

高晓梅,任广治,王向前,等.2018年山东一次极端暴雨的环境场特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(5):56-63.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



2018年山东一次极端暴雨的环境场特征分析

高晓梅^{1,2},任广治^{1*},王向前³,邢丽珠⁴,丛春华¹,袁静²

(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.潍坊市高密中等专业学校,山东 高密 261500;4.枣庄市气象局,山东 枣庄 277800)

摘要:利用多源气象数据资料,对2018年8月17—20日台风“温比亚”引发山东历史极端暴雨的环境场进行研究。结果表明:(1)台风“温比亚”影响山东,引起的前期强降水位于鲁南地区,主要为台风外围螺旋云系降水,19日白天至夜间是此次强降水主要时段,主要受台风和西风槽相互作用引起,落区主要集中于台风倒槽附近。(2)副高稳定少动、中低纬系统相互作用及低空急流的稳定维持是此次台风强降水的主要原因。(3)超低空急流相比低空急流对出现强降水更具指示意义,强度大小影响降水的强弱程度,且超低空(500 m以下)出现 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的强风速对短时强降水有明显指示作用。低空急流指数对强降水特别是中小尺度强降水及雨强大小有一定预示作用。(4)特殊地形在此次台风暴雨中有较大作用,地形的迎风坡效应在山地产生的强迫抬升作用及山脉阻挡引起的水汽在山前积聚等动力和热力共同作用触发湿对流是此次台风出现短时强降水的重要触发机制。(5)此次台风暴雨过程 Q 矢量散度负值的强弱对于未来6 h雨强大小有较好的指示意义。另外,此次台风特大暴雨与冷空气密切相关。

关键词:台风;极端暴雨;低空急流指数; Q 矢量散度

中图分类号:P458.121.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-0799(2023)05-0056-08

台风造成的灾害主要由暴雨、大风和风暴潮引起,易导致人员伤亡,经济损失巨大^[1]。近年来,山东台风暴雨引发的洪涝灾害给社会经济生活造成严重影响,研究表明自2005年以来影响山东的台风频次呈显著增加趋势^[2],且极端台风暴雨明显增多,因此对山东台风强降水进行深入研究对台风防灾减灾具有重要意义。近年来,许多气象学者对台风暴雨的环境场特征进行了研究^[3-9]。高低空急流、台风环流内

的中尺度对流系统触发、冷空气入侵及地形抬升等环境场是中国华北和山东等地产生大暴雨的重要条件^[10-14]。陈宣森等^[15]发现增幅型台风暴雨与 θ_e 平流东暖西冷的结构及弱冷空气入侵等有关。万小雁等^[16]指出中低层 Q 矢量辐合区和大暴雨落区相对应、台风过程累积雨量和地形高度具有显著相关等特征。陈红霞等^[17]得出低层对流不稳定、干线、中高层弱干冷空气侵入等为台风暴雨提供了有利环境条件。

2018年第18号台风“温比亚”造成了山东创纪录的极端暴雨,导致部分地区出现洪涝灾害。据统计,此次台风过程全省直接经济损失约221.97亿元。台风“温比亚”引起我国多地出现暴雨,相关学者对台风“温比亚”影响期间的雨滴谱、中尺度特征、强对流螺旋雨带观测特征等进行了分析,得出许多有意义的结论^[18-20],但未对 Q 矢量、低空急流指数、超低空急流等环境场的详细特征进行分析,本文利用

收稿日期:2023-01-20;修回日期:2023-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41775044,41675046);山东省自然科学基金项目(ZR2023MD118;ZR2021MD010);华东区域气象科技协同创新基金(QYHZ201812);山东台风与海洋气象创新团队(SDCXTD2021-2);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201707)

作者简介:高晓梅(1974—),女,正高级工程师,主要从事灾害性天气预报与研究工作。E-mail:wfmeizi@126.com

通信作者:任广治(1978—),男,高级工程师,主要从事中短期天气预报预警服务工作。E-mail:sdqxj@aliyun.com

多源气象资料,对台风“温比亚”引发山东历史极端暴雨的环境场特征进行了深入研究,旨在为山东极端台风暴雨预报预警提供参考依据,以便做好防灾减灾。

1 台风“温比亚”概况和环流形势分析

2018年第18号台风“温比亚”于8月17日04时前后在上海浦东新区南部沿海登陆,之后向西北方向移动,18日05时前后进入河南境内向西北方向移动,19日05时之后转向东北方向,20时前后进入山东,经过济宁、泰安,20日02时到达滨州西部,05时之后经东营河口区进入渤海(图1a)。8月17日17时—20日14时,山东省平均降雨量为135.5 mm,突破1951年有气象观测记录以来的过程降水量极值,其中鲁西南、鲁中和鲁西北东部的部分地区平均降雨量在200 mm以上(图1b)。过程最大降水量出现在泰安徂徕镇土门村,为511.2 mm;最大小时雨强出现在19日23—24时潍坊昌邑龙池镇,为121.4 mm·h⁻¹。全省多站点日降雨量和3 d连续降雨量突破本站历史极值。此次台风过程降水量大,降水极端性强,影响范围广。

8月17日20时在贝加尔湖附近有一加深发展

的西风槽逐渐向偏东方向移动,台风“温比亚”位于江西上饶附近(图2a),副热带高压(简称“副高”)位于山东半岛东部沿海至日本海之间,呈块状稳定少动,低空东南急流逐渐建立,其中上海站和江苏盐城站的东南风速达到20 m·s⁻¹以上。18日08时,“温比亚”在副热带高压西侧的东南气流引导下向西北方向移动,到达河南信阳南部附近,北部的西风槽继续向东移动,槽底位于内蒙到北京一带,受台风外围环流影响,17日夜间至18日白天鲁南出现了较强降水。20时减弱后的“温比亚”在副热带高压西侧西南风引导下缓慢向东北方向移动至河南中部(图2b),台风东侧的东南暖湿气流与槽后弱冷空气逐渐交汇,造成18日夜间鲁西南菏泽、济宁出现6 h超过100 mm的强降水。19日08时(图2c),副高南北向范围扩大,台风受其阻挡移动缓慢,并与西风槽逐渐靠近,槽后干冷空气侵入台风倒槽内,中低纬系统相互作用促使大气中大量不稳定能量释放,同时台风东侧的东南急流加强,为山东输送充沛水汽,致使19日白天山东出现大范围强降水,强降水落区位于台风倒槽顶部附近,其中鲁中和鲁西北东部出现6 h超过100 mm的强降水。20时副高东撤(图2d),西风槽东移,台风继续向东北方向移动,低空急流位置随之东移,中低纬系统进一步结合,造成19日夜间潍坊、东营等地出现强降水,其中潍坊龙池镇出现了全省最大小时雨强的短时强降水。20日05时之后台风逐渐移出山东,20日白天山东降水减弱直至结束。

2 水汽条件和低空急流特征分析

2.1 水汽条件

充足的水汽供应是形成大暴雨的重要条件^[21]。济南探空图显示,8月18日08时—20日02时暖云层厚度为4 100~5 200 m,其中18日20时达到最厚,为5 200 m,暖云的凝结效率要高于冷云,暖云层越厚,越有利于大暴雨产生。同时大气可降水量也在50~65 mm,其中18日20时大气可降水量最大,为65 mm,说明水汽条件充沛。850 hPa比湿场(图3)显示,除山东半岛外,山东大部地区自18日08时—20日02时一直处在12 g·kg⁻¹以上的高比湿区内,表明18日山东上空已聚集了充沛水汽。

850 hPa水汽通量散度场(图3a)显示,18日08时山东淄博及以西地区处于水汽通量弱辐合区内。19日02时除山东半岛外全省其他大部地区都处在水汽通量辐合区内(图3b)。14时辐合区进一步扩大

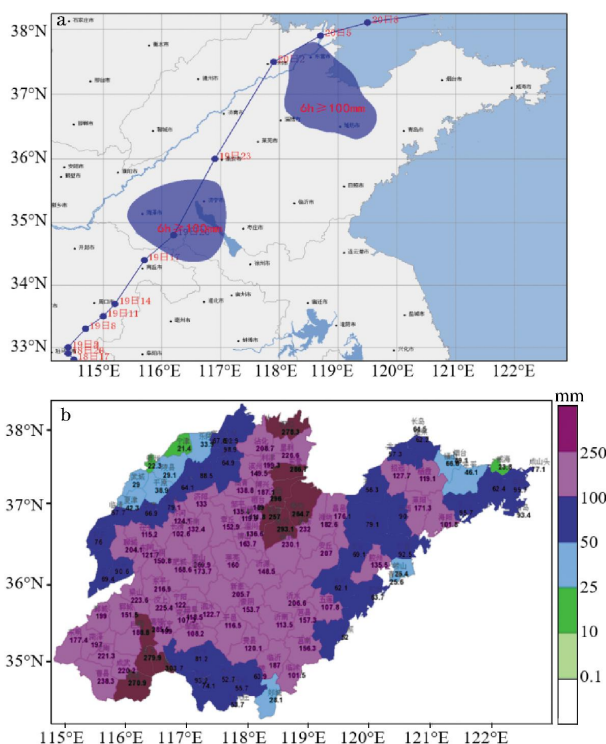


图1 台风“温比亚”路径

(a中阴影区为18—20日6 h降水量≥100 mm雨区;b为2018年8月17日17时—20日14时山东降雨量分布,单位:mm)

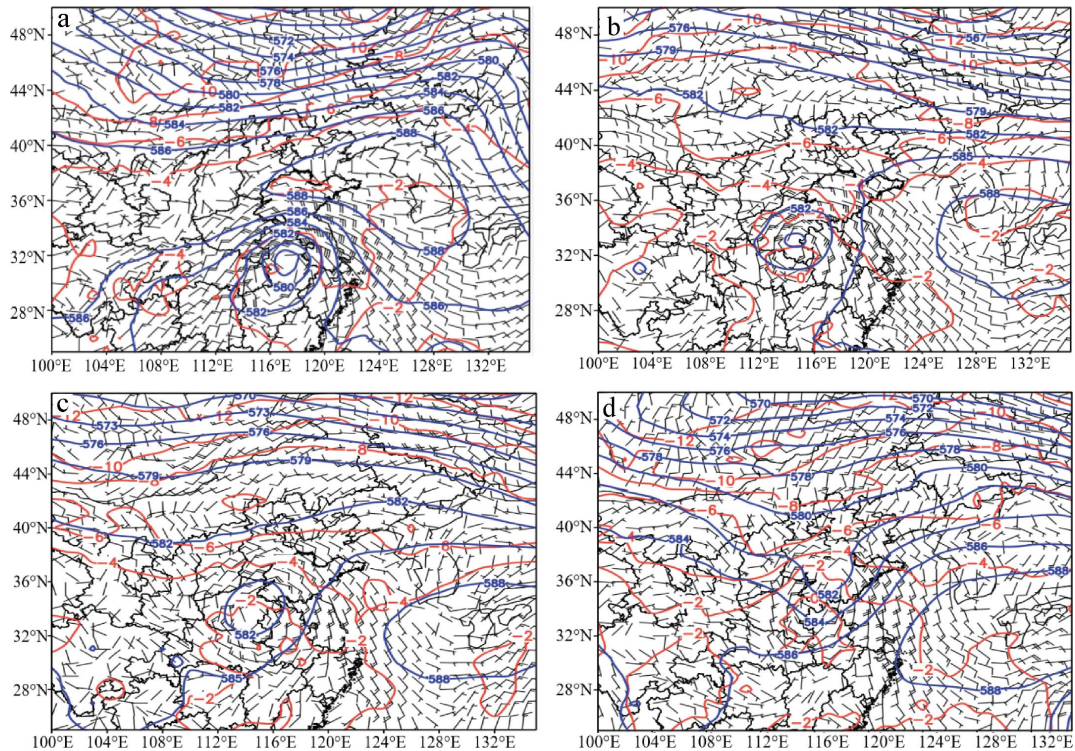


图2 2018年8月17日20时(a)、18日20时(b)、19日08时(c)和
19日20时(d)500 hPa高空图叠加850 hPa风场
(蓝色等值线为等高线,单位:dagpm;红色等值线为等温线,单位:℃)

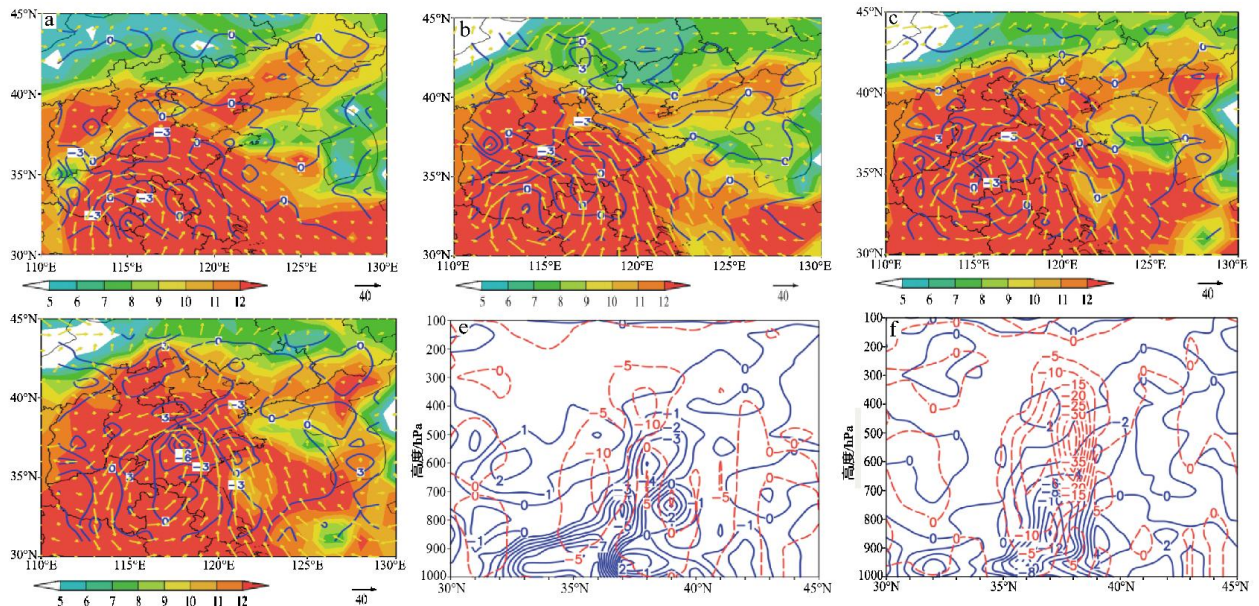


图3 2018年8月18日08:00(a)、19日02:00(b)、14:00(c)、20:00(d)850 hPa比湿(阴影,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、
水汽通量散度(蓝实线,单位: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$,下同)和风场(风矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);19日08时(e)和
20时(f)水汽通量散度和垂直速度(红虚线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)沿118°E的经向剖面

(图3c),其中鲁西南地区处在 $-5\times 10^{-7}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的水汽辐合中心,这与济宁、聊城在19日02—14时出现6 h超过100 mm的强降水相对应。20时,辐合区范围继续扩大,强度增强,鲁西北部至鲁中一线处在强烈水汽辐合带内,中心最大水汽通量散

度达到 $-12\times 10^{-7}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上(图3d),这与19日白天山东出现大范围强降水相对应。此阶段正是冷暖空气交汇、中低纬系统相互结合的时段。20时,水汽通量辐合区东移,范围缩小,辐合中心位于鲁中东部地区,致使潍坊地区出现6 h超过100 mm

的强降水。对山东暴雨中心做水汽通量散度和垂直速度的垂直剖面,发现18日20时水汽通量辐合区位于鲁南,辐合大值区主要在950 hPa附近,垂直上升运动区达到500 hPa高度,对应18日夜间鲁南出现强降水。19日08时,辐合区北移并范围扩大(图3e),大值区上移到900 hPa附近,强上升运动区扩展到300 hPa高度。20时,辐合区北移到鲁中东部和鲁西北东部地区(图3f),强度增强,中心最大水汽通量散度达 $-12 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,且上升运动达到最强,上升速度增长了3倍,达 $-35 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,此时段正处在台风倒槽与西风槽进一步结合阶段,台风在强水汽辐合和强上升运动共同作用下,19日夜间鲁中东部和鲁西北东部地区出现强降水,潍坊龙池出现最大小时雨强。综上,台风影响山东期间西风槽前偏南气流与台风东侧东南气流的汇合加强了辐合,产生强上升运动,且强上升运动区和强水汽辐合区基本重合,促进大暴雨产生。

2.2 低空急流演变特征

对流层风廓线雷达的探测资料可以清楚地揭示对流层和边界层风场特征^[22]。根据朱乾根等^[21]使用纬向风分量和经向风分量来定义低空急流和超低空急流(即900 hPa以下的极大风速轴),分析不同高度上的急流对此次强降水的作用。本文利用潍坊风廓线雷达(119.18°E, 36.77°N)的垂直风廓线结构研究此次台风暴雨的超低空急流与强降水的关系。观测站点以潍坊全市出现最大降雨量346.7 mm的青州东高镇(118.43°E, 36.77°N)与3 d连续降雨量突破东营历史极值的广饶站(118.35°E, 37.05°N)的小时降雨量(图4a)与潍坊风廓线雷达风场结构进行分析(图4b)。8月19日05—13时是超低空急流逐渐增强的时段,但超低空和低空风速都未达到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4b)。对应潍坊东高镇和东营广饶县为弱降水。14时在超低空750~1 000 m附近出现 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强风速,东高镇和广饶县的降水也有了突增,分别从13时的10.2、5.2 mm增加到19.1和10.7 mm。随着东南急流加强向下伸展,动量快速下传,从高到底先后出现 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南急流,降水强度也随之增加,即超低空急流强度的大小影响降水的强弱程度。广饶18—22时出现了1 h降雨量超过25 mm、东高镇17—21时出现1 h降雨量超过20 mm以上的强降水,对应超低空风场500 m以下出现 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强风速。23时,超低空风场的风速减小,都低于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,20日00时超低空风场的风速锐减,超低空急流消失,广饶和东高的降雨量也迅速减小到

低于10 mm的弱降水。20日01—04时,超低空急流消失,但低空700、850 hPa的低空偏南风急流仍存在,对应广饶和东高却无降水。综上,相比低空急流,超低空急流对出现降水具有明显的指示意义。

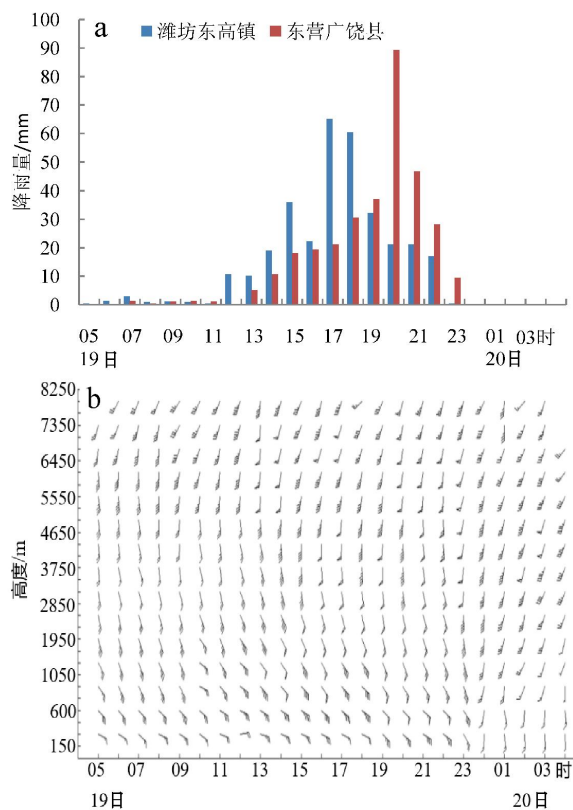


图4 2018年8月19日05时至20日04时潍坊东高镇、东营广饶县降雨量分布(a,单位:mm)和潍坊风廓线雷达垂直风场演变图(b)

2.3 低空急流指数与降水强度的关系分析

本文利用潍坊风廓线雷达的边界层风场数据分析了台风降水强度的变化趋势与低空急流指数的关系。低空急流指数 I 的计算公式是以2 km以下边界层急流中心的最大风速与 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速在该小时中最低位置的比值,其定量表示低空急流向下扩展的程度和风速脉动的强度^[23-24]。台风“温比亚”造成潍坊寿光洪涝灾害最严重,台头镇是寿光市此次台风过程降雨量最大的自动站点。对比台头镇小时降雨量和低空急流指数 I 的时间演变(图5)可知,当台头镇强降水出现时,对应的 I 值也非常大, I 值迅速加大后,小时雨强也迅速加大,特别是当短时强降水发生时, I 值迅速增大。在2018年8月19日17—18时、19—20时、20—21时3次小时雨量超过40 mm的强降雨时段,分别是41.6、41.2、51.2 mm,对应 I 的3次峰值,分别是19日18时的148、20时的

156.7 和 21 时的 174, 小时降雨量最大值 51.2 mm 正对应 I 的最大值 174。当 20 日 00—01 时指数 1 h 脉动突降为 0, 对应台头镇 00—01 时的小时雨量也为 0。01—02 时指数 1 h 脉动增大到 9.8, 对应的 01—02 时又出现弱降水。即低空急流指数 I 值增大的程度与降水量强度呈正比关系。



图5 2018年8月19日01时—20日02时低空急流指数 I 及寿光台头镇每小时降雨量变化

3 冷空气和地形在此次台风暴雨中的作用

沿山东暴雨中心作温度平流的垂直剖面可知(图6, 大暴雨落区位于 $116^{\circ}\sim 119.5^{\circ}\text{E}$, $35^{\circ}\sim 38.5^{\circ}\text{N}$, 下同), 2018年8月18日20时鲁南地区上空(115°E , 35°N 附近)800 hPa及以上有冷平流, 其他基本无冷暖平流。19日08时冷空气东移并向低空伸展(图6a~6b), 强度增强, 且冷空气侵入到近地面层, 位置位

于鲁西南北部、鲁西北和鲁中西部等地上空, 冷平流中心最大值位于 900 hPa 附近, 为 $-12\times 10^{-5} \text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这与鲁南地区强降水对应。14时冷空气主体东移到鲁西北东部, 影响范围进一步扩大, 强度略有增强, 冷中心值为 $-15\times 10^{-5} \text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这与东营、滨州等地强降水对应。20时冷空气东移范围增大(图6c~6d), 强度加强, 冷中心分别位于暴雨区上空 500 和 950 hPa, 950 hPa 高度中心值最大, 达 $-21\times 10^{-5} \text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此阶段与鲁中西部、鲁西北东部强降水相对应。20日02时冷平流范围扩大(图6e~6f), 强度达到最强, 自 450 hPa 至近地面层呈柱状分布, 中心最大值达 $-39\times 10^{-5} \text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此阶段正是冷空气完全侵入到台风环流内, 冷暖空气交汇加强对流不稳定发展导致鲁中、鲁西北东部强降水产生。对大暴雨中心作假相当位温的垂直剖面发现 8月19日08时(图6a~6b) θ_{se} 大值区自鲁西南逐渐东移到鲁中、鲁西北地区并伸展至 700 hPa 高度, 大值中心为 350 K 的等 θ_{se} 线呈“ Ω ”型覆盖在上述区域上空, θ_{se} 低值区东移与 θ_{se} 高值区在 700 hPa 附近高度上逐渐靠近, 说明此时高空干冷空气与台风东侧的东南暖湿空气逐渐交汇。20时随着槽后干冷空气南下与东南暖湿气流交汇(图6c和图6d), 低层 700 hPa 以下等 θ_{se} 线愈加陡立密集近乎垂直, 两侧的 θ_{se} 在鲁中、鲁西北附近存在较强梯度, 形成一条近乎南北向延伸的 θ_{se} 锋区, 不稳定能量增加, 锋区的东南侧有较强东南气流

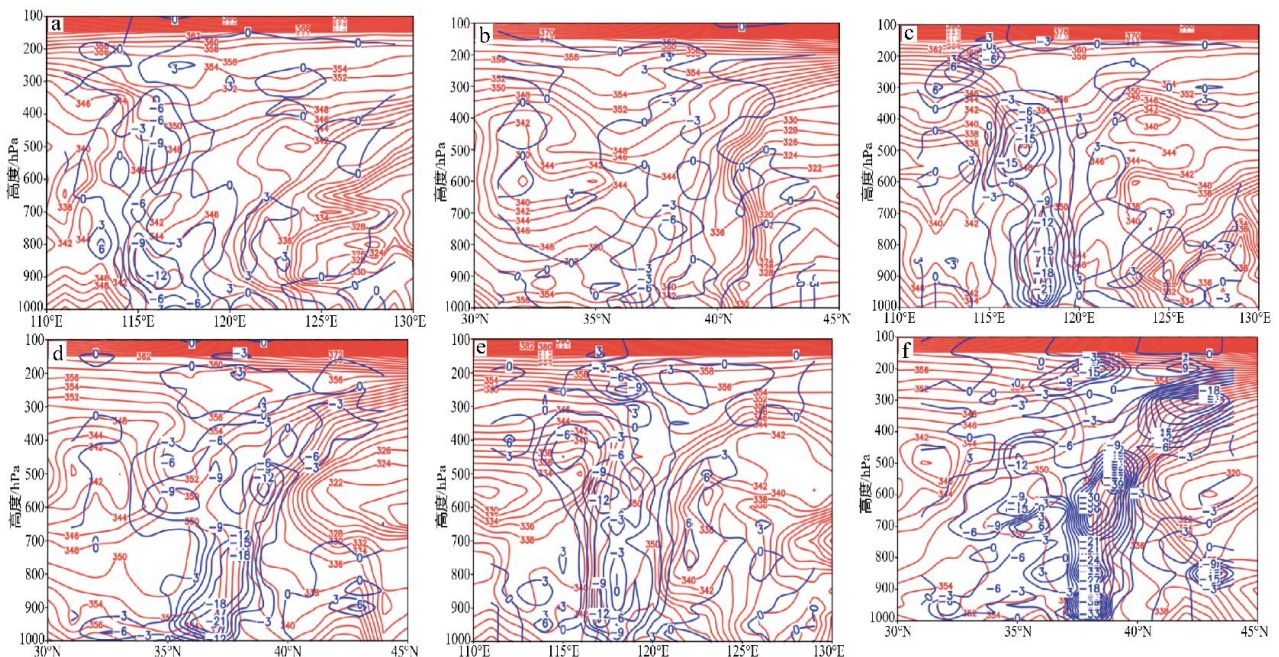


图6 2018年8月19—20日温度平流(蓝实线, 单位: $10^{-5} \text{K}\cdot\text{s}^{-1}$)与假相当位温(红实线, 单位: K)沿 36.5°N 的纬向剖面(a为19日08:00; c为19日20:00; e为20日02:00)及沿 118°E 的经向剖面(b为19日08:00; d为19日20:00; f为20日02:00)

不断输送暖湿空气,西北侧有槽后冷空气向南扩散,冷暖空气在鲁中、鲁西北交汇相互作用有利于对流不稳定发展,引起强降水产生。20日02时(图6e~6f),随着冷空气持续东移加强,进一步加剧锋区强度,使得对流不稳定继续增强,更有利于特大暴雨的发生。

泰安徂徕镇出现全省台风暴雨过程最大降雨量511.2 mm,分析发现其特殊地形在此次暴雨中起了较大作用。徂徕镇地势东南高西北低,东部、南部为连珠山、徂徕山等丘陵山地,西部、北部为地势低的汶河。分析地面自动站资料和低空风场可知,地面和低层925 hPa以下风场的风向19日08时以后由东南风逐渐逆转为东到东北风,地面为东南风时徂徕镇小时雨强不大,但当东南风在08时转为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的东到东北风时,徂徕镇的小时雨强迅速增大,这与925 hPa以下层的东北风倒灌有关。当东北风经过东部山脉时由于地形的迎风坡效应在山地产生的强迫抬升作用是重要触发机制;另外由于山脉阻挡,水汽更易在山前积聚,形成强热力不稳定层结,触发湿对流,动力和热力共同作用致使上升运动加强和能量释放,造成降水增幅。当19日14时地面风速减小到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,小时雨量由13时19.5 mm骤减到14时1.3 mm。即风速越小,地形产生的强迫抬升作用越弱,引起的降水随之减弱,16时风速增

大到 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,小时雨量又增强到43.1 mm。19时东北风转东南风后,徂徕镇自17、18时的小时雨量87.4、20.6 mm骤降到19时的3.2 mm。20时风速减小到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,小时雨量减弱到0.6 mm。综上,有利的天气系统配置与地形的共同作用,造成了泰安徂徕镇出现山东最大台风暴雨点。

4 Q 矢量散度诊断

Hoskins 等^[25]在1978年提出Q矢量概念,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^[26]。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。18日20时(图7a),Q矢量散度负值中心在鲁西南,从西南方向移入山东境内,中心值为 $-20\times 10^{-16}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$,对应在鲁西南18日23时—19日08时出现强降水,其中菏泽定陶、济宁嘉祥、鱼台等地出现了6 h降水量分别为100、187、172 mm的强降水;19日08时(图7b),Q矢量散度负值区逐渐北移,雨强在负值中心东侧附近明显增强,对应在鲁西北部、鲁中西部地区出现强降水,其中聊城、淄博大部地区在19日08—20时6 h降雨量都超过100 mm。20时Q矢量散度负值区到达鲁中东部、鲁西北东部地区(图7c),辐合强度最大,在 $-40\times 10^{-16}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$ 以下。对应的强降水区东移,在

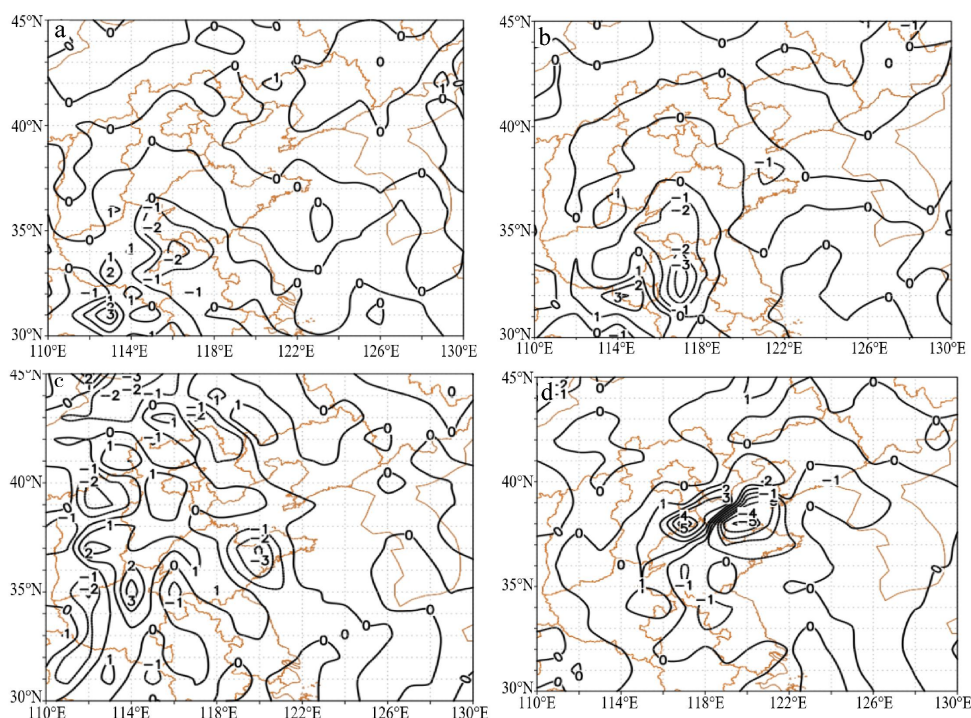


图7 2018年8月18—20日700 hPa Q 矢量散度(单位: $10^{-15}\text{ hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)分布
(a为18日20:00;b为19日08:00;c为19日20:00;d为20日02:00)

鲁西北东部、鲁中东部的东营、潍坊等地在19日20时—20日02时6 h降雨量超过100 mm,其中潍坊龙池在19日23—24时出现全省最大小时雨强为 $121.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降雨。20日02时(图7d), Q 矢量散度负值区东移到山东半岛,辐合强中心位于渤海,对应在山东半岛20日02—08时烟台地区出现强降水,其中烟台莱阳出现了6 h降雨量为114 mm的强降水。08时之后,随着 Q 矢量散度负值区域逐渐移出山东,强降雨也逐渐减弱结束。由此可见, Q 矢量散度负值的强弱对未来6 h的雨强大小有较好的指示意义。

5 结论

(1)台风“温比亚”影响山东引起的前期强降水在鲁南地区,主要为台风外围螺旋云系降水,19日白天至夜间是强降水主要时段,主要由中低纬系统相互作用引起,落区主要集中于台风倒槽附近。

(2)副高的稳定少动及低空急流的稳定维持是造成山东强降水的主要原因之一。暖云层较厚,大气可降水量大,高比湿、水汽通量辐合大值区等充沛的水汽条件也是原因之一。

(3)相比低空急流,超低空急流对出现强降水更有明显的指示意义,强度大小影响降水的强弱程度,且超低空(500 m以下)出现 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强风速对出现小时降雨量超过20 mm以上的短时强降水有明显指示作用。低空急流指数对强降水的出现特别是中小尺度强降水及雨强大小都有一定预示作用。

(4)南高北低的特殊地形及925 hPa以下的东北风倒灌对泰安市徂徕镇的极端特大暴雨具有较大增幅作用,地形的迎风坡效应在山地产生的强迫抬升作用及山脉阻挡引起的水汽在山前积聚等动力和热力共同作用触发湿对流是此次台风出现短时强降水的重要触发机制。

(5)此次台风暴雨过程 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。另外,此次台风暴雨与冷空气密切相关,冷空气自中高层侵入到近地面层,与台风倒槽顶端的暖湿气流交汇,中低纬系统相互作用导致山东极端暴雨发生。

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] 赵思雄,孙建华.近年来灾害性天气机理和预测研究的进展[J].大气科学,2013,37(2):297-312.
- [3] 于慧珍,马艳,韩旭卿,等.台风“摩羯”路径转折预报和诊断分析[J].干旱气象,2022,40(6):1014-1023.
- [4] 王茂书,肖递祥,袁亮,等.两种不同路径台风对四川东北部持续性暴雨影响对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(6):29-38.
- [5] 任丽,赵玲,韩冰,等.台风狮子山与中纬度系统相互作用所致暴雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(1):44-51.
- [6] 井宇,陈闯,马晓华,等.黄土高原一次 γ 中尺度致洪大暴雨环境场特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(6):17-25.
- [7] 高晓梅,江静,刘畅,等.近67a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] 彭军,周雪英,赵威,等.新疆巴州“6·4”罕见大暴雨中尺度特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(1):68-75.
- [9] 庄晓翠,李健丽,李博渊,等.北疆北部2次区域性暴雨的中尺度环境场分析[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(6):23-30.
- [10] 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.
- [11] 林小红,范能柱,蔡义勇,等.“利奇马”(2019)台前飚线过程演变和异常特征分析[J].暴雨灾害,2022,41(2):192-203.
- [12] 杨舒楠,陈涛,刘建勇.两次台风暴雨冷空气影响对比分析[J].气象科技,2018,46(2):324-335.
- [13] 冉令坤,李振,张雅斌,等.一次北方暴雨的 Q 矢量诊断分析研究[J].暴雨灾害,2019,38(1):17-30.
- [14] 刘奕辰,周伟灿,常煜,等.山东半岛东海岸一次台风暴雨的成因研究[J].高原气象,2018,37(6):1684-1695.
- [15] 陈宣森,余贞寿,叶子祥.浙南闽北登陆台风发生区域性暴雨增幅的环境场特征分析[J].暴雨灾害,2018,37(3):246-256.
- [16] 万小雁,何萍,陈莹,等.乐清以北登陆台风“利奇马”和“阿贝”造成温州强降水差异的环境场特征分析[J].气象科学,2021,41(2):153-161.
- [17] 陈红霞,付伟基,李振锋.豫西台风倒槽型大暴雨的环境条件与触发机制分析[J].气象与环境科学,2020,43(3):101-108.
- [18] 王军,席乐,王超杰,等.“温比亚”引发河南特大暴雨的中尺度系统特征分析[J].气象与环境科学,2021,44(4):16-23.
- [19] 王俊,丛春华,王洪,等.台风温比亚(2018)登陆后雨滴谱演变特征研究[J].气象,2022,48(11):1449-1459.
- [20] 高栓柱.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.
- [21] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,2007.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] HOSKINS, DRAGHICI I, DAVIES H C. A new look at the ω -equation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1978, 104: 31–38.
- [26] 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.

Environmental Characteristics of Historical Extreme Rainstorm in Shandong Province Caused by Typhoon Rumbia

GAO Xiaomei^{1,2}, REN Guangzhi¹, WANG Xiangqian³, XING Lizhu⁴, CONG Chunhua¹,
YUAN Jing²

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China;
2. Weifang Meteorological Bureau, Weifang 261011, China;
3. Weifang Gaomi Secondary Specialized School, Gaomi 261500, China;
4. Zaozhuang Meteorological Bureau, Zaozhuang 277800, China)

Abstract Based on the multi-source meteorological data, the environmental characteristics of historical extreme rainstorm in Shandong province caused by Typhoon Rumbia in 2018 were analyzed. The results showed that: (1) The early heavy precipitation caused by Typhoon Rumbia is located at southern Shandong province, mainly due to the spiral cloud system in the periphery of typhoon, the main period of the heavy precipitation is from day to night on the 19th August, mainly caused by the interaction between typhoons and westerly troughs. The heavy precipitation area is mainly concentrated near the typhoon's inverted trough. (2) The main reasons for the heavy precipitation are the stable and infrequent movement of the subtropical high, the interaction of the middle and low latitude weather systems and the stable maintenance of the low-level jet. (3) Compared with the low-level jet, the ultra-low-level jet has a more obvious indicator for the heavy rainfall, and its intensity affects the intensity of the precipitation, and the strong wind speed of more than $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ below the altitude of 500 meters has an obvious indicator on the short-term heavy precipitation. The low-level jet index has a certain predictive effect on the appearance of heavy precipitation, especially on the small and medium scale heavy precipitation and the intensity of rainfall. (4) The special topography played a key role in this typhoon rainstorm. The wet convection is triggered by the combined action of dynamics and heat, such as the forced uplift of the mountain by the windward slope effect of the terrain and the accumulation of water vapor in the front of the mountain caused by the blocking of the mountain is an important triggering mechanism for the short-term heavy precipitation. (5) The intensity of negative Q -vector divergence can affect the rainfall intensity in the next 6 hours. In addition, the heavy rain is closely related to the cold air.

Key words typhoon; extreme rainstorm; low-level jet index; Q -vector divergence