

## 两个相似路径台风途经鲁西南时降水差异的成因分析

李瑞芬<sup>1,2</sup>, 郭卫华<sup>1,2</sup>, 丛春华<sup>1,3</sup>, 袁月<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. 山东省济宁市气象局, 山东 济宁 272000; 3. 山东省气象台, 山东 济南 250031)

**摘 要:** 基于常规观测资料和FNL再分析资料,对比分析了两个相似路径台风“摩羯”(1814)和台风“温比亚”(1818)在途经鲁西南地区时降水分布差异的成因。结果表明:环流形势的差异是导致两个台风降水分布差异的主要原因,500 hPa上台风“摩羯”处于均压场中,降水以台风本体降水为主,位于台风顶部,而台风“温比亚”并入高空槽中,降水以锋面降水为主,位于台风移向的右前侧。两个台风的水汽源地不同,水汽辐合的位置也存在差异,500 hPa正涡度平流和925 hPa切变线位置对降水落区具有较好的指示作用。台风“摩羯”的正压暖心结构和稍弱的环境垂直风切变比具有斜压锋生结构和较强环境垂直风切变的台风“温比亚”更有利于在台风附近形成降水。对两个台风进行中尺度诊断分析发现,非地转湿Q矢量和垂直螺旋度可以很好地诊断降水落区;湿位涡显示,湿正压项 $<0$ 仅是降水发生的必要条件,并不能决定降水发生的位置,湿斜压项更能体现降水发生的位置和强度。

**关键词:** 相似路径台风;降水差异;非地转湿Q矢量;垂直螺旋度;湿位涡

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)02-0040-10

### 1 引言

登陆台风的降水落区一直是预报业务关注的重点。许多学者从台风内部涡旋结构、台风环流与周围天气系统的相互作用和地形强迫抬升等方面对台风降水落区进行了深入研究<sup>[1-4]</sup>,并取得了一系列成果。但在实际的预报业务中,台风降水落区预报仍存在较大困难。相似预报法是台风降水预报业务中最常用的方法之一<sup>[5]</sup>。由于台风降水本身存在明显的不对称性分布以及所处的环流形势存在差异,不同台风即使路径相似,降水分布也不尽相同。范爱芬等<sup>[6]</sup>对比分析了3个路径相似的热带气旋,发现西风槽与副热带高压(简称“副高”)的强弱和配置及与热带气旋的相互作用是降水落区差异的主要原因。梁红丽等<sup>[7]</sup>指出台风暴雨的分布差异主要是环境场气流作用。卜松等<sup>[8]</sup>则发现南亚高

压、副高、水平风垂直切变和冷暖平流等均会对台风降水分布产生影响。杨舒楠等<sup>[9]</sup>对两次台风的冷空气作用形式和台风暴雨影响进行了对比分析,发现冷空气的不同入侵方式也会造成显著的降水分布差异。针对不同类型的台风,需要关注的主要影响因素也存在一定差异。

近年来,中尺度诊断分析方法被不断地运用到台风降水中,最常用的方法包括Q矢量分析、湿位涡(Moist Potential Vorticity, MPV)分析和螺旋度分析等。覃武等<sup>[10]</sup>从MPV角度对台风“山竹”(1822)造成广西强降水异常分布的成因进行分析,发现强降水主要出现在湿正压项( $MPV_1$ )负值中心附近和 $MPV_1$ 负值区与湿斜压项( $MPV_2$ )正值区相叠加的区域。刘晓汝等<sup>[11]</sup>对超强台风“利奇马”(1909)引发浙江特大暴雨过程进行分析发现,低层正螺旋度和高层负螺旋度中心的重叠区对对流性降水落区有一

收稿日期: 2021-01-30; 修回日期: 2021-05-05。

基金项目: 山东省气象局预报员专项(SDYBY2017-11);山东省气象局青年科研基金项目(2020SDQN16)。

作者简介: 李瑞芬(1988-),女,工程师,硕士,主要从事天气预报工作及研究领域研究。E-mail: lrfnuist@126.com

定的指示。韩芙蓉等<sup>[12]</sup>通过对“莫兰蒂”台风暴雨的湿 $Q$ 矢量和垂直螺旋度分析发现,低层正垂直螺旋度与台风移动和强度变化相对应,而非地转湿 $Q$ 矢量在台风暴雨预报中作用更突出。陈有利等<sup>[13]</sup>指出非地转湿 $Q$ 矢量散度负值对强降水有6~12 h的提前预示。中尺度诊断分析方法也被逐渐应用于相似路径台风降水对比分析中,曹宗元等<sup>[14]</sup>从螺旋度和MPV角度分析了相似路径台风降水差异的形成原因,指出垂直螺旋度大值区和高低层MPV的配置对降水区有很好的指示作用。

虽然前人对台风降水分布特征的原因进行了大量研究,也获得了较多的预报经验,但因影响台风降水落区的主要因素存在个体差异,使得利用相似路径台风预报台风降水落区也存在较大的不确定性。如果能找出相似路径台风降水落区差异的形成原因,提炼影响台风降水的关键因素,将有助于提高台风降水落区预报的准确性,使预报员更全面地认识台风降水的形成机制。台风“摩羯”(1814)和台风“温比亚”(1818)是路径较为相似的两个台风,尤其在途经鲁西南地区时,台风路径几乎重合,但降水分布差异较大。本文利用中国台风网(网址:<http://www.typhoon.org.cn>)提供的CMA-STI热带气旋最佳路径数据集资料、常规观测资料、雷达资料和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的6 h全球分析和预报数据(FiNaL operational global analysis and forecast data, FNL)再分析资料( $1^\circ \times 1^\circ$ ),对这两个相似路径台风在途经鲁西南地区时降水分布差异的原因进行对比分析。

## 2 相似路径台风概况和降水特征分析

### 2.1 相似路径台风概况

2018年14号台风“摩羯”于8月7日17:00(北京时,下同)生成于西北太平洋洋面,12日23:00以强热带风暴强度登陆浙江温岭,13日23:00在安徽境内减弱为热带低压,之后转为向偏北方向移动,14日5:00前后进入山东单县,15日5:00在黄河入海口附近进入渤海,15日8:00强度增强为热带风暴,15日11:00转向,16日白天逐渐减弱消失。

2018年18号台风“温比亚”于8月15日8:00生成于我国东海洋面,8月17日4:00以强热带风暴强度登陆上海浦东,18日14:00在河南境内减弱为热带低压,19日5:00在河南东部转向东北方向,19日20:00左右进入山东单县,20日5:00在黄河口附近进入渤海。

### 2.2 降水特征分析

两个台风路径相似(见图1a),尤其在途经鲁西南地区时几乎重合,且台风强度相当,台风中心地面最大平均风速均为16 m/s,台风中心海平面最低气压约为996 hPa,但降水分布差异较大。途经鲁西南地区时,台风“摩羯”产生的降水随着台风的临近不断增大,而台风“温比亚”产生的降水在台风来临前降水较大,台风临近时基本无降水,造成大范围降水空漏报现象,给台风降水的精细化预报带来了较大的困难。从台风“摩羯”14日5:00—8:00的降水(见图1b)和台风“温比亚”19日20:00—23:00的降水(见图1c)对比来看,两个台风3 h累积降水量最大值均超过70 mm;台风“摩羯”引起的强降水主要分布在台风移动方向的顶部和台风中心附近,距离较远的地方降水较弱,而台风“温比亚”引起的强降水主要分布在台风移动方向的右前侧,与台风中心有一定距离,台风中心只有微量降水。

## 3 环流形势对比分析

500 hPa上(见图2a和2b),14日8:00副高较强,呈块状分布,脊线位置偏北,588 dagpm线西界位于山东沿海,北部高空槽距离台风较远,台风“摩羯”位于副高西侧的均压场中,有闭合环流中心,其涡度平流呈南北对称分布,正涡度平流位于台风顶部。19日20:00副高呈带状分布,脊线偏南,588 dagpm线西界位于江浙一带,台风“温比亚”与高空槽合并,经向度较大,台风位于高空槽底,涡度平流呈东西分布,正涡度平流位于高空槽前。500 hPa正涡度平流区与相应的降水区较为一致。

925 hPa上(见图2c和2d),14日8:00台风附近为规则的倒槽环流,超低空急流范围较大,一部分来自副高南侧的15号台风“丽琵”,一部分来自季风涌。19日20:00台风附近的倒槽环流不规则,超低

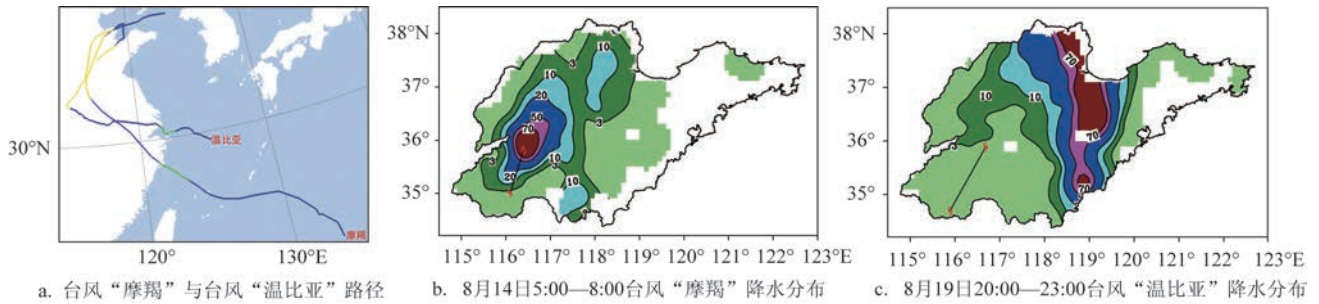


图1 台风“摩羯”与台风“温比亚”路径及降水分布

Fig.1 The track and rainfall distribution of typhoon "Yagi" and "Rumbia"

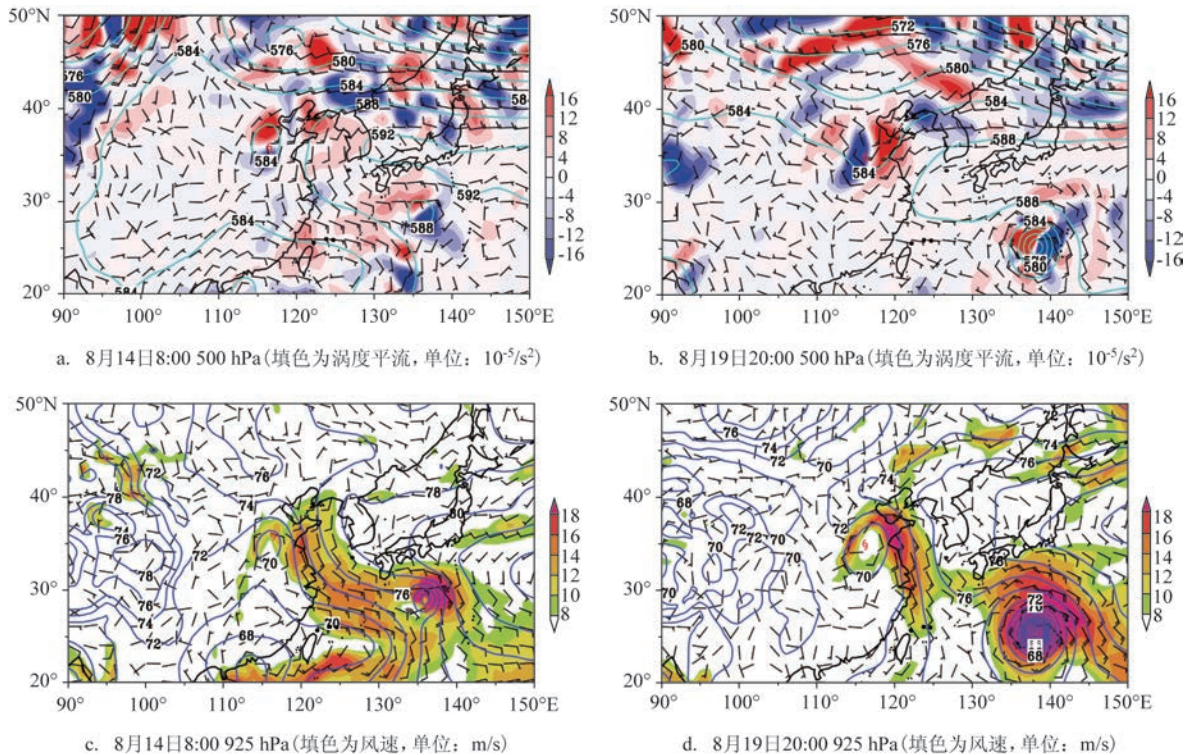


图2 台风“摩羯”与台风“温比亚”环流形势(等值线:高度场,单位:dagpm;风向杆:风场)

Fig.2 The synoptic situation of typhoon "Yagi" and "Rumbia" (contour: height field, unit: dagpm; barb: wind field)

空急流范围较小,强度稍强,小部分来自19号台风“苏力”,大部分来自中国南海。另外,14日8:00台风附近的风向切变主要位于台风顶部,而19日20:00风向切变和风速辐合均位于台风中心的右侧。925 hPa风切变所在位置与降水区也较为一致。

两个台风位置几乎一致,但所处的环流形势存在明显差异。500 hPa上台风“摩羯”位于均压场中,存在闭合环流,而台风“温比亚”并入高空槽中;925 hPa台风“摩羯”的切变线主要位于台风顶部,而台风“温比亚”的切变线位于台风中心的右侧。500 hPa

正涡度平流区和925 hPa风切变所在位置可以较好地指示两个台风的降水落区。环流形势的差异是导致两个台风降水分布差异的主要原因。

#### 4 台风环流大小和结构特征对比

两个台风途经鲁西南地区时地面气压场存在一定差异(图略),台风中心最低气压均低于997.5 hPa,但台风环流大小相差较大。14日8:00台风“摩羯”最外围近似圆形的等压线直径约350 km,19日

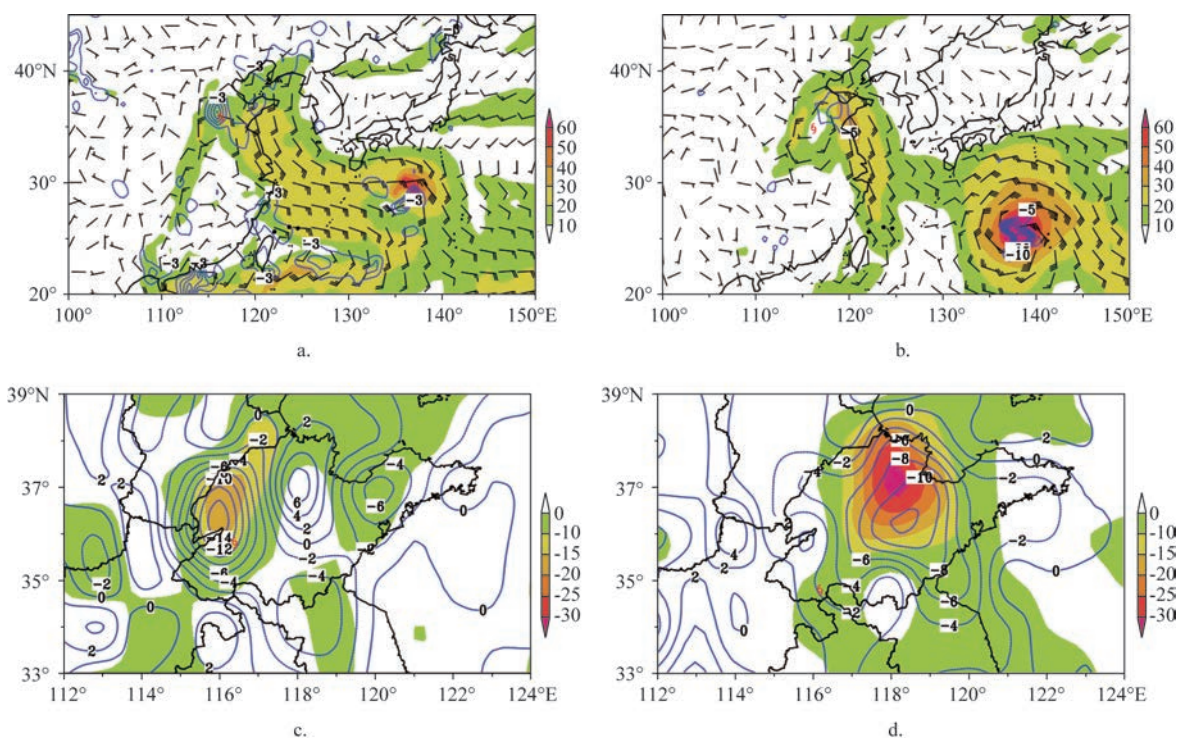
20:00 台风“温比亚”的达到 750 km,其环流大小明显大于台风“摩羯”。从两个台风途经鲁西南时的雷达回波(图略)可以看出,台风“摩羯”的强回波区主要位于台风中心的顶部,距离台风中心较近,以台风本体降水为主,回波区由台风中心顶部向东北方向倾斜,14日5:00前后在台风移向右侧还存在回波区,回波相对分散,随着时间推进至8:00,回波都集中在顶部附近且呈块状。台风“温比亚”呈现空心结构,强回波区距离台风中心较远,位于台风移向的右前侧,19日20:00回波的长宽比较小且呈块状,随着时间推进,经向度逐渐加大并呈带状分布,有明显的锋面降水回波特征。

## 5 降水差异的影响因子对比分析

### 5.1 水汽条件分析

较好的环流形势下形成降水的首要条件是有

水汽由源地向降水区输送。从水汽通量来看(见图3a和3b),台风“摩羯”的水汽主要来源于台风“丽琵”和季风涌,其将东部洋面和南海的水汽向降水区输送,而台风“温比亚”的水汽主要来源于东海,台风“苏力”的水汽输送较弱。两个台风的水汽来源存在较大差别,台风附近的水汽通量分布也存在较大差异。台风“摩羯”的水汽通量在半岛北部存在方向辐散,在鲁中地区存在明显的方向辐合,而台风“温比亚”的水汽通量则在鲁北和鲁中东部存在方向和大小的辐合。从水汽通量散度来看(见图3c和3d),虽然台风“摩羯”的水汽源地范围广,但14日8:00整层积分的水汽通量辐合明显弱于19日20:00,925 hPa上14日8:00的水汽通量散度辐合稍强于19日20:00。总体上看,两个台风的水汽源地不同,水汽通量辐合的位置也存在较大差异,台风“摩羯”位于台风中心附近,而台风“温比亚”位于台风右前侧,且不管是整层的还是单层的水汽通量辐



图a、b分别为8月14日8:00和8月19日20:00 925 hPa水汽通量(风向杆,单位: $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$ )、水汽通量大小(填色)和水汽通量散度(虚线,单位: $10^{-5} \text{g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$ )

图c、d分别为8月14日8:00和8月19日20:00整层积分(1 000~100 hPa)的水汽通量散度(填色,单位: $10^{-2} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ )和925 hPa水汽通量散度(等值线)

图3 台风“摩羯”与台风“温比亚”水汽通量和水汽通量散度

Fig.3 The water vapor flux and water vapor flux divergence of typhoon "Yagi" and "Rumbia"

合大值区均与各自的降水区吻合较好。

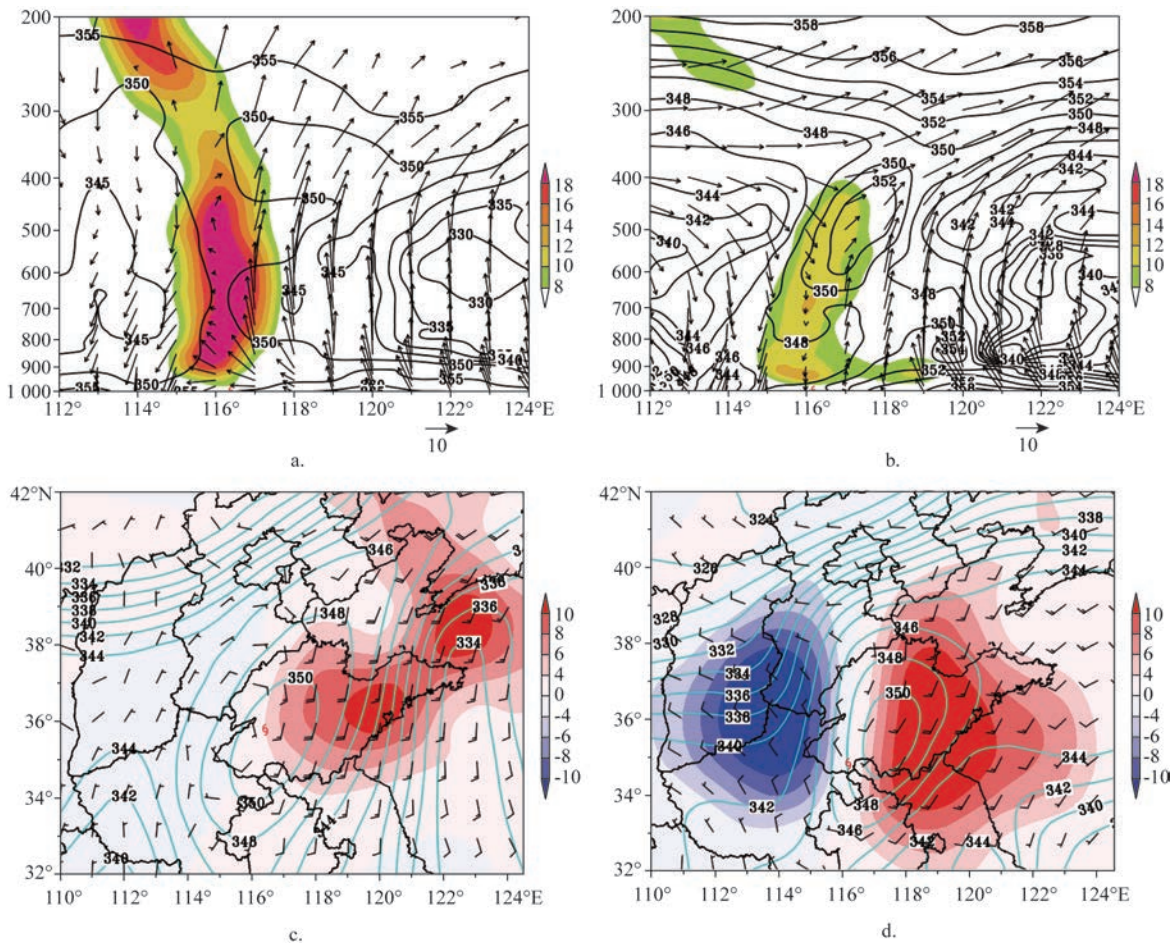
## 5.2 动力抬升条件

在充足的水汽供应条件下,降水的形成还需要垂直运动使水汽在动力抬升过程中绝热膨胀冷却凝结成云。从沿台风中心的散度和垂直速度的剖面图(图略)可以看出,14日8:00低层辐合中心和高层的辐散中心均位于台风中心附近,在高低层系统的共同作用下,对应台风中心上空形成了较强的上升气流;19日20:00台风中心附近没有形成明显的上升运动,而在台风右侧的119°E附近低层辐合和高层辐散明显,形成较强的上升运动。台风“摩羯”

附近上升运动区位于台风中心附近,台风“温比亚”位于台风中心东侧。造成两个台风动力抬升位置不同的主要原因是500 hPa正涡度平流的位置和925 hPa风场辐合的位置,这也进一步验证了环流形势的重要作用。

## 5.3 热力条件及冷空气作用

台风在低纬度常常维持正压暖心结构,随着系统北抬与高纬度西风槽结合,变性锋生形成斜压结构。为验证其正压暖心结构是否变性,利用图4a和4b来分析假相当位温、涡度和水平风场的垂直剖面分布。14日8:00台风“摩羯”中心上空假相当位温



图a、b分别为8月14日8:00和8月19日20:00沿36°N的假相当位温(等值线,单位:K)、涡度(填色,单位: $10^{-5}/s$ )和水平风场(矢量,单位:m/s)垂直剖面  
图c、d分别为8月14日8:00和8月19日20:00 500 hPa假相当位温(等值线,单位:K)、温度平流(填色,单位: $10^{-5} K/s$ )和风场(风向杆)分布

图4 台风“摩羯”与台风“温比亚”假相当位温和风场分布

Fig.4 The vertical profiles of potential pseudo-equivalent temperature and wind field of typhoon "Yagi" and "Rumbia"

分布对称,涡度垂直发展,表现为正压暖心结构,且台风中心为南风,表明冷空气未侵入台风中心;19日20:00台风“温比亚”中心上空表现为斜压锋生结构,台风中心转为北风,冷空气侵入台风中心,涡度明显较弱。图4c和4d为500 hPa假相当位温、温度平流和风场分布图,从图中可以看出,台风“摩羯”附近假相当位温分布稀疏,台风西侧的冷平流较弱,风场上存在闭合环流中心;而台风“温比亚”西侧假相当位温梯度较大,且存在较强冷平流,风场上表现为切变没有闭合。分析结果进一步验证了台风“摩羯”为正压暖心结构,而台风“温比亚”为斜压锋生结构。

#### 5.4 环境垂直风切变

Knaff等<sup>[15]</sup>指出热带气旋高空暖心结构会随对应的垂直风切变的增强而减弱。通过计算台风中心附近5个经纬度的矩形区域范围内200 hPa与850 hPa之间的垂直风切变发现,台风“摩羯”的切变为9.9 m/s,而台风“温比亚”为15.4 m/s,明显大于台风“摩羯”,较大的垂直风切变不利于台风“温比亚”高空暖心结构的维持,这也进一步印证了上一节的观点。两个台风的切变方向均指向东北,台风“温比亚”偏东分量更大,因其路径偏东分量也大,两个台风的移动方向与风切变方向夹角基本相等,这种情况与Chen等<sup>[16]</sup>结论一致,降水分布在台风附近及其与切变之间。Chen等<sup>[16]</sup>还指出在不同的风切强度下,移动路径的作用是不同的,环境水平风垂直切变较大时,切变占主导作用,内核降水易发生在顺风切下方左侧,环境水平风垂直切变较小时,移

动则发挥主要作用。台风“摩羯”的环境垂直风切变明显弱于台风“温比亚”,所以台风“摩羯”比台风“温比亚”更有利于在台风附近形成降水。

## 6 中尺度诊断分析

### 6.1 非地转湿Q矢量分析

我们利用综合了动力和热力作用的非地转湿Q矢量来诊断台风降水。利用张兴旺<sup>[17]</sup>推导出的非地转湿Q矢量公式,我们计算得出850 hPa湿Q矢量和湿Q矢量散度分布图(见图5)。14日8:00湿Q矢量大值区位于台风中心附近,表现为明显的向台风中心辐合,湿Q矢量散度辐合中心最大达 $2.5 \times 10^{-15} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^3)$ 以上,辐合中心位于台风“摩羯”中心附近;19日20:00湿Q矢量大值区和湿Q矢量散度辐合中心均位于鲁中东部地区,距离台风中心较远,与台风“温比亚”形成的降水区较为一致,湿Q矢量散度辐合中心最大也达到了 $2.5 \times 10^{-15} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^3)$ 以上。总体来看,台风“摩羯”的湿Q矢量辐合中心位于台风中心附近,台风“温比亚”的则距离台风中心较远,位于台风移向右前侧,但两个台风湿Q矢量辐合区的强弱分布和范围大小与降水强弱和落区的对应关系较好。因此,非地转湿Q矢量可以很好地诊断两个台风的降水情况。

### 6.2 垂直螺旋度分析

螺旋度(Helicity)是一个用来衡量风暴入流气流的强弱及沿入流方向的涡度分量大小的参数<sup>[18]</sup>。垂直螺旋度为垂直速度和垂直涡度的乘积,能体现

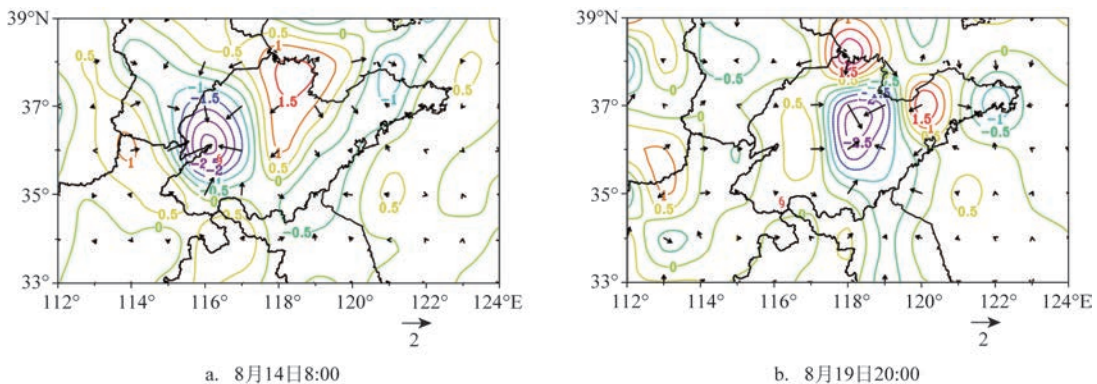


图5 台风“摩羯”与台风“温比亚”850 hPa湿Q矢量(矢量,单位: $10^{-10} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^2)$ )和湿Q矢量散度(等值线,单位: $10^{-15} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^3)$ )

Fig.5 The wet Q-vector (vector, unit:  $10^{-10} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^2)$ ) and wet Q-vector divergence (contour, unit:  $10^{-15} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^3)$ ) on 850 hPa of typhoon "Yagi" and "Rumbia"

台风在垂直方向上的旋转特点和上升运动情况。从垂直剖面图可以看出(见图6a和6b),两个台风均不存在明显的正负垂直螺旋度对,因台风“摩羯”的涡度和垂直速度均比台风“温比亚”大,导致台风“摩羯”的垂直螺旋度明显大于台风“温比亚”,且台风“摩羯”的正垂直螺旋度位于台风中心附近,而台风“温比亚”的则位于台风东侧,两个台风正垂直螺旋度所在位置与降水落区较为一致。选取两者垂直螺旋度较大的层次900 hPa,由其平面图可以看出(见图6c和6d),台风“摩羯”的垂直螺旋度正值区位于台风中心附近,台风“温比亚”位于台风移向右前侧,进一步验证了垂直螺旋度正值区与降水落区较为一致,因此可以用垂直螺旋度诊断台风降水。

### 6.3 湿位涡异常的分析

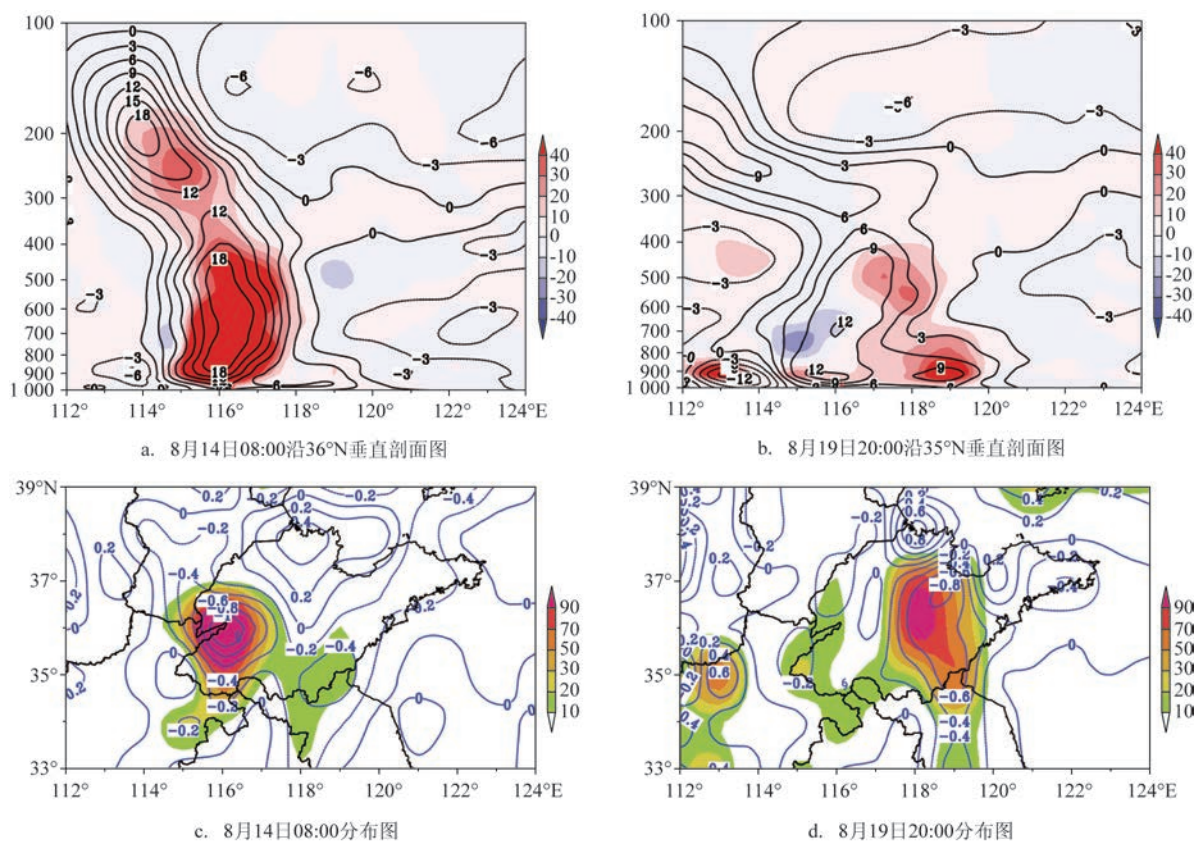
湿位涡不仅包含大气动力和热力属性,而且考

虑了水汽的作用,所以对湿位涡进行诊断,可以寻求各热力、动力和水汽条件与降水的关系,从而揭示降水发生发展的物理机制<sup>[19]</sup>。湿位涡(MPV)可以分为湿正压项(MPV<sub>1</sub>)和湿斜压项(MPV<sub>2</sub>):

$$MPV_1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \quad (1)$$

$$MPV_2 = g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \quad (2)$$

MPV<sub>1</sub>表示惯性稳定性和对流稳定性的作用,MPV<sub>1</sub> < 0表示大气对流不稳定,不稳定能量释放有利于暴雨发生发展;MPV<sub>2</sub>包含了湿斜压性和水平风垂直切变的贡献,MPV<sub>2</sub> > 0表示水平湿斜压性增加,有利于垂直涡度增长。图7为975 hPa的湿位涡分布图,从图中可以看出,两个台风发生降水的位置MPV<sub>1</sub>均小于0及MPV<sub>2</sub>均大于0,都有利于降水的发生。14日8:00 MPV<sub>2</sub>正值区位于台风中心附



图a、b分别为8月14日8:00和8月19日20:00沿36°N的涡度(等值线,单位:10<sup>-5</sup>/s)和垂直螺旋度(填色,单位:10<sup>-6</sup>m/s<sup>2</sup>)分布  
图c、d分别为8月14日8:00和8月19日20:00 900 hPa垂直螺旋度(填色)和垂直速度(等值线,单位:Pa/s)分布

图6 台风“摩羯”与台风“温比亚”涡度、垂直螺旋度和垂直速度分布

Fig.6 The vertical profiles of vorticity, vertical helicity and vertical speed of typhoon "Yagi" and "Rumbia"

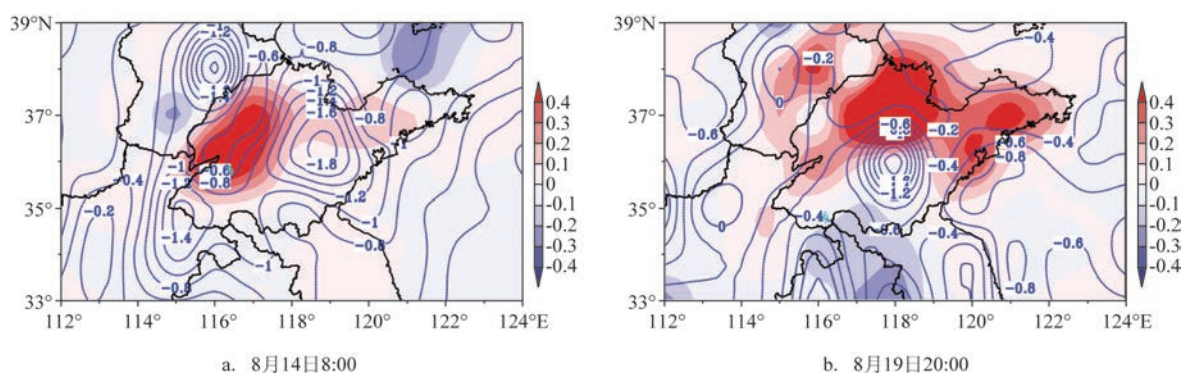


图7 台风“摩羯”与台风“温比亚”975 hPa湿位涡分布(单位:PVU;等值线:MPV<sub>1</sub>,填色:MPV<sub>2</sub>)

Fig.7 The distribution of moist potential vorticity on 975 hPa of typhoon "Yagi" and "Rumbia" (unit: PVU; contour: MPV<sub>1</sub>, shaded: MPV<sub>2</sub>)

近,而19日20:00 MPV<sub>2</sub>正值区距离台风较远,也可以很好地解释台风“摩羯”的涡度垂直向上发展,而台风“温比亚”的涡度随高度向降水区倾斜。此外,虽然降水区所在位置 MPV<sub>1</sub> 均为负值,但不是负值中心,而 MPV<sub>1</sub> 负值中心仅出现微量降水,表明对流不稳定仅是降水发生的必要条件,并不能决定降水发生的位置,MPV<sub>2</sub> 能更好地体现降水发生的位置和强度。

## 7 结论

台风“摩羯”与台风“温比亚”路径相似,尤其在途经鲁西南地区时路径几乎一致,但两个台风产生的降水分布差异较大,台风“摩羯”引起的降水主要分布在台风移动方向的顶部和台风中心附近,而台风“温比亚”引起的降水主要分布在台风移动方向的右侧。文章对两个台风降水差异的成因进行了分析。结论如下:

(1)两个台风所处的环流形势存在差异,这是两个台风降水差异的主要原因。500 hPa 台风“摩羯”位于均压场中,存在闭合环流,台风没有发生变性,有利于台风保持原有的结构特征,涡度平流呈南北对称分布,而台风“温比亚”处在高空槽中,已经发生变性,涡度平流呈东西分布,正涡度平流中心与降水中心位置较为一致;925 hPa 台风“摩羯”的切变线主要位于台风顶部,而台风“温比亚”的切变线位于台风中心的右侧。

(2)两个台风的水汽源地不同,但均在降水区

形成较强的水汽辐合,500 hPa 正涡度平流和925 hPa 风场辐合使得辐合的水汽在不同位置抬升成云致雨,而台风“摩羯”的正压暖心结构和稍弱的环境垂直风切变比具有斜压锋生结构和较强环境垂直风切变的台风“温比亚”更有利于在台风附近形成降水。

(3)对两个台风进行中尺度诊断分析发现,非地转湿 Q 矢量和垂直螺旋度可以很好地诊断降水落区,湿位涡显示 MPV<sub>1</sub> < 0,即对流不稳定仅是降水发生的必要条件,并不能决定降水发生的位置,MPV<sub>2</sub> 能更好地体现降水发生的位置和强度。

在业务工作中,可以利用相似预报法对相似路径台风进行降水落区预报,但要注意相似路径台风所处的环流形势是否相同。对于进入西风带的台风要特别注意台风与西风槽和副高的相对位置以及台风是否变性为锋面气旋,这对台风降水落区影响较大。水汽通量辐合区和垂直运动上升区对降水有很好的指示作用。此外,可以多利用非地转湿 Q 矢量、垂直螺旋度和湿位涡分析等中尺度诊断分析方法进行诊断分析,以提高台风降水预报的准确性。

## 参考文献:

- [1] 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.  
Chen L S, Meng Z Y, Cong C H. An overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(4): 1-7.
- [2] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋与中纬度环流系统相互作用的研究进展[J]. 热带气象学报, 2001, 17(4): 452-461.

- Lei X T, Chen L S. An overview on the interaction between tropical cyclone and mid-latitude weather systems[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2001, 17(4): 452-461.
- [3] 寿绍文. 中国暴雨的天气学研究进展[J]. *暴雨灾害*, 2019, 38(5): 450-463.
- Shou S W. Progress of synoptic studies for heavy rain in China[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(5): 450-463.
- [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] 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.
- Chen J, Kong Y S. The application of satellite nephogram on analog forecast for typhoon track[J]. *Marine Forecasts*, 2004, 21(3): 22-28.
- [6] 范爱芬, 李秀莉, 董加斌. 三个路径相似降雨特征不同的热带气旋分析[J]. *气象*, 2004, 30(5): 33-37.
- Fan A F, Li X L, Dong J B. Analysis of three tropical cyclones with similar tracks but different precipitation feature[J]. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(5): 33-37.
- [7] 梁红丽, 程正泉. 2014年两次相似路径影响云南台风降水差异成因分析[J]. *气象*, 2017, 43(11): 1339-1353.
- Liang H L, Cheng Z Q. Cause analysis of precipitation difference between two typhoons influencing Yunnan along similar tracks in 2014[J]. *Meteorological Monthly*, 2017, 43(11): 1339-1353.
- [8] 卜松, 李英. 华东登陆热带气旋降水不同分布的对比分析[J]. *大气科学*, 2020, 44(1): 27-38.
- Bu S, Li Y. Comparative analysis of precipitation distributions of tropical cyclones making landfall in East China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(1): 27-38.
- [9] 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.
- Yang S N, Chen T, Liu J Y. Comparative analysis of TC rainstorms induced by cold air intrusion of two TC cases[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(2): 324-335.
- [10] 覃武, 赵金彪, 黄荣成, 等. 台风“山竹”登陆结构变化及造成广西强降水异常分布的成因分析[J]. *热带气象学报*, 2019, 35(5): 587-595.
- Qin W, Zhao J B, Huang R C, et al. Cause analysis on the structural change of typhoon Mangkhut during its landing and the abnormal distribution of heavy precipitation in Guangxi[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 35(5): 587-595.
- [11] 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.
- Liu X R, Xie Z W. Analysis of rainstorm caused by super typhoon "Lekima" in Zhejiang Province of 2019[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2020, 40(1): 89-96.
- [12] 韩芙蓉, 鹿翔, 梁亮. “莫兰蒂”台风暴雨的湿Q矢量和垂直螺旋度分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(1): 67-74.
- Han F R, Lu X, Liang L. Analysis of wet ageostrophic Q-vector and vertical helicity of rainstorm of typhoon "Meranti" [J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(1): 67-74.
- [13] 陈有利, 钱燕珍, 潘灵杰, 等. 一次与台风相关联的浙江东北部暴雨成因及预报难点分析[J]. *干旱气象*, 2018, 36(2): 272-281.
- Chen Y L, Qian Y Z, Pan L J, et al. Causes analysis of a heavy rainfall associated with typhoon and forecast difficulties in northeastern Zhejiang[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, 36(2): 272-281.
- [14] 曹宗元, 陈淑琴, 刘飞, 等. 相似路径台风“天鹅”(1515)和“珊珊”(0613)降水差异分析[J]. *海洋预报*, 2018, 35(3): 48-56.
- Cao Z Y, Chen S Q, Liu F, et al. Analysis on precipitation difference between the similar track typhoon "GONI" (1515) and "Shanshan" (0613)[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(3): 48-56.
- [15] Knaff J A, Seseske S A, DeMaria M, et al. On the influences of vertical wind shear on symmetric tropical cyclone structure derived from AMSU[J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(10): 2503-2510.
- [16] Chen S S, Knaff J A, Marks Jr F D. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(11): 3190-3208.
- [17] 张兴旺. 湿Q矢量表达式及其应用[J]. *气象*, 1998, 24(8): 3-7.
- Zhang X W. An expression of the wet Q vector and application[J]. *Meteorological Monthly*, 1998, 24(8): 3-7.
- [18] 岳彩军. Q矢量、螺旋度、位涡及位涡反演在台风暴雨研究中的应用进展[J]. *暴雨灾害*, 2014, 33(3): 193-201.
- Yue C J. Progress in application study of Q vector, helicity, potential vorticity and its inversion to torrential rainfall associated with typhoon[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2014, 33(3): 193-201.
- [19] 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, Cai Y P, Tang X J. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(4): 387-405.

## Cause analysis of the precipitation difference between typhoon "Yagi" and "Rumbia" passing through southwest of Shandong Province with similar tracks

LI Ruifen<sup>1,2</sup>, GUO Weihua<sup>1,2</sup>, CONG Chunhua<sup>1,3</sup>, YUAN Yue<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031 China; 2. Jining Meteorological Bureau, Jining 272000 China; 3. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031 China)

**Abstract:** Based on the conventional observation data and FNL reanalysis data, the causes of the precipitation difference between typhoon "Yagi" (1814) and "Rumbia" (1818) passing through southwest of Shandong Province with similar tracks are analyzed in this paper. The results show that the difference in circulation pattern is the main reason for the precipitation difference between the two typhoons. Typhoon "Yagi" is in the equal pressure field on 500 hPa, and the precipitation is mainly from the typhoon itself, which is located at the top of the typhoon. Typhoon "Rumbia" is merged into the upper trough, and the precipitation is mainly frontal precipitation, which is located on the right-front side of the typhoon direction. Moreover, the water vapor sources as well as the locations of vapor convergence of the two typhoons are different. The locations of positive vorticity advection on 500 hPa and the wind shear on 925 hPa have a good indication of the rainfall area, and the barotropic structure with warm center and weaker environmental vertical wind shear of typhoon "Yagi" is more favorable for the formation of precipitation nearby compared to typhoon "Rumbia" with stronger environmental vertical wind shear and baroclinic structure induced by front. The mesoscale diagnosis analysis of the two typhoons shows that the non-geostrophic wet Q-vector and the vertical helicity can be used to diagnose the rainfall area. In addition, the moist potential vortex shows that the wet barotropic term less than 0 is only a necessary condition for the occurrence of precipitation and not a factor determining the location of rainfall, while the wet baroclinic term is a better indicator for the location and intensity of rainfall.

**Key words:** typhoon with similar tracks; precipitation difference; non-geostrophic wet Q-vector; vertical helicity; moist potential vortex