

阎琦, 赵梓淇, 李爽, 等. 2018年辽宁两次致灾台风暴雨动力机制对比分析[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 76-84. [YAN Qi, ZHAO Zhiqi, LI Shuang, et al. Comparative analysis of dynamic mechanism of two severe torrential rain of typhoon in 2018 in Liaoning [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 76-84. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.016.]

# 2018年辽宁两次致灾台风暴雨动力机制对比分析<sup>\*</sup>

阎琦<sup>1</sup>, 赵梓淇<sup>2</sup>, 李爽<sup>1</sup>, 周天娇<sup>1</sup>, 滕方达<sup>1</sup>

(1. 辽宁省气象台, 辽宁 沈阳 110166; 2. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166)

**摘 要:**应用常规、非常规、再分析资料,对2018年8月两次北上台风影响辽宁大暴雨动力机制进行对比分析。结果表明:两次过程均是在三带系统作用下出现的,副高稳定且外围有2个台风活动,西风带短波槽东移。强降水落区均位于高、低空急流耦合上升区。“摩羯”过程水汽输送通道长且宽、持续时间长;“温比亚”过程的水汽输送路径和持续时间短。“摩羯”过程,辽宁东部西南风与偏西风在等 $\theta_{se}$ 密集区汇合后对等 $\theta_{se}$ 线有向东北方向拉伸作用,形成伸长变形锋生;辽宁东南部边缘附近风向与 $\theta_{se}$ 密集带垂直, $\theta_{se}$ 密集带上风速切变导致切变变形锋生,其作用与伸长变形锋生作用叠加,是暖区锋生的动力机制。“温比亚”过程偏南风、偏东风两股气流汇合驱动 $\theta_{se}$ 梯度增大导致伸长变形锋生、切变变形的两个分解项形成的锋生与散度项在辽宁东南部有很好的配合,三者共同形成强锋生。“摩羯”过程水汽输送、辐合作用使得辽宁大部水汽充分,暖区锋生次级环流产生的上升运动,促使对流不稳定能量释放导致大暴雨;“温比亚”过程,在水汽达到暴雨阈值、对称不稳定条件下,台风倒槽辐合与强锋生次级环流共同作用导致动力抬升作用快速增强,水汽强烈辐合并向高层输送形成大暴雨。

**关键词:**台风暴雨;锋生;次级环流;动力;对比分析;辽宁

**中图分类号:** X43; X915.5; P458      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2019)03-0076-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.016

台风灾害多是由台风暴雨引起的,目前对台风暴雨的研究较为广泛<sup>[1-7]</sup>。受201814号台风“摩羯”、201818号台风“温比亚”影响,辽宁出现2018年夏季最强的两次特大暴雨过程。辽宁部分乡镇大田作物、设施农业受淹,防洪堤坝损毁,河道冲毁,桥梁、公路受损,个别地段发生小型山体滑坡。辽宁受北上台风影响暴雨个例不多,上述两次过程均出现大范围特大暴雨,因此有必要对其进行多方面的分析,不断积累北上台风暴雨预报经验。

关于冷空气与台风相互作用,陈联寿<sup>[8-9]</sup>等指出,弱冷空气将使涡旋位势不稳定能量汇聚并触发不稳定能量释放,如果冷空气过强,会彻底破坏热带气旋的暖心结构,将其填塞消失。北上台风进入西风带后与冷空气作用比较复杂,通常伴有锋面或锋生,是降水形成的动力因素之一。在锋生次级环流对降水作用方面,大量专家研究<sup>[10-15]</sup>得出锋生产生的次级环流能促进锋面的形成或加强,是形成暴雨、对流天气的动力机制之

一。而在锋生机制方面,气象专家<sup>[16-18]</sup>从锋生函数各项对锋生、锋消的贡献入手,得到锋生显著时期伸长变形场与散度场大值带都与锋区重合;变形向量与等位温线走向一致或有较小夹角时,变形项对引发暴雨的低层锋生有重要贡献等结论。2018年8月两次台风影响辽宁大暴雨过程,均有台风和冷空气活动,那么是否出现锋生,锋生对暴雨产生的动力机制如何?两次过程是否存在差异?通过对比分析得到此类台风暴雨预报着眼点,利于不断提高台风暴雨精细化预报能力。

通过对比NCEP FNL(1°×1°)资料与实况环流场,发现“摩羯”、“温比亚”过程中NCEP FNL资料的环流与实况较吻合,而NCEP FNL可以提供多要素高时空分辨率的资料,因此本文采用常规、非常规资料及NCEP FNL分析资料对两次过程进行对比分析。2018年8月13日20时(北京时间,下同)至14日20时过程简称“摩羯”过程,2018年8月19日20时至20日20时过程简称“温比亚”过程。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-02-25      修回日期: 2019-04-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506801, 2018YFC1507305); 辽宁省气象局重点科研项目(201802); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-015, CMAYBY2019-024)

第一作者简介: 阎琦(1974-), 女, 辽宁法库人, 正研级高级工程师, 主要从事短期天气预报及物理诊断分析研究。

E-mail: yq.mete@163.com

1 台风及降水概况

1.1 台风概况

台风“摩羯”(YAGI, 图 1a), 2018 年 8 月 12 日 23 时在浙江中部登陆, 登陆强度为强热带风暴级别, 随后向西北方向移动; 13 日 18 时在安徽中部转为向偏北方向移动; 13 日 23 时在安徽北部与河南交界处减弱为热带低压; 14 日 05 时在河南西部与山东交汇处停编, 停编后以温带气旋结构继续向东北方向移动, 强度维持; 14 日 17 时气旋入海强度略有加强, 15 日 02 时中心附近风力 9 级, 向偏东方向移动; 15 日 11 时气旋中心风力加强至 10 级, 转向向东南方向移动, 强度减弱。

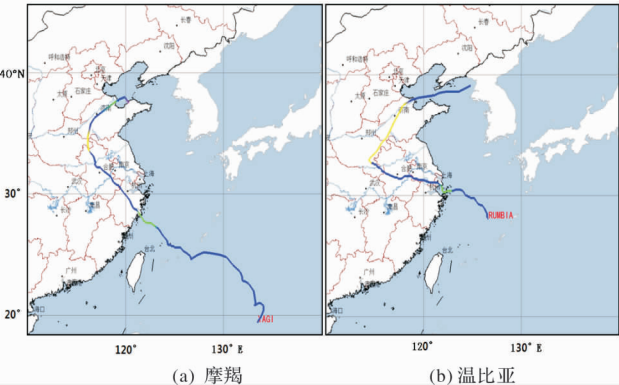


图 1 201814 号和 201818 号台风路径图

台风“温比亚”(RUMBIA, 图 1b), 2018 年 8 月 17 日 04 时在上海登陆, 登陆强度为强热带风暴级别, 随后减弱为热带风暴, 向偏西方向移动; 18 日 14 时在河南南部减弱为热带低压, 19 日 05 时转为向东北方向移动; 20 日 05 时在山东北部加强为热带风暴级别, 转为向偏东方向移动; 20 日 18 时在黄海北部近朝鲜一侧停止编号。

1.2 降水实况

受 201814 号台风“摩羯”影响, 8 月 13 日 20 时 - 14 日 20 时辽宁省大部分地区出现强降水, 357 个加密自动站出现 100 ~ 250 mm 的降水。按照降水落区划分为 2 个主要雨带: 第一个雨带位于辽宁西北部, 出现小范围大暴雨; 第二个雨带, 位于辽宁中南部的大片大暴雨区(图 2a)。加密自动站最大小时降水量 88.1 mm, 出现在丹东凤城市红旗镇; 降水集中时段出现在 14 日 02 时至 11 时(图 2c)。

受 201818 号台风“温比亚”影响, 8 月 19 日 20 时至 20 日 20 时辽宁东南部出现大暴雨(图 2b), 大连地区 4 个国家气象观测站日降水量突破历史极值。常规自动站最大小时雨强  $\geq 50$  mm/h 的时刻分别: 20 日 11 时长兴岛 66.1 mm、20 日 13 时瓦房店 62.6 mm、20 日 15 时庄河 63.2 mm、20 日 17 时东港 57.2 mm, 从小时强降水中心移动可以判断强降水自西南向东北方向移动。加密自动站最大小时降水量 89.7 mm, 出现在大连金州区松木岛化工园区, 降水集中时段出现在 20 日 05 时 - 17 时(图 2d)。

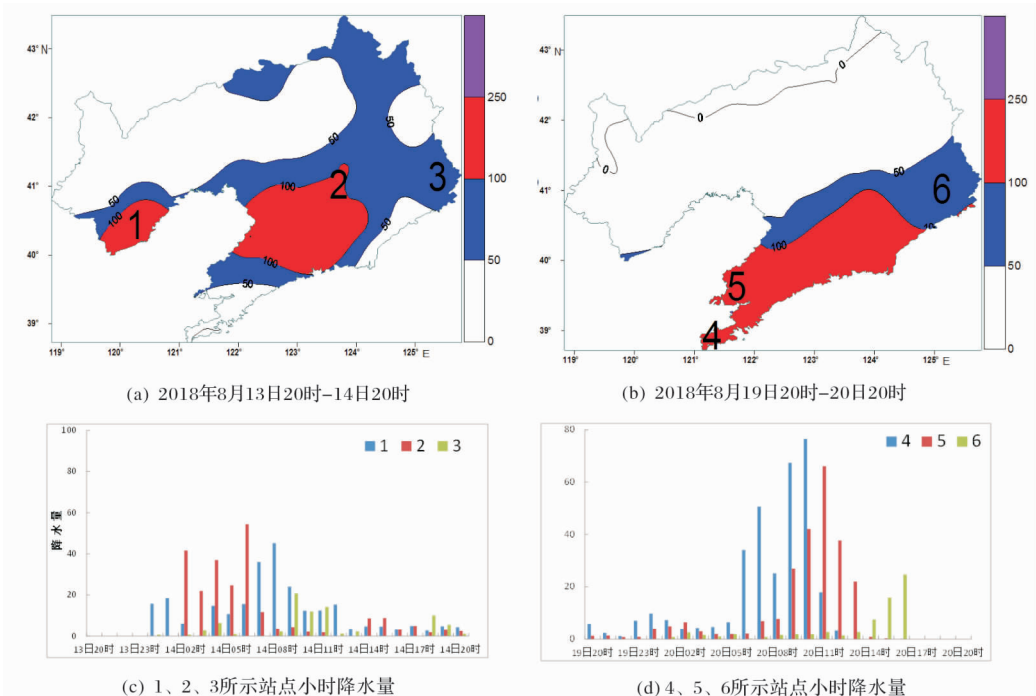


图 2 辽宁地区降水量空间分布及降水中心附近加密自动站小时降水变化

2 环流及环境场演变特征

2.1 环流演变

两次台风大暴雨过程均是在热带、副热带、西风带系统共同作用下出现的(图3),西太平洋副热带高压(简称副高,下同)相对稳定,副高外围同时存在2个台风,西风带有弱短波槽东移。

2.1.1 “摩羯”过程环流及影响系统演变

14日02-14时1815号台风“丽瑟”位于副高南侧,副高与台风间低空急流加强(图3a1~图3a2)红色风场),两个台风间低空急流连续,利于水汽和能量向台风“摩羯”以及辽宁输送。14日14-20时,随副高西伸,联系两个台风的低空急流断裂(图3a3),“摩羯”在能量耗散和来源不足情况下逐渐减弱。强降水集中时段(14日05时-14时)低层台风系统对应的500 hPa高度也存在闭合气旋环流,副高缓慢东移,辽宁位于副高后部暖平流控制下,500hPa短波槽非常弱且移动缓慢,冷平流在降水后期移动到辽宁西部。

14日02-08时200 hPa急流(图3a~图3c 黑

色风场)位于辽宁以北地区,呈东-西向。辽宁中部及以南地区位于高空急流右后侧强辐散区。对应同一时段850 hPa低空急流非常宽,辽宁位于低空急流顶部。辽宁中部及以南地区正好位于高空急流辐散与低层急流辐合叠加区域,利于上升运动的发展和维持,与强降水落区有较好的对应。

2.1.2 “温比亚”过程环流及影响系统演变

20日02-14时副高稳定,“苏力”与“温比亚”间低空急流不连续,与“摩羯”不同的是“温比亚”低层台风系统对应的500 hPa短波槽,“温比亚”位于高空槽前西南风引导气流里,向东北方向移动。“温比亚”200 hPa急流(图3b1~图3b3)较比“摩羯”的强度弱且偏南1~2个纬度。850 hPa低空急流,20日02-08时与14日02-08时较相似,辽宁位于低空急流顶部,20日02-08时辽宁东南部强降水落区正好位于高、低空急流耦合上升区。“温比亚”过程温度平流与“摩羯”过程存在明显差异,“温比亚”过程,强降水前(图3b1)低层冷平流已经到达辽宁中部及以西地区,降水期间(图3b2)在强降水区可以看到明显的冷、暖平流交汇,因此这次过程斜压锋生作用更显著。

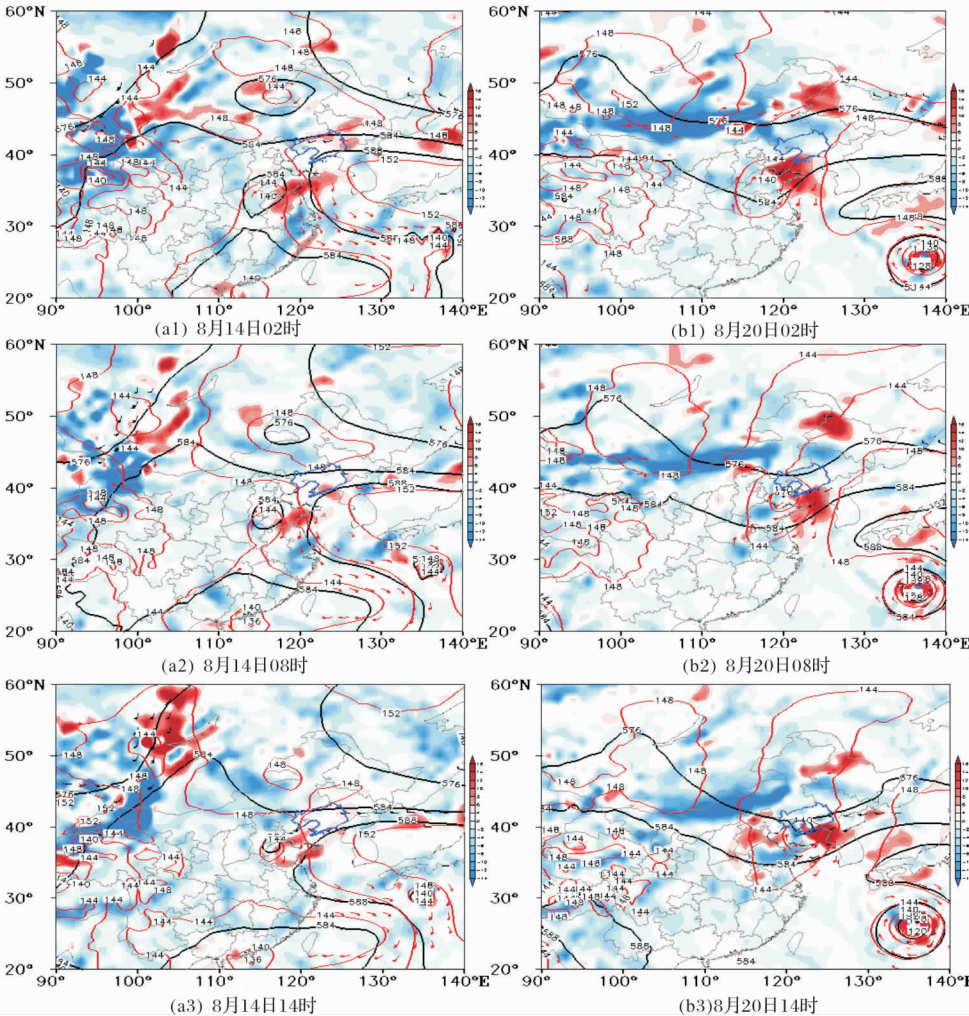


图3 500 hPa(黑色)、850 hPa(红色)高度场(单位: dagpm)和200 hPa(黑色)、850 hPa(红色)急流及850 hPa温度平流(填色, 单位:  $10^{-5}$  K/s)



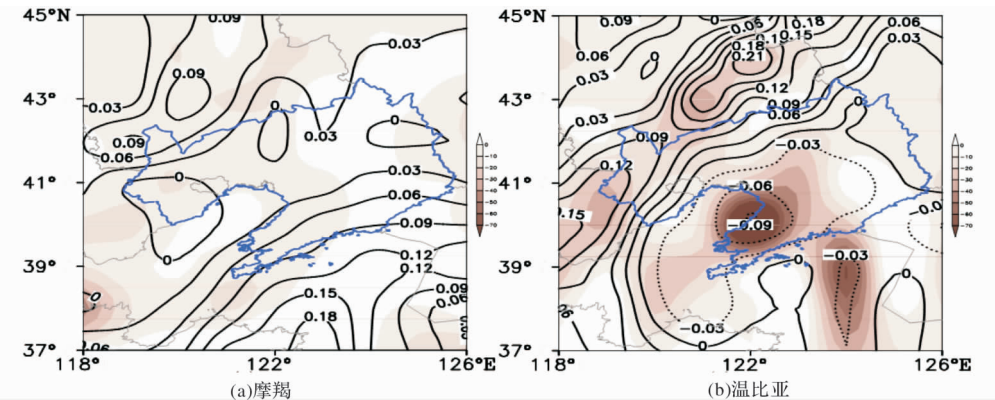


图 4 850 hPa MPV2(填色, 单位: PVU)和 $\frac{\partial \theta_{ec}}{\partial p}$  (等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{Pa}$ )空间分布

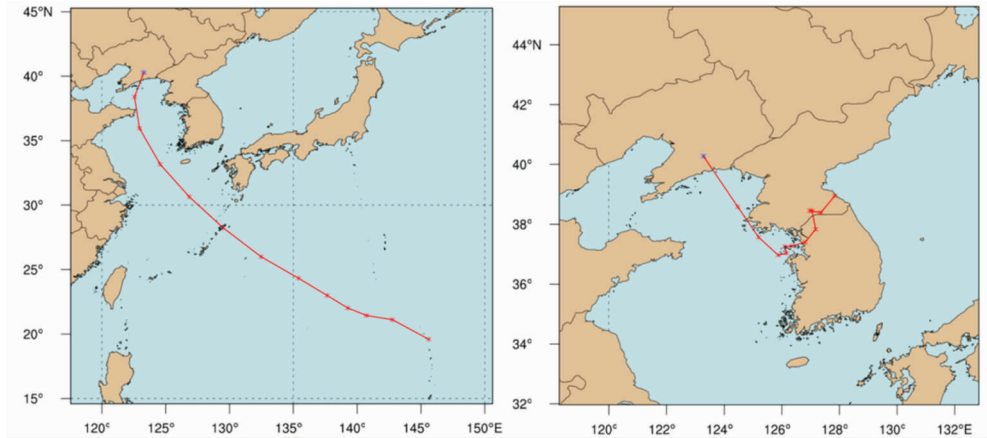


图 5 850hPa 台风内核质点追踪水汽路径

2.2 水汽和不稳定条件对比分析

2.2.1 不稳定条件分析

通过分析两次过程辽宁强降水中心 MPV2(负的为对称不稳定)和(正的为对流不稳定)时空剖面(图略)发现,“摩羯”过程 600 hPa 以下为对流不稳定,14 日 08 时之后低层出现对称不稳定,强降水期间对流、对称不稳定均存。“温比亚”过程 950 ~ 600 hPa 之间存在对称不稳定,尤其 20 日 08 - 14 时 900 ~ 800 hPa 间对称不稳定最强,此阶段降水最强。而从 850 hPa 对流、对称不稳定空间分布情况上看(图 4),“摩羯”过程辽宁大部都存在对流不稳定,尤其是东南部地区最强达到 0.09 $^{\circ}\text{C}/\text{Pa}$ ,而对称不稳定比较弱。“温比亚”过程辽宁中东部对流稳定,尤其强降水区稳定性更强,但强降水区存在强的对称不稳定。

2.2.2 水汽条件分析

在两次过程强降水区域选岫岩站为代表,对台风内核质点进行水汽追踪(图 5),追踪得到水汽轨迹的情况与前面分析的低空急流(图 3)演变情况相对应,可见低空急流对水汽输送具有显著作用。“摩羯”过程(图 5a)水汽源自台风“丽瑟”附近的西太平洋洋面,水汽输送路径长,经过西太平洋、东海、渤海海峡、黄海北部到达辽宁。“温比亚”过程(图 5b),辽宁的水汽来自日本海,进入黄海北部后,随着“温比亚”北上其东侧偏南急流携

带到达辽宁。

两次过程降水期间 850 hPa 比湿(图略)均从辽宁东南部向西北部减少,但“摩羯”过程的数值比“温比亚”过程大 2 g/kg。而两次过程强降水中心水汽输送和辐合的时间(图 6)演变情况上看,“摩羯”过程(图 6a)强降水中心 800 hPa 以下各层均有较强水汽通量及水汽辐合,从 13 日 14 时开始水汽通量及其散度明显增强,并向高层发展,14 日 02 - 08 时水汽通量达 18  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,水汽通量散度达  $-90 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,850 hPa 比湿(图略)达 14 g/kg,远超过区域性暴雨阈值。“温比亚”过程(图 6b),水汽通量及水汽辐合在 20 日 02 - 14 时迅速增强,水汽通量达 30  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,水汽通量散度达  $-180 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,较比“摩羯”过程强一倍,850 hPa 比湿最大达 13 g/kg,达到区域性暴雨阈值。可见,“摩羯”过程水汽具有持续性,而“温比亚”过程过程水汽条件具有突发性。

综上所述,两次过程共同点是均有三带系统影响,但环流形势配置不尽相同;水汽条件都比较充分,不稳定条件存在明显差异,水汽、不稳定最强的区域并不是降水中心,那么在水汽、不稳定有利的较大范围内,动力条件对于强降水落区和强度具有决定性作用,因此下面重点对暴雨形成的动力机制进行对比分析。

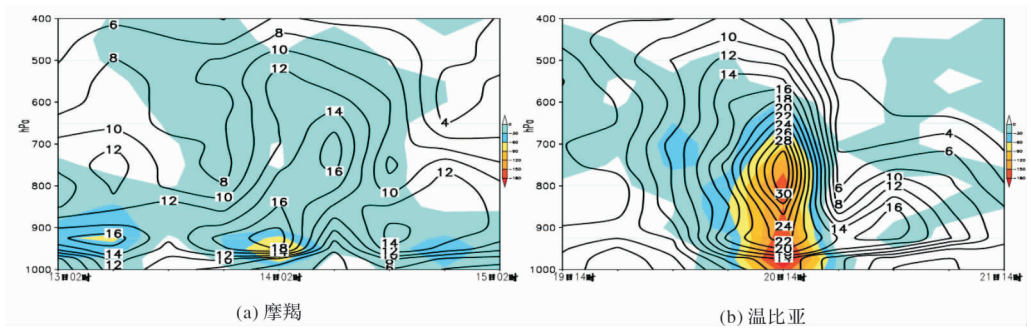


图6 沿强降水中心的水汽通量(单位:  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )、水汽通量散度(填色, 单位:  $10^{-6} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )的时空剖面

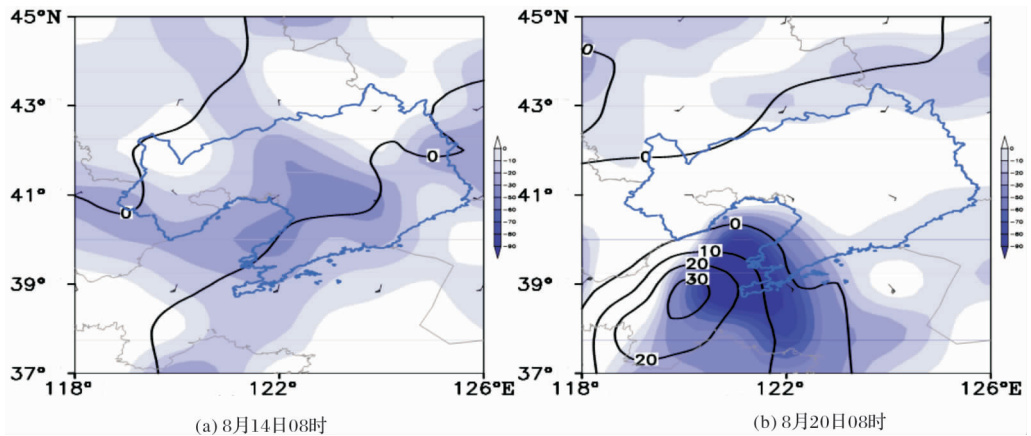


图7 925 hPa 涡度(单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ )、散度(填色, 单位:  $10^{-6} \text{s}^{-1}$ )和风(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )空间分布

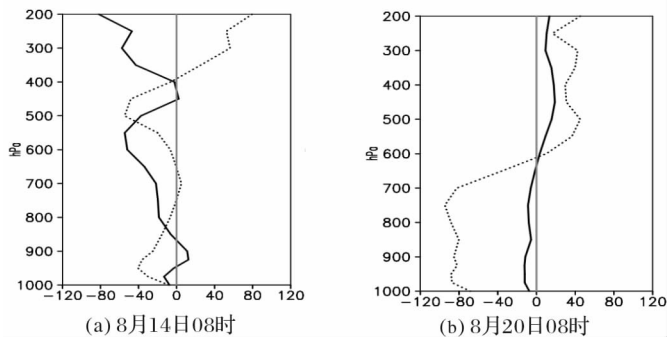


图8 降水中心附近格点的涡度平流(实线, 单位:  $10^{-9} \text{s}^{-1}$ )、散度(虚线, 单位:  $10^{-6} \text{s}^{-1}$ )垂直廓线

3 暴雨动力机制对比分析

3.1 涡度、散度水平和垂直分布特征对比分析

涡度、散度是预报业务和科研中用来分析降水动力条件的常用物理量,从两次过程925 hPa 涡度、散度和风的空间(图7)分布情况上看,“摩羯”过程低层涡度没有“温比亚”过程大,辐合条件也远远弱于温比亚过程。“摩羯”过程没有正、负涡度中心,分布比较均匀;“温比亚”过程在渤海中部为正涡度大值中心,与台风环流相对应。散度场上,“摩羯”过程弱辐合由风速切变造成,辐合中心位于辽宁中部及以东地区;“温比亚”过程强辐合由风向、风速切变共同形成,强辐合中心从辽宁南部向东北方向移动。

利用降水中心附近格点涡度平流、散度垂直廓线(图8)分析动力垂直结构。“摩羯”过程强降水中心附近(123°E, 41°N)上空涡度平流基本为0,根据 $\omega$ 方程和连续方程,此种涡度平流垂直分

布不利于中、低层上升运动的发展,但散度的分布出现低层辐合与高层辐散配合的有利条件,是上升运动产生的动力机制之一。“温比亚”过程(121.5°E, 39°N)涡度平流垂直分布表现为400 hPa 高度以下一致性向下递减的特征,根据 $\omega$ 方程和连续方程,此种差动涡度平流有利于中、低层上升运动的发展,且散度的分布同样出现低层辐合与高层辐散配合,低层辐合比“摩羯”过程强,因此“温比亚”过程动力作用更强。

3.2 锋生及锋生机制分析

我们知道动力的产生除了大、中尺度系统涡度、散度造成的动力之外,锋面及锋生动力强迫也是强降水产生的动力因素之一。“摩羯”、“温比亚”台风北上进入中纬度是否产生锋生,锋生对暴雨形成是否起到作用,有必要做进一步讨论。本文计算的锋生函数参考李兆慧<sup>[18]</sup>等锋生公式,由于此次过程空气湿度较大,垂直运动可近似湿绝热过程,考虑假相当位温 $\theta_{se}$ 在湿绝热过程中守恒,因此选 $\theta_{se}$ 计算锋生函数,具体如下所示:





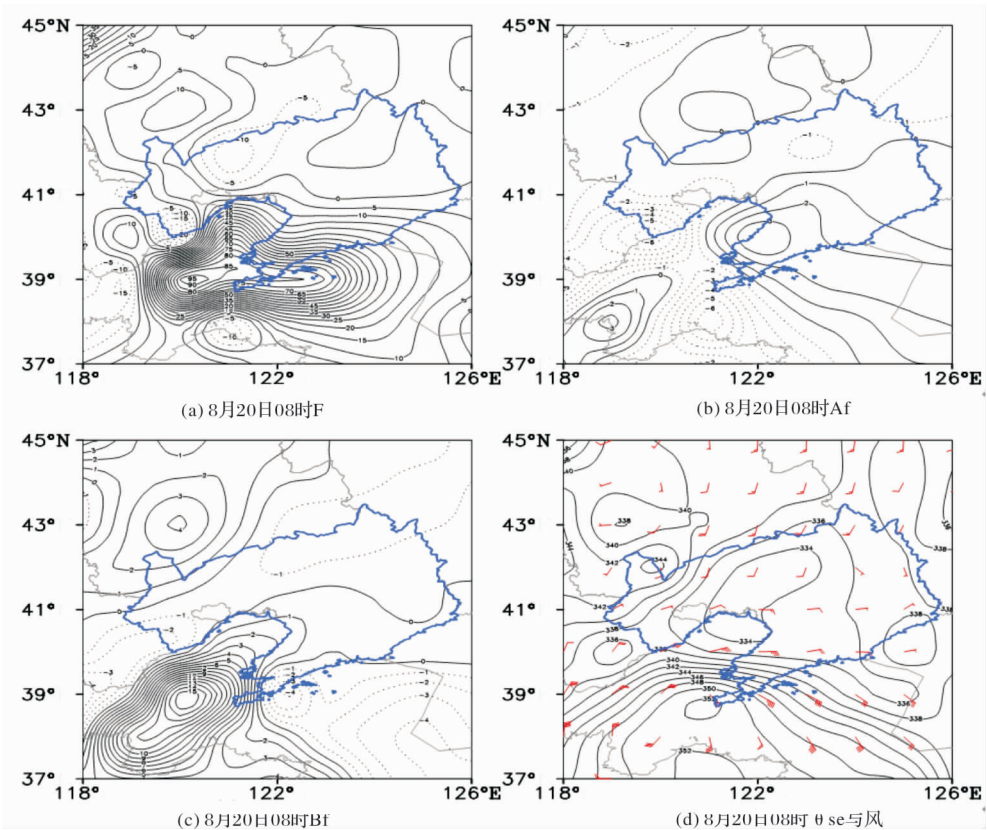


图 11 975 hPa 锋生函数  $F$  (单位:  $10^{-10} \text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )、伸长变形项  $Af$  (单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ )、切变变形项  $Bf$  (单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) 和  $\theta_{se}$  (d, 单位: K) 与风场 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

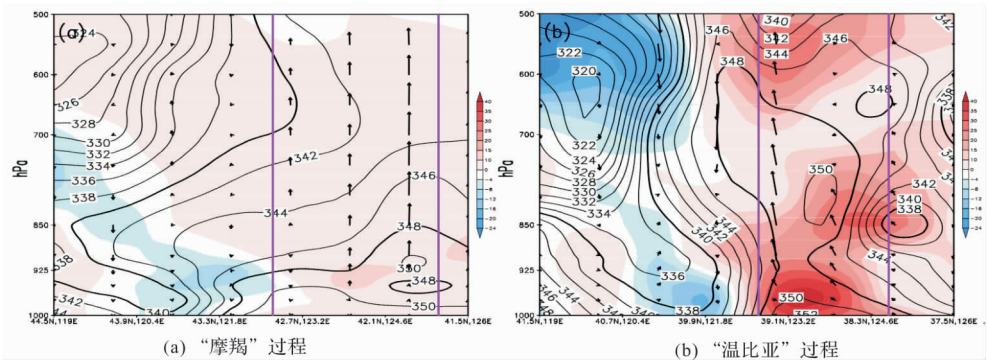


图 12 两次过程温度平流 (填色, 单位:  $10^{-5} \text{K/s}$ )、 $\theta_{se}$  (等值线单位: K) 与锋生次级环流剖面

3.2 锋生机制对比分析

锋生主要由散度项和变形项作用形成，散度项从风场和散度预报均可容易分析出来，但水平变形项如何较好的判断出来，下面根据水平变形项分解情况，分析在什么情况下变形项对锋生起正贡献。通过分析两次过程强降水开始前总锋生、伸长变形、切变变形及  $\theta_{se}$  和风场配置情况 (图 10、图 11)，对比分析锋生产生机制。

“摩羯”过程，锋生 (图 10a) 与暴雨中心有很好的对应，表现为辽宁西部和东部两个雨带，西部锋生与冷空气活动 (图 3a2) 有关，辽宁东部位于  $\theta_{se}$  的高能舌内，即东部的锋生属于暖区锋生。而与大片强降水对应的恰好是东部锋生。对应辽宁中

东部的锋生区图 7a 上为辐合区域 (阴影所示)，因此散度项对锋生为正贡献。辽宁东部伸长变形项 (图 10b) 呈东北 - 西南带状分布，与等  $\theta_{se}$  密集带 (图 10d) 走向一致，此种配置与韩桂荣<sup>[16]</sup>、李兆慧<sup>[18]</sup> 等研究结论类似，是伸长变形形成锋生的有利形势，在辽宁东部西南风与偏西风 (图 10d) 在等  $\theta_{se}$  密集区汇合后对等  $\theta_{se}$  线有向东北方向拉伸作用，形成伸长变形锋生。切变变形项 (图 10c) 虽然没有伸长变形作用大，但对于辽宁东部弱锋生来讲，其正贡献也占有相当比例，尤其是在辽宁东南部边缘一带为大值区，其作用与伸长变形锋生作用叠加，由该区域  $\theta_{se}$  和风场配置 (图 10d) 情况可以发现，风向与  $\theta_{se}$  密集带垂直，但风速出现切变，

这一特征与以往锋生机制的结论有所不同。

“温比亚”过程(图 12d), 辽宁东南部位于高温高湿的高能舌内, 干冷空气已经到达辽宁中部, 干冷、暖湿空气在辽宁交汇利于斜压锋生。辽宁东南部存在锋生大值中心与强降水中心相对应, 散度项和水平变形项都起到明显的正贡献(图 9a1 ~ 图 9a3), 辐合区空间分布(图 7b)与锋生大值区(图 11a)基本一致, 强辐合中心位于辽宁东南部, 散度最大达到  $-110 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , 不做重点分析。伸长变形(图 11b)大值对东部锋生起到正贡献, 切变变形对南部(图 11c)锋生起到正贡献, 二者空间分布互补, 共同对东南部锋生起到增强作用。辽宁东部伸长变形(图 11b)与  $\theta_{se}$  等值线密集区(图 11d)叠加利于锋生, 辽宁南部为偏南风穿过等  $\theta_{se}$  线, 辽宁东部偏东风穿过等  $\theta_{se}$  线, 在辽宁东部两股气流汇合驱动  $\theta_{se}$  梯度增大, 形成温湿对比明显的一条狭带, 是促进锋生的关键。辽宁南部切变变形锋生, 也是由偏南风与等  $\theta_{se}$  线接近垂直, 而在等  $\theta_{se}$  线密集带附近出现风速切变, 这一点是业务中需要重视的地方。

通过对以上两次过程锋生机制的分析, 发现在预报业务中除了分析散度项中的辐合作用产生的锋生作用外, 还要分析沿等  $\theta_{se}$  线密集带方向是否出现两股气流汇合后的拉伸作用产生的锋生。另外需要注意的是, 风向与等  $\theta_{se}$  线密集带接近垂直的地方是否出现风速切变, 如果出现风速辐合则容易导致切变变形锋生。

### 3.3 锋生次级环流对暴雨成因综合分析

上升运动的发展是降水主要动力因素, 两次过程均存在锋生, 那么是否产生次级环流, 参考李兆慧<sup>[18]</sup>等的计算方法, 即两次过程锋生最强时刻经向风、垂直上升速度减去降水过程平均的经向风、垂直上升速度, 得到的经向风、垂直上升速度差值, 利用垂直上升速度差值的 -50 倍与经向风差值绘制次级环流(定性表示气流的强弱和方向)剖面(图 12)。

图 12a 中, “摩羯”过程垂直锋生区剖面可以看出冷平流非常弱, 且位于辽宁西北地区, 由图 1 可知辽宁西北部的小范围暴雨, 是由冷暖空气交汇及锋生的动力作用产生的。而两条紫色粗线间的辽宁大暴雨落区, 上空皆为暖区控制, 锋生次级环流的上升支在  $125^\circ\text{E}$  的上空最强, 距离冷空气 200 km 以上, 可见暖区锋生的次级环流上升支最强的区域, 对应暴雨最强的区域。因此辽宁中东部大暴雨形成的原因是, 在水汽输送、辐合作用下, 辽宁大部水汽充分, 暖区锋生次级环流与辐合作用共同产生的上升运动, 促使对流不稳定能量释放导致大暴雨。

图 12b 中, 与“摩羯”过程明显不同, “温比亚”过程中层有较强冷平流下沉到近地面, 东南方

有较强暖平流, 冷暖空气交汇的区域锋区强度(黑色粗线间区域)明显强于“摩羯”过程。此次过程锋生及锋生次级环流明显强于“摩羯”过程, 在水汽达到暴雨阈值、对称不稳定强的条件下, 台风倒槽辐合与强锋生次级环流共同作用, 动力抬升作用快速增强, 导致水汽强烈辐合并向高层输送, 形成大暴雨。

## 4 结论

对 2018 年 8 月台风“摩羯”、“温比亚”北上影响辽宁的两次大暴雨过程, 利用常规、非常规、再分析资料, 从影响系统、水汽、动力等方面对大暴雨成因进行对比分析, 得到主要结论如下。

(1) 两次过程均是在热带、副热带、西风带系统共同作用下出现的, 副高相对稳定, 副高外围同时存在 2 个台风, 西风带有弱短波槽东移。强降水落区均位于高、低空急流耦合上升区。“摩羯”过程有两个台风水汽与西太平洋、东海、渤海海峡、黄海北部水汽共同作用, 持续时间长, 而“温比亚”影响辽宁的水汽主要源自日本海随着“温比亚”携带黄海水汽, 持续时间短。“摩羯”过程对流不稳定明显, “温比亚”过程对称不稳定明显。

(2) “温比亚”过程锋生作用明显强于“摩羯”过程。“摩羯”过程, 辽宁东部南偏西风与偏西风在等  $\theta_{se}$  密集区汇合后对等  $\theta_{se}$  线有向东北方向拉伸作用, 形成伸长变形锋生; 辽宁东南部边缘附近风向与  $\theta_{se}$  密集带垂直,  $\theta_{se}$  密集带上风速出现切变导致切变锋生, 其作用与伸长变形锋生作用叠加, 是锋生的动力机制。“温比亚”过程偏南风、偏东风两股气流汇合驱动  $\theta_{se}$  梯度增大导致伸长变形锋生、切变变形的两个分解项形成的锋生与散度项在辽宁东南部有很好的配合共同形成强锋生。因此, 沿等  $\theta_{se}$  线密集带方向出现两股气流汇合后的拉伸作用产生的锋生, 是锋生动力机制之一; 需要注意的是与其他文献结论不同, 当风向与等  $\theta_{se}$  线密集带接近垂直, 等  $\theta_{se}$  线密集带上风速辐合导致切变变形锋生, 其对总锋生的正贡献不能忽视。

(3) 两次过程暴雨成因存在差异: “摩羯”过程水汽输送、辐合作用使得辽宁大部水汽充分, 暖区锋生次级环流与辐合作用共同产生的上升运动, 促使对流不稳定能量释放导致大暴雨。“温比亚”过程, 在水汽达到暴雨阈值、对称不稳定的条件下, 台风倒槽辐合与强锋生次级环流共同作用, 动力抬升作用快速增强, 水汽强烈辐合并向高层输送, 形成大暴雨。

## 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: 145 - 154.



- [2] 王黎娟, 高辉, 刘伟辉. 西南季风与登陆台风耦合的暴雨增幅诊断及数值模拟[J]. 大气科学学报, 2011, 34(6): 662–671.
- [3] 郭荣芬, 鲁亚斌, 李华宏. 盛夏昆明两次致灾大暴雨对比分析[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 122–128.
- [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] ZHENG Feng, ZENG Zhi hua, LEI Xiao tu. A Study of Rapid Decay Typhoons in Offshore Waters of CHINA[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 23(4): 471–480.
- [6] 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.
- [7] 肖柳斯, 湛志刚, 胡东明, 等. 强台风“彩虹”衍生的龙卷风特征分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(3): 21–28.
- [8] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001, 25: 420–432.
- [9] 李江南, 王安宇, 杨兆礼, 等. 台风暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报, 2003, 19(S1): 152–159.
- [10] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法(第三版)[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 112–115.
- [11] 刘海文, 全美兰, 朱玉祥, 等. 锋生及其次级环流对北京 2012. 7. 21 最大降水增幅和最大降水的影响[J]. 热带气象学报, 2014, 30(5): 911–920.
- [12] 郭英莲, 王继竹, 李才媛. 锋生作用对年梅汛期湖北暴雨的影响[J]. 气象, 2014, 40(1): 86–93.
- [13] 张芳华, 陈涛, 杨舒楠, 等. 一次冬季暴雨过程中的锋生和条件对称不稳定分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1048–1057.
- [14] 王伏村, 许东蓓, 姚延锋, 等. 一次陇东大暴雨的锋生过程及倾斜涡度发展[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 419–431.
- [15] 丁治英, 王慧, 沈新勇, 等. 一次梅雨期暴雨与中层锋生、 $\beta$ 中尺度小高压的关系[J]. 大气科学学报, 2010, 33(2): 142–152.
- [16] 韩桂荣, 何金海, 樊永富. 变形场锋生对 0108 登陆台风温带变性和暴雨形成作用的诊断分析[J]. 气象学报, 2005, 63(4): 468–476.
- [17] 李娜, 冉令坤, 周玉淑, 等. 北京“7. 21”暴雨过程中变形场引起的锋生与倾斜涡度发展诊断分析[J]. 气象学报, 2013, 71(4): 593–605.
- [18] 李兆慧, 王东海, 王建捷, 等. 一次暴雪过程的锋生函数和急流-锋面次级环流分析[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1505–1515.

## Comparative Analysis of Dynamic Mechanism of Two Severe Torrential Rain of Typhoon in 2018 in Liaoning

YAN Qi<sup>1</sup>, ZHAO Zhiqi<sup>2</sup>, LI Shuang<sup>1</sup>, TENG Fangda<sup>1</sup> and ZHOU Tianjiao<sup>1</sup>

(1. Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110166, China; 2. Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166, China)

**Abstract:** Conventional, unconventional, and reanalyzed data was used to comparatively analyze the formation of the heavy rains in Liaoning Province caused by the two typhoons northward of August 2018. The results show that the two processes occur under the action of the three-band system. The subtropical high is stable and there are two typhoon activities on the periphery, and the short-wave groove of the westerly wind moves eastward. The strong precipitation areas are located in the high and low altitude jet coupling areas. The water vapor transmission channel of the “Yaji” process is long, wide and lasts for a long time; The water vapor in the “Rumbia” process is mainly derived from “Rumbia”, and has short transport path and duration. The south-west wind and the westerly wind combine to drive the  $\theta_{se}$  gradient to increase the elongation, and the wind speed convergence in the area of the wind perpendicular to dense  $\theta_{se}$  line produce frontogenesis, the two factors together form dynamic mechanism of frontogenesis in the warm zone. The southerly wind and the easterly wind combine to drive the  $\theta_{se}$  gradient to increase the elongation, deformation and frontogenesis. The front and divergence terms formed by the two decomposition terms of shear deformation have a good cooperation in southeastern Liaoning. The three factors together form a strong front during the “Rumbia” process. The water vapor transport and spoke cooperation of the “aji” process made most of the water vapor in Liaoning full. The ascending motion generated by the secondary circulation of the warm zone causes the convective unstable energy release to cause heavy rain. In the “Rumbia” process, under the condition that the water vapor reaches the storm threshold and the strong symmetry instability, the combination of the typhoon inverted convergence and the strong frontal secondary circulation causes the dynamic uplift to be rapidly enhanced, and the water vapor is strongly radiated and merged to the high level to form a heavy rain.

**Key words:** heavy rain of typhoon; frontogenesis; secondary circulation; mechanism; comparative analysis