系统,雷达径向速度场上有一个从10日12:36—11日07:57长时间维持的切变与之配合。

4.2 高低空急流

中 α 尺度辐合区在强降水中具有关键作用。本节将结合三维风场和散度场重点分析中 α 尺度辐合区的发生发展和维持。如图5、6所示,10日08时,辐合开始于700~400 hPa西风槽附近(见图5),槽前西南气流与台风外围深厚的东南气流合并上升,



注:蓝色阴影部分为辐合区,绿色阴影部分为辐散区,下同

图5 降水区的水平风场(风矢,单位:m/s;红色等值线,大于16 m/s)和散度场(阴影,单位: $10^{-4}/s$)的垂直剖面图

Fig.5 The vertical section of the horizontal wind (wind vector, unit: m/s; red contour line: greater than 16 m/s) and divergence (shaded area, unit: $10^{-4}/s$) in the precipitation area

汇入 250 hPa 附近的高空急流(中心速度为 44 m/s); 10 日 14 时(见图 6), 高低空急流相伴增大, 低空急流与槽后中层偏西气流汇合上升(见图 6), 在 750 hPa 附近形成新的辐合区, 出现初始对流(雷达资料见图 7)。

研究证明^[22], 降水初期高空出流迅速增强能促进上升运动的快速发展和低层动量向高空输送。本次过程的初始对流发生于 10 日 08 时 50 分前(见图 7), 统计该时段内对流回波东侧的潍坊、青岛、烟台和西侧的天津、沧州、石家庄、滨州、济南、濮阳、徐州地区的 10 部资料相对完整的多普勒雷达风廓线数据。数据表明, 对流回波东侧 4~5 km 高度的东南气流在对流触发前 0~1 h 均增大到 16 m/s, 结合初始对流的位置和时间, 可以判断中层东南气流增强是初始对流触发的直接原因; 西侧高空(高度为 9.1~12.2 km)的西南气流在初始对流触发后 0.5~1.5 h 均有不同程度的增强, 距离初始对流越近, 风

速增强更早。低空急流增强在先, 并激发初始对流, 高空急流增强在后。

对流触发后, 高低空急流的耦合使东南急流和高空辐散持续加强, 上升运动可到达 200 hPa(见图 6), 西风槽上空辐合区发展并逐渐相连, 随后在逐渐北上的低层切变附近急剧加强延伸, 11 日 02 时形成了一个从地面—300 hPa、从东南向西北倾斜向上的中 α 尺度辐合区, 系统进入成熟期, 降水强度超过 20 mm/h。11 日 08 时, 低层辐合、高空辐散和垂直运动均达到峰值(见图 5、图 6), 但辐合中心和垂直运动高度下降, 下沉气流不再汇入上升气流, 辐合区两边的混合加强, 温度梯度减小; 之后, 低空东南急流随台风向北移动, 东北气流增大, 上升运动、辐合辐散明显减弱, 辐合区的垂直环流高度继续降低(见图 6), 强降水结束。

由以上分析可以看出, 低空急流与槽后中层偏西气流汇合上升可激发出初始对流, 高低空急流耦

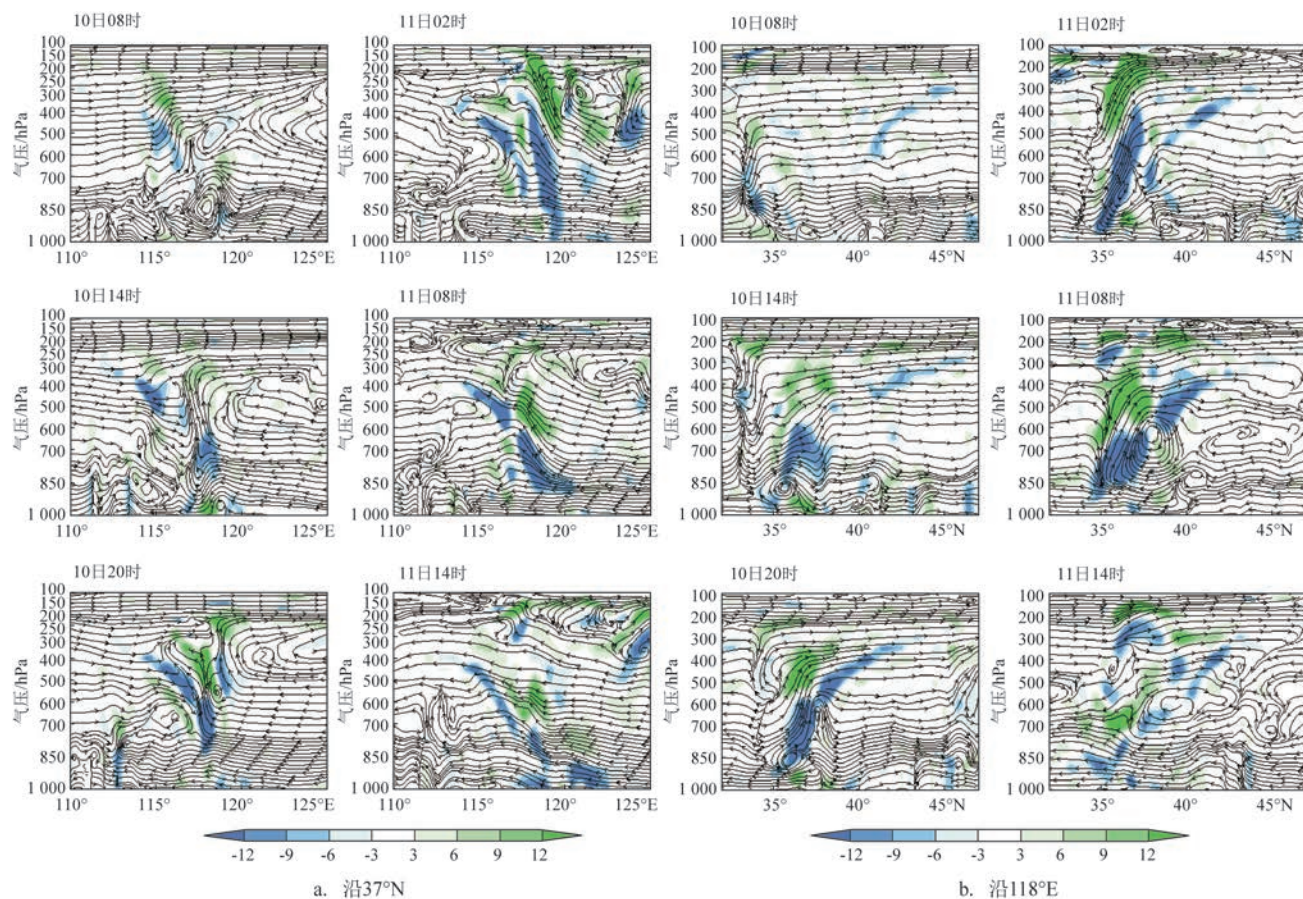


图6 降水区的垂直流场(箭头)和散度场(阴影,单位: $10^{-4}/s$)的垂直剖面图

Fig.6 The vertical section of the flow field (arrow) and diver-gence (shaded area, unit: $10^{-4}/s$) in the precipitation area

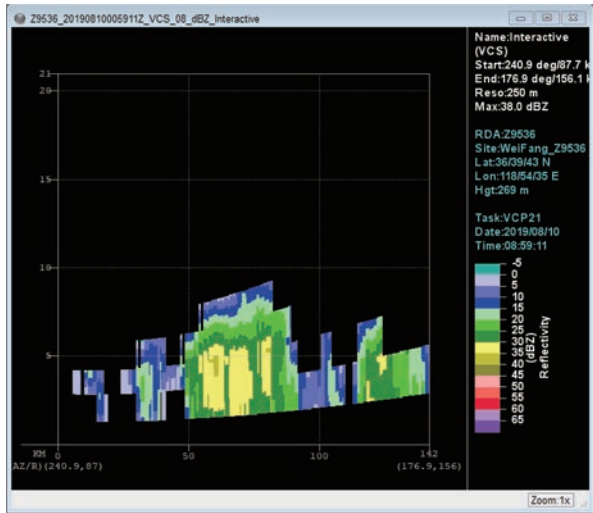


图7 2019年8月10日08时59分潍坊多普勒雷达反射率因子沿 36.2°N 的垂直剖面图

Fig.7 Vertical profile of reflectivity factor along 36.2°N in Weifang at 8:59 on August 10, 2019

合是初始对流持续发展的重要条件。

4.3 不稳定分析

4.3.1 对流不稳定分析

暴雨之前(8月10日08时)探空显示济南处于槽前西南气流中(见图8a),400 hPa以下为对流不稳定层结,对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)为545.5 J/kg,相当位温的垂直剖面在济南以西 116°E 附近有密集带(见图9a),相当位温梯度大,为冷暖气团交汇区域,对应减弱的西风槽,其西侧500 hPa以上为 $\partial\theta_e/\partial z > 0$ 的槽

后稳定层结;西风槽以东地区(包括济南)500 hPa相当位温随高度而降低, $\partial\theta_e/\partial z < 0$,与探空一致,说明此时该区域对流层低层处于较强的对流不稳定状态,一旦有对流触发即可产生强对流。西风槽后相当位温梯度小,为弱对流不稳定层结。10日10时槽前的对流不稳定区(鲁中地区)出现窄带回波,对流触发,降水开始。20时(见图5b)西风槽略向东移,接近降水中心,槽前垂直速度增大,降水加强,凝结潜热大量释放引起相当位温等值线下凹,济南低层转为偏东风(见图9b),500 hPa以下接近饱和,有丰富的水汽供应,CAPE=0,说明该站对流不稳定能量已经完全释放,降水却继续增强;11日02—08时(见图7c、7d)西风槽稳定少动,槽前垂直运动旺盛,达到200 hPa附近,槽前及附近产生持续性强降水,凝结潜热释放引起的相当位温等值线下凹面积扩大,降水强度达到最大。10日20时—11日08时,降水区大气变为弱对流不稳定层或中性层结,降水强度却并未减弱,反而有所加强。分析原因发现这与大气不稳定层结转变有关。

4.3.2 条件性对称不稳定分析

湿位涡表征了大气动力、热力属性,也考虑了水汽的作用,HOSKIN^[17]认为当垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多时,可以用湿位涡(M_{pv})的正负值诊断条件性对称不稳定,湿位涡为负($M_{pv} < 0$)说明大气存在条件性对称不稳定(Conditional Symmetric Instability, CSI)。p坐标系中,湿位涡可表示为^[18]:

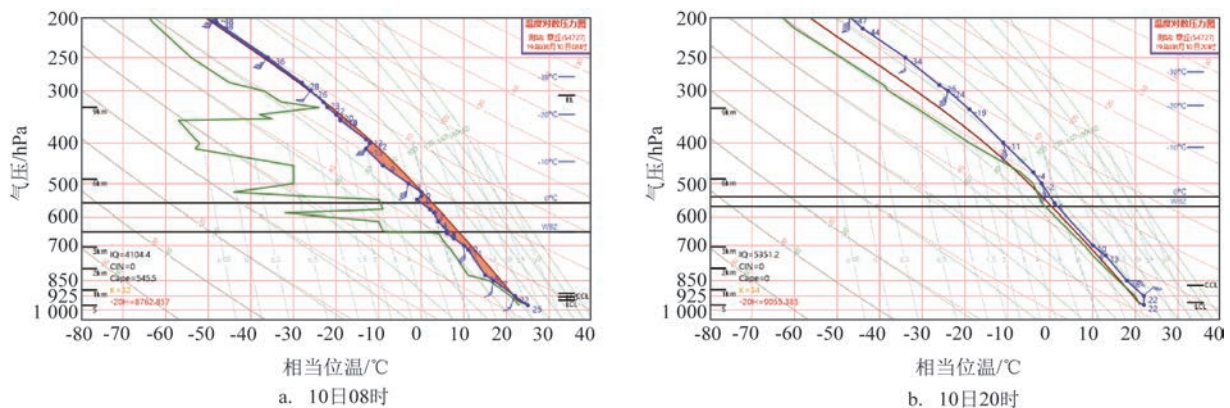


图8 济南的探空图

Fig.8 The sounding map of Jinan

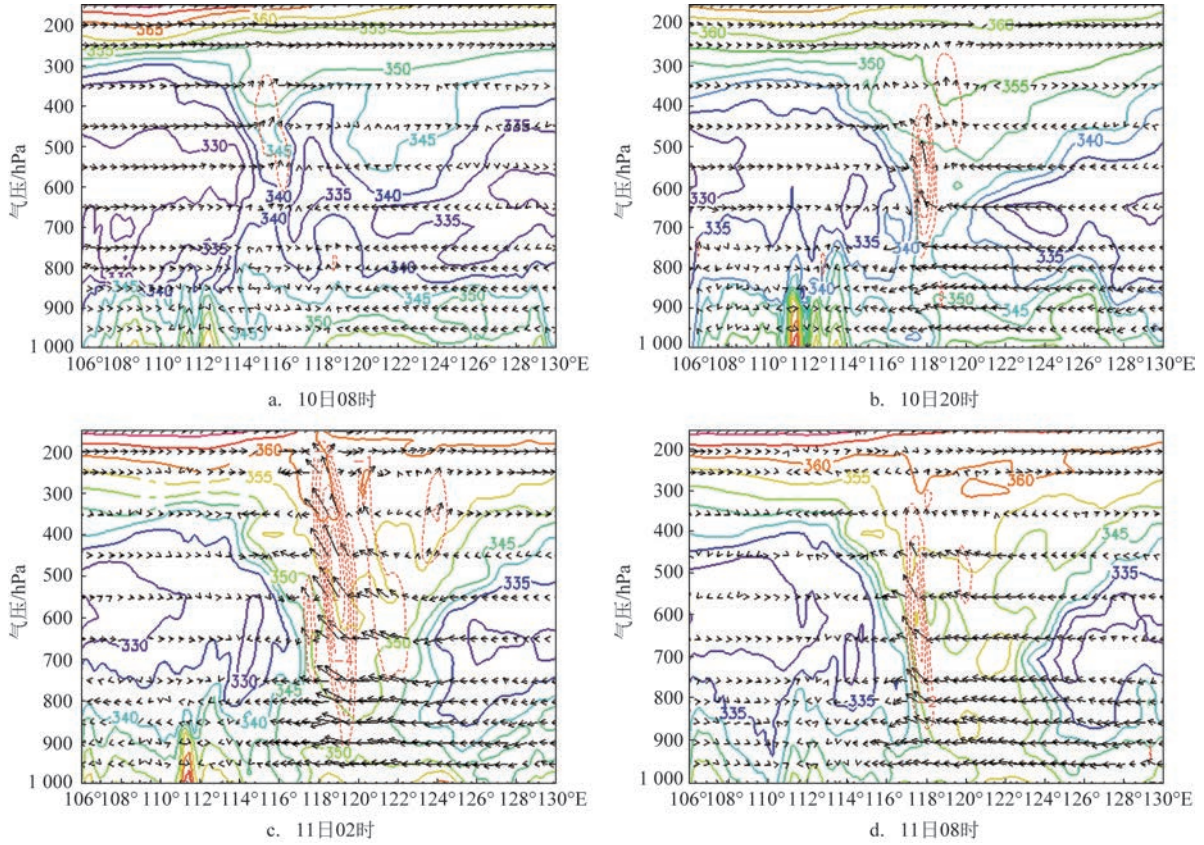


图9 沿暴雨中心的纬向相当位温(彩色等值线,单位:℃)、垂直速度(红色虚线,单位:m/s)和风场(风矢,单位:m/s)的垂直剖面图

Fig.9 The vertical profiles of zonal equivalent potential temperature (colored contours, unit: °C), vertical velocity (red dotted line, unit: m/s) and wind (wind vector, unit: m/s) along the storm center

$$M_{pv} = \frac{s \cdot \nabla \theta_e}{\rho} = -g(s + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\text{令: } M_{pv1} = -g(s + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \quad (2)$$

$$M_{pv2} = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \quad (3)$$

式中: M_{pv1} 为其正压项; g 为重力加速度; s 为相对涡度; f 为地转涡度; $\frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ 为相当位温的垂直梯度; M_{pv2} 为其斜压项; $(\frac{\partial v}{\partial p}, \frac{\partial u}{\partial p})$ 为风的垂直切变; $(\frac{\partial \theta_e}{\partial x}, \frac{\partial \theta_e}{\partial y})$ 为相当位温 θ_e 的水平梯度。

图10为降水中心(118°E, 37°N)的 M_{pv} 、 M_{pv1} 、 M_{pv2} 随时间的变化。降水前(见图10a),中心上空600 hPa以下的 $M_{pv1} < 0$,说明期间低层大气以对流

不稳定为主,高空600 hPa以上为对流稳定区,与前面的分析结论一致; M_{pv} 的分布与 M_{pv1} 相似,600 hPa以上 $M_{pv} > 0$,600 hPa以下 $M_{pv} < 0$; M_{pv2} 在0线附近,说明大气为弱条件对称不稳定,窄带回波在对流不稳定的低层大气触发,释放对流不稳定能量。10日20时(见图10b),750 hPa以下 M_{pv1} 明显增大,层结变为稳定或中性, $\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \approx 0$; M_{pv2} 的第一项 $g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \approx 0$,东南低空急流随台风北抬增强,雷达反演的风场显示(见图11a),此时3~5 km高度的最大风速超过24 m/s,低空水平风垂直切变增强,而相对位温的南北梯度较大即湿斜压性强,750~600 hPa的 M_{pv2} 负值区明显增强,条件性对称不稳定随之增强;此时 $M_{pv1} < 0$,条件性对称不稳定和对流不稳定同时存在,且以对流不稳定为主^[24],回波向高层发展,降水强度明显增大,超过10 mm/h。11日02时(见图

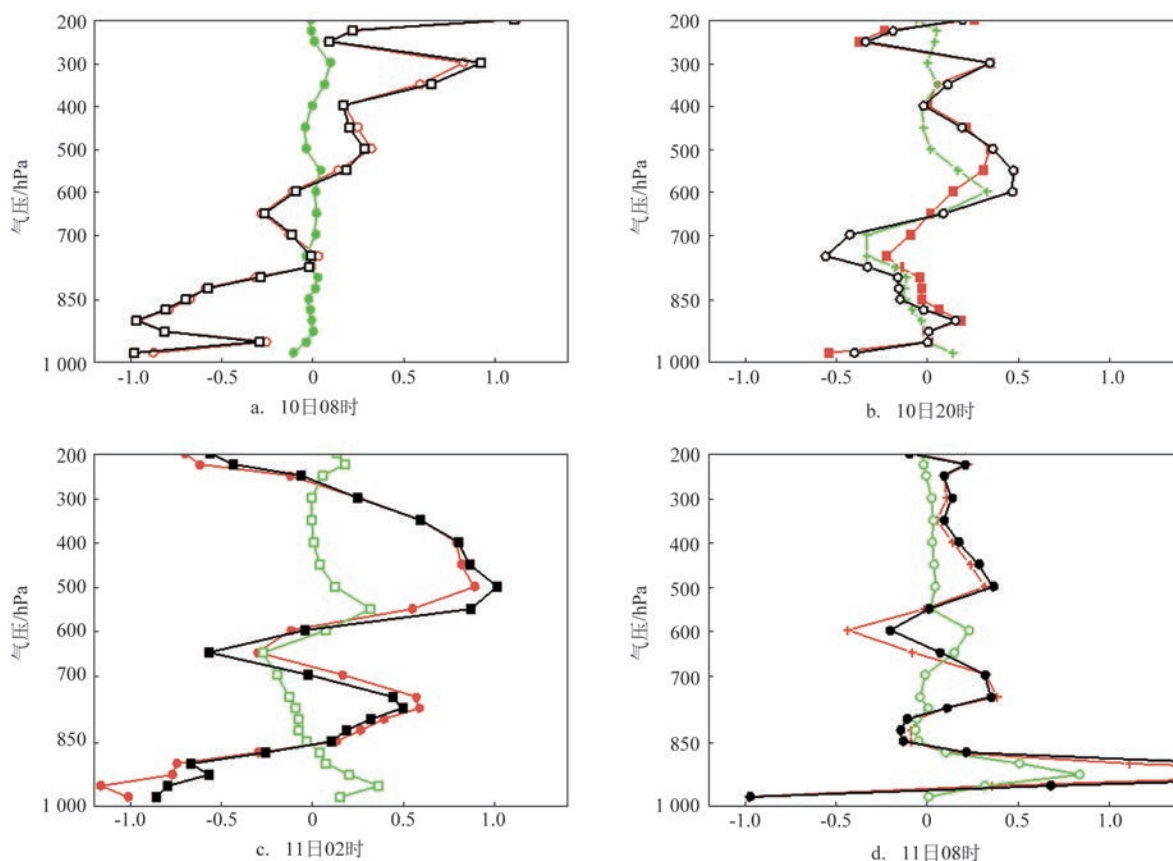


图10 降水中心(118°E, 37°N)的 M_{pv} (黑线)、 M_{pv1} (红线)、 M_{pv2} (绿线)随时间的变化(单位: $10^{-7}\text{m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$)

Fig.10 M_{pv} (black line) and M_{pv1} (red line), M_{pv2} (green line) of the precipitation center (118°E, 37°N) over time (unit: $10^{-7}\text{m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$)

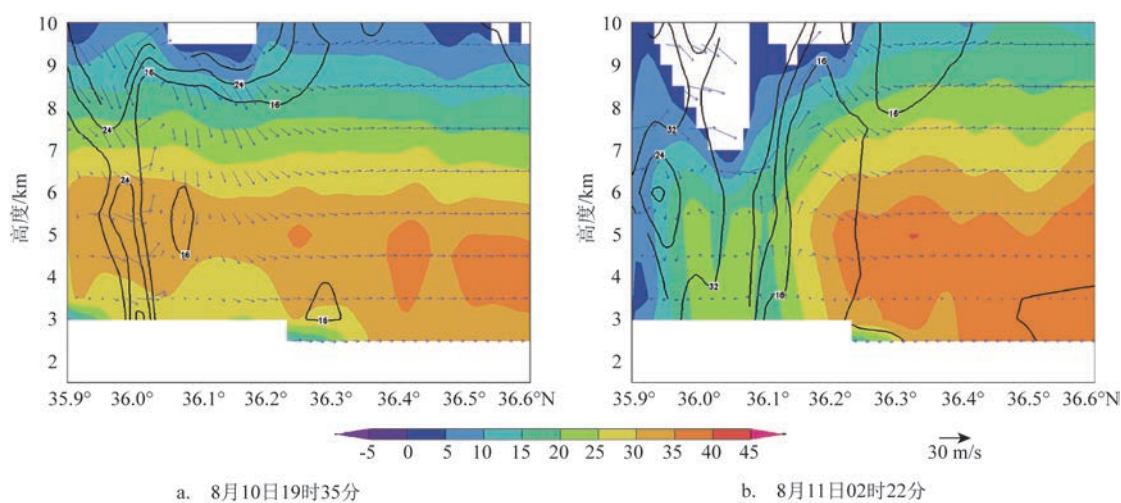


图11 济南多普勒雷达反演的垂直风场(风矢,单位:m/s)、反射率因子(填色,单位:dBZ)和等水平风速场(等值线,单位:m/s)
Fig.11 Vertical wind field (wind vector, unit: m/s), reflectance factor (shaded area, unit: dBZ) and constant velocity field (contour, unit: m/s) at Ji'nan

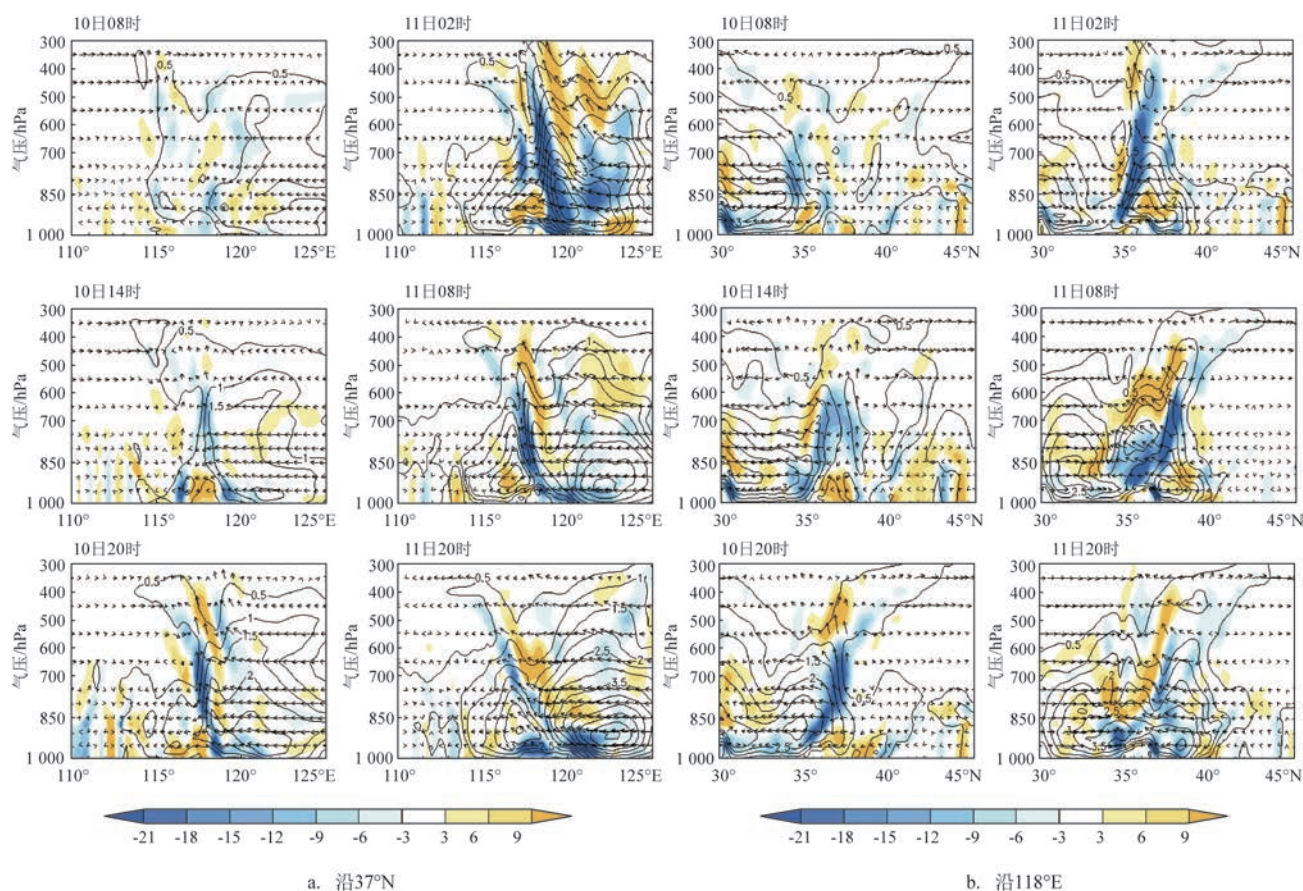
10c)东南低空急流继续增强,雷达反演的风场(见图11b)也证明,4 km高度以下转为东北风,4~5 km高度的东南风风速超过32 m/s,相对位温的南北梯度增大,湿斜压性和水平风垂直切变同时增强,850~600 hPa之间的 M_{pv2} 负值区继续增大,此时降水中心上空存在较强的条件对称不稳定,降水强度开始持续超过20 mm/h,800 hPa以下受低空急流输送暖湿气流而产生浅薄的对流不稳定将被不断地释放出来,系统发展为深厚的对流。11日08时(见图10d),低层急流减弱,相对位温梯度减小,850 hPa以下 M_{pv} 、 M_{pv1} 、 M_{pv2} 均远大于0,对流稳定、条件性对称稳定,降水强度显著减弱,850~750 hPa的 $M_{pv2} < 0$,降水仍在持续。

由此可见,初始对流在对流不稳定环境中触

发,凝结潜热释放引起的湿斜压性和对流层中低层垂直切变导致的条件性对称不稳定增长,使对流发展为有组织而长时间维持的深对流。

4.4 水汽

图12为水汽通量、水汽通量散度和风场的垂直剖面图。从图中可以看出,系统成熟时水汽输送中心在750 hPa附近(水汽通量为 $48 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$),水汽辐合中心与中尺度辐合中心高度吻合,随着东南急流增大,大量的水汽向山东地区集中,受到低层切变阻挡,在切变东南侧的鲁中地区辐合加强(水汽通量散度中心值达到 $-5.0 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$);850 hPa比湿为14~16 g/kg(图略),与2018年给山东带来大暴雨的台风“温比亚”(1818号)^[25]相比,台



注:蓝色阴影为水汽通量辐合,橙色阴影为水汽通量辐散

图12 水汽通量(等值线,单位: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)和水汽通量散度(填色,单位: $10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)和风场(箭头,单位: m/s)的垂直剖面图

Fig.12 The vertical profile of water vapor flux (contour, unit: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$) and water vapor flux divergence (shaded area, unit: $10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$) and wind (arrow, unit: m/s)

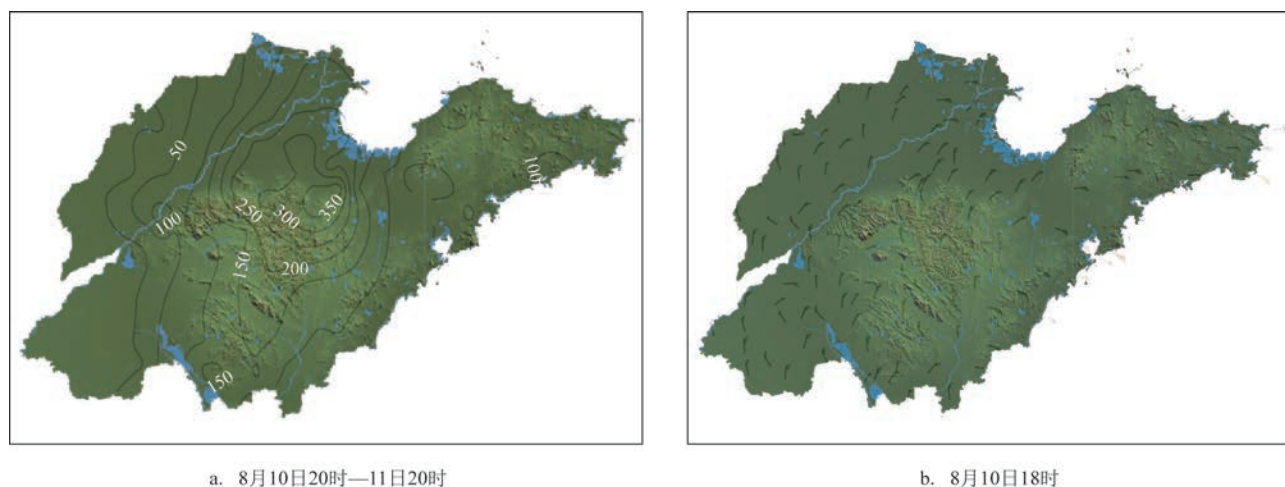


图13 山东省降水量(等值线,单位:mm)、风场分布(风羽)和地形图

Fig.13 Precipitation (contour, unit: mm) and wind (barb) in the Shandong Province and topographic map

风“利奇马”具有更大的水汽通量、比湿和发展高度,因此带来了更多的降水。

850 hPa水汽通量散度小于 $-10 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 的区域与暴雨区有较好的对应关系,可为类似的台风暴雨预报预警提供参考。

10日08时(见图12),西风槽附近水汽通量较小,对应降水较弱。10日14时,东南急流前端形成上升支,湿层明显向上伸展,15 $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 等值线到达600 hPa,对应窄带回波。10日20时,15 $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 等值线继续向上伸展到550 hPa,低层水汽通量和散度也显著增加,水汽辐合增强,降水强度开始增大;11日02时,15 $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 等值线伸展到500 hPa,水汽向高层输送,降水强度增加到20 mm/h以上并持续6 h,15 $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 等值线维持在500 hPa与20 mm/h的降水中心强度有很好的对应关系。上升运动将水汽输送到中高层,湿层增厚,降水强度增大。

4.5 地形

地形作用是影响中尺度天气过程的重要因子之一。降水中心区沿着鲁中地区从鲁北延伸至鲁南(见图13a),与呈东北—西南向的中 α 尺度辐合区发生的时间、位置、走向一致。另外,降水量等值线沿鲁中山区有一条东西向的脊线,降水量相对较大。与地面风场(见图13b)结合分析发现,台风在北抬过程中,其北侧边界层为东北气流,在山区北

侧出现气旋性偏转,转为西北气流,沿山区北麓产生风向辐合,与地形强迫抬升产生的垂直运动相叠加,有利于上升运动使降水增强;与中 α 尺度系统降水带相交的山区东部有特殊的喇叭口地形,地形辐合与强迫抬升作用尤其强烈,出现强降水中心(见图13a)。山区南麓的背风坡降水强度相对较弱。半岛地区处于台风的东侧,边界层为东南气流,降水中心多出现在半岛丘陵的南侧迎风坡。

5 结论

本研究对台风“利奇马”在山东地区造成的极端暴雨过程的中 α 尺度特征进行了分析。结果表明:

①台风环流北侧的东南气流与西风槽后偏西气流的切变引发的中 α 尺度辐合区是直接造成极端降水的中尺度系统;对流始于800~750 hPa,随后沿西风槽向高层发展,再伸展到低层,在台风北侧低层切变附近强烈发展。

②初始对流由低空急流触发,随后伴有高空出流迅速增强,促使上升运动快速发展,高低空急流上下耦合的正反馈作用促进中 α 尺度辐合区深度发展,是极端降水发生发展的重要原因。

③对流在不稳定环境中触发,凝结潜热释放引起的湿斜压性和对流层中低层风垂直切变导致的条件性对称不稳定增长,使对流发展为有组织且长

时间维持的深对流。

④鲁中山区地形产生的迎风坡抬升、风绕流复合影响了降水分布,尤其是降水中心的落区。

⑤水平风场将水汽向暴雨区汇集,上升运动将水汽输送到中高层,湿层增厚,降水强度增大。水汽辐合中心在 750 hPa 附近,而非在边界层。当水汽通量 $15 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 等值线向上伸展到 500 hPa 时,降水强度超过 20 mm/h。

参考文献:

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
CHEN L S, DING Y H. An introduction to typhoons in the western pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [2] 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 热带气旋动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
CHEN L S, XU X D, LUO Z X, et al. Introduction to tropical cyclone dynamics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.
- [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] 任福民, 杨慧. 1949 年以来我国台风暴雨及其预报研究回顾与展望[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 526-540.
REN F M, YANG H. An overview of advances in typhoon rainfall and its forecasting researches in China during the past 70 years and future prospects[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 526-540.
- [5] 杜惠良, 黄新晴, 冯晓伟, 等. 弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响[J]. 气象, 2011, 37(7): 847-856.
DU H L, HUANG X Q, FENG X W, et al. The effect of the interaction between weak cold flow and typhoon depression on a rainstorm[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(7): 847-856.
- [6] 朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究[J]. 大气科学, 2000, 24(5): 669-675.
ZHU H Y, CHEN L S, XU X D. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(5): 669-675.
- [7] 阎琦, 孙欣, 崔锦, 等. 1210 号台风所致的持续性暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(4): 319-328.
YAN Q, SUN X, CUI J, et al. Analysis of the extreme persistent hazard rainstorm under the influence of 1210 Typhoon[J]. Torrential Rain and Disasters, 2017, 36(4): 319-328.
- [8] 钮学新, 杜惠良, 滕代高, 等. 影响登陆台风降水量的主要因素分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 76-80.
NIU X X, DU H L, TENG D G, et al. Main factors affecting the rainfall caused by landing typhoons[J]. Torrential Rain and Disasters, 2010, 29(1): 76-80.
- [9] 董美莹, 陈联寿, 郑沛群, 等. 登陆热带气旋暴雨突然增幅和特大暴雨之研究进展[J]. 热带气象学报, 2009, 25(4): 495-502.
DONG M Y, CHEN L S, ZHENG P Q, et al. Research progress on abrupt intensification of heavy rainfall and super heavy rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, 25(4): 495-502.
- [10] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆热带气旋海马(0421)变性加强的诊断研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 628-641.
CHENG Z Q, CHEN L S, LI Y. Diagnosis of the extra-tropical transition of landfalling Tropical Cyclone Haima (0421)[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(4): 628-641.
- [11] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 602-615.
LEI X T, CHEN L S. Tropical cyclone landfalling and its interaction with mid-latitude circulation systems[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(5): 602-615.
- [12] 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 9406 号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 31-39.
MENG Z Y, XU X D, CHEN L S. Mesoscale characteristics of the interaction between TC TIM(9406) and mid-latitude circulation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(1): 31-39.
- [13] 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. 气象学报, 2009, 64(1): 57-71.
SUN J H, QI L L, ZHAO S X. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in north China by “9608” Typhoon[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(1): 57-71.
- [14] 周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 0713 号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析[J]. 大气科学, 2011, 35(6): 1046-1056.
ZHOU L L, ZHAI G Q, WANG D H, et al. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 Typhoon Wipha[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(6): 1046-1056.
- [15] 周玲丽, 翟国庆, 何斌. 登陆台风暴雨与中尺度辐合带关系的研究[C]//中国气象学会 2008 年年会天气预报准确率与公共气象服务分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008.
ZHOU L L, ZHAI G Q, HE B. Research on the relationship between landfalling typhoon storm and mesoscale convergence zone[C]//Beijing: Chinese Meteorological Society, 2008.
- [16] 徐文慧, 倪允琪, 汪小康, 等. 登陆台风内中尺度强对流系统演变机制的湿位涡分析[J]. 气象学报, 2010, 68(1): 88-101.
XU W H, NI Y Q, WANG X K, et al. Moist potential vorticity analysis of the evolution mechanism of a strong mesoscale convective system in a landing typhoon[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(1): 88-101.
- [17] HOSKINS B J. The role of potential vorticity in symmetric

- stability and instability[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1974, 100(425): 480-482.
- [18] 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): 387-405.
- WU G X, CAT Y P, TANG X J. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 53(4): 387-405.
- [19] 辜旭赞, 徐明. 一次西南涡特大暴雨的中尺度诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(4): 1-7.
- GU X Z, XU M. A meso-scale diagnostic analysis of torrential rain caused by a southwest vortex in China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(4): 1-7.
- [20] 李启华, 陆汉城, 钟玮, 等. 双台风条件下水汽的中尺度输送特征与收支诊断[J]. 物理学报, 2018, 67(3): 039201.
- LI Q H, LU H C, ZHONG W, et al. Meso-scale transport characteristics and budget diagnoses of water vapor in binary typhoons[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(3): 039201.
- [21] 杨晓霞, 陈联寿, 刘诗军, 等. 山东省远距离热带气旋暴雨研究[J]. 气象学报, 2008, 66(2): 236-250.
- YANG X X, CHEN L S, LIU S J, et al. A study of the far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong Province[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(2): 236-250.
- [22] 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.
- CONG C H, CHEN L S, LEI X T, et al. A study on the mechanism of the tropical cyclone remote precipitation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(4): 717-727.
- [23] 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.
- [24] 伍荣生, 高守亭, 谈哲敏. 锋面过程与中尺度扰动[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- WU R S, GAO S T, TAN Z M. Frontal process and mesoscale disturbance[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- [25] MOORE J T, LAMBERT T E. The use of equivalent potential vorticity to diagnose regions of conditional symmetric instability[J]. Weather and Forecasting, 1993, 8(3): 301-308.
- [26] 郑怡, 杨晓霞, 孙晶. 台风“温比亚”(1818)造成山东极端降水的成因分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 106-115.
- ZHENG Y, YANG X X, SUN J. Causal analysis of extremely heavy precipitation in Shandong Province caused by Typhoon RUMBIA (2018)[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 106-115.

Alpha mesoscale characteristics of extreme precipitation processes outside landfall typhoons

LI Jun^{1,2}, HU Xiaolin^{1,2*}, CONG Chunhua^{1,3}

(1. Key laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Ji'nan 250031, China; 2. Zibo Meteorological Bureau of Shandong Province, Zibo 255000, China; 3. Shandong Meteorological Observatory, Ji'nan 250031, China)

Abstract: This paper uses puzzles of the national Doppler radar reflectivity, data from regional automatic weather observation station, combined with NCEP / NCAR 6-hour daily re-analysis data, to analyze the mesoscale convective system that caused extreme rainstorms in Shandong by Typhoon "Lekima" and found: The mesoscale convergence system caused by the shear of the southeast jet on the north side of the typhoon and the westward airflow after the westerly trough is the mesoscale system that directly causes extreme precipitation. Convection starts from 800~750 hPa and then develops along the westerly trough to the upper layers, Extending to the lower level, it develops strongly near the low-level shear on the north side of the typhoon. The initial convection was triggered by the low-level jet stream, and the outflow increased rapidly after the upper level, promoting the development of upward motion. The coupling positive feedback effect of the upper and lower air jet stream promoted the depth development of the middle α scale convergence zone, which is an important reason for the development of the extreme precipitation. During the development of the mesoscale system, there is an obvious high-level dry and cold air intrusion from the northwest, and the upper layer is ahead of the lower, which is

conducive to the enhancement of instability and promotes the formation and development of mesoscale system, which in turn increases precipitation. When the height of dry and cold air invades into 500 hPa, initial convection appears. The lower intrusion height, the more precipitation, and the most precipitation appears in the boundary layer. The horizontal circulation concentrates the water vapor to the heavy rain area. The vertical upward movement of the mesoscale convergence system transports the water vapor to the middle and upper layers, and the wet layer gradually thickens. When the contour of the water vapor flux $15 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ extends upward to 500 hPa, the precipitation intensity increases to more than 20 mm/h. The terrain of central Shandong mountain is an important factor affecting the central precipitation area.

Key words: Typhoon "Lekima"; alpha mesoscale; high and low jet; conditional symmetrical instability; water vapor; terrain