

# 影响河北两次相似路径台风的湿位涡对比分析

何丽华<sup>1</sup> 孔凡超<sup>1</sup> 李江波<sup>1</sup> 梁如意<sup>2</sup> 张 维<sup>3</sup>

(1. 河北省气象台, 石家庄 050021; 2. 河北省气象技术装备中心; 3. 上海台风研究所)

**提 要:** 利用常规的探空和地面资料以及 NCEP/NCAR 全球再分析资料, 对 9711 号台风温妮和 0509 号台风麦莎的变性过程和影响河北暴雨过程的湿位涡场进行了诊断分析。结果表明: 温妮变性再加强过程是一个温带气旋强烈发展的过程, 主要与高层湿位涡扰动下传、热带气旋低压环流两者之间的相互作用有关。而麦莎变性过程中, 没有高层湿位涡扰动下传和热带气旋低压环流之间的相互作用过程, 无再加强过程。对流层中低层  $MPV1 < 0$ 、 $MPV2 > 0$  区域对应暴雨区, 对此类暴雨具有较好的指示意义; 对流层高层高值湿位涡下传, 有利于位势不稳定能量的储存和释放, 使降水增幅。

**关键词:** 台风 暴雨 湿位涡

## Analysis of Wet Potential Vorticity of Two Similar Typhoons Affecting Hebei Province

He Lihua<sup>1</sup> Kong Fanchao<sup>1</sup> Li Jiangbo<sup>1</sup> Liang Ruyi<sup>2</sup> Zhang Wei<sup>3</sup>

(1. Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021; 2. Hebei Meteorological Technology Equipment Center; 3. Shanghai Typhoon Institute, CMA)

**Abstract:** With conventional meteorological data as well as NCEP/NCAR reanalysis data, the processes of the typhoon 9711 and the typhoon Matsa (0509) are diagnosed and compared. The result indicates that the re-strengthening of the typhoon 9711 after its denaturing was due to intense development of a frontal cyclone, which was incarnated by downwards moving of the upper level potential vorticity, the tropical low pressure circulation and the low-level front. But in the process of the denaturing of the typhoon Matsa, there was no low-level front, and the atmospheric slanting piezotropy was weaker. So the mutual influence of downwards moving of the upper level potential vorticity, the tropical low-pressure circulation and the low-level front did not exist.  $MPV1 < 0$  and  $MPV2 > 0$  were characteristic storm rainfall area, which is a good denotation

of this kind of rainstorm. Downwards moving of the upper level potential vorticity is advantageous to releasing of the unstable energy, and causing the increasing precipitation.

**Key Words:** typhoon storm rain wet potential vorticity

## 引 言

湿位涡是反映大气动力、热力和水汽作用的综合物理量,能有效地描述台风变性以及台风暴雨的发生发展,文献[1-3]从完整的原始方程出发,证明了绝热无摩擦饱和大气中湿位涡(或位涡)的守恒性,并研究了湿斜压过程中倾斜位涡的发展理论。余晖等<sup>[4]</sup>依据该理论,研究了热带气旋内部相当位温结构的演变与其强度突变的可能关系。台风暴雨是引发河北省强降水的类型之一。对于台风暴雨,有过许多方面的研究,文献[5-9]对暴雨等天气进行诊断研究,得到了有意义的研究结果。

9711 号台风温妮和 0509 号台风麦莎均是在中国大陆发生变性的热带气旋,但前者变性后强烈发展,后者则减弱消亡。本文用湿位涡理论,对比分析两者的变性过程,探讨热带气旋变性加强和消亡的成因。并以两次台风对河北影响暴雨为例,对湿位涡进行分析,探讨湿位涡在河北台风暴雨中的表征。

## 1 环流背景和暴雨分布特征

1997 年 8 月 10 日 08 时在西北太平洋(15.4°N、153.8°E)生成的 9711 号热带风暴后在东东南气流的影响下向西北偏西方向移动,在移动过程中逐渐加强形成台风。于 18 日 21 时 30 分在浙江温岭登陆,经浙江、安徽进入山东,而后穿过渤海在 21 日 03 时左右在营口再次登陆,此时的中心气压为 994hPa,最后到达东北变性为温带气旋,中心气压为 985hPa。二次登陆时强度明显加

强。20 日 02 时河北省东南部地区开始降水。随着热带气旋的北移,降水强度逐渐增大,到 20 日 14 时 6 小时最大降水出现在乐亭(51mm),由于渤海正处于天文大潮,河北沿海地区出现了 1949 年以来最强的一次风暴潮。直至 20 日 20 时热带风暴中心进入渤海,强度又有所加深,而降水强度减弱,其 6 小时降水为 31mm,到 21 日 3 时左右随着台风在营口再次登陆,河北降水基本结束。

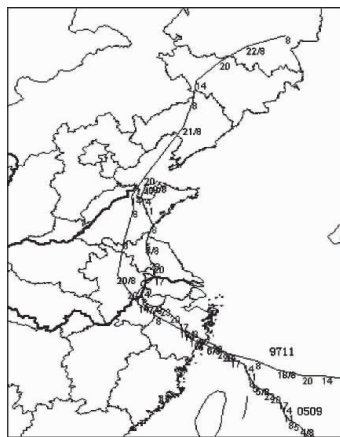


图 1 两次台风路径图

0509 号台风麦莎发生在西太平洋副热带高压稳定的西伸加强,副高位置偏北的背景下,副高脊线一直稳定在 35°N 附近。8 月 7 日 20 时 500hPa 上,蒙古国中部有一明显的高压中心,贝加尔湖附近有一弱的高压脊,贝加尔湖以东有弱冷空气,华北北部到东北地区为一大陆高压;海上副高呈块状,588 线西脊点位于 35°N、125°E。此时台风沿副高外围向北移动。8 日 08 时,大陆高压与蒙古国中部的高压打通,形成一高压坝,588 线西脊点西伸到 35°N、120°E,西部没有明显的冷空气,台风结构得以维持,此时河北受台风外

围云系影响,沧州附近开始出现降水,台风继续沿副高外围北移。到20时,贝加尔湖以东的冷空气东移到东北上空,强热带风暴中心北移到 $38^{\circ}\text{N}$ 、 $119^{\circ}\text{E}$ ,高压坝断裂,此时台风沿两高之间的低值区转向东北方向移动。到9日20时热带风暴与西风带东移的弱冷空气结合,减弱为低压,中心位于 $38.5^{\circ}\text{N}$ 、 $112.8^{\circ}\text{E}$ ,此时副高南撤西伸呈带状分布,随着低压进入辽东半岛,河北降水基本结束。

上述分析表明:“温妮”和“麦莎”都发生在西太平洋副热带高压稳定的西伸加强,副高位置偏北,副高脊线一直稳定在 $30\sim 35^{\circ}\text{N}$ 附近的背景下。两个台风的登陆点相似,“麦莎”路径沿 $119^{\circ}\text{E}$ 往北移动;而“温妮”路径为北偏西;后期副高东撤,两个台风的移动路径均为北偏东。

## 2 湿位涡理论简介

吴国雄<sup>[1]</sup>等定义湿位涡为:单位质量气块的绝对涡度在相当位温梯度方向的投影与这一梯度绝对值的乘积。对无摩擦,湿绝热的饱和大气满足湿位涡守恒。

$$MPV = -g(f\mathbf{k} + \nabla_p \wedge \mathbf{V}) \cdot \nabla_p \theta_e$$

将湿位涡在等压面上展开,定义其垂直和水平分量分别为 $MPV_1$ , $MPV_2$

$$MPV_1 = -g\zeta_p \frac{\partial \theta_e}{\partial p}$$

$$\zeta_p = f + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_p$$

$$MPV_2 = -g\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p} \cdot \nabla_p \theta_e$$

$MPV_1$ 是湿位涡的湿正压项,其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量与相当位温的垂直梯度的乘积( $\zeta_p$ 为 $P$ 坐标系垂直涡度, $f$ 为地转涡度, $\theta_e$ 为相当位温)。 $MPV_2$ 是湿位涡的湿斜压项,其值由风的垂直切变(水平涡度)和相当位温的水平梯度决定。

## 3 热带气旋低压环流变化的湿位涡诊断分析

从“温妮”(图略)的情况看,1997年8月20日20时,“温妮”低压环流移至高空槽前,其低层环流由于登陆耗损已明显衰减, $MPV$ 扰动具有“漏斗式”下垂,伸至500hPa附近。相应 $\theta_e$ 分布显示,此时冷空气已侵入台风内部,台风西部冷气团与东部暖气团产生强烈对比。冷暖气团之间 $\theta_e$ 等值线密集,形成一条明显的通过台风中心的南北向锋区, $\zeta_p$ 大值区位于锋带上。21日08时,高层正 $MPV$ 向下延伸并向南与低层正 $MPV$ 区贯通,21日20时至22日08时,高层 $MPV$ 扰动与低层台风低压上下叠置, $MPV$ 扰动下伸更加明显,除近地层外,台风中心南侧上空形成一条近乎垂直的高值湿位涡柱,同时,台风中心北侧也有一正 $MPV$ 柱产生,其强值区位于对流层中低层并向上与高层 $MPV$ 扰动区相接。由于高层正 $MPV$ 向下延伸。热带气旋环流南部正 $MPV$ 明显增加( $MPV$ 的6小时变量为 $12 \times 10^{-7} \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{K} \cdot \text{kg}$ )。相应的 $\theta_e$ 分布显示,增加的正 $MPV$ 气块引起低层冷空气加强,冷暖空气的对比度加大,等 $\theta_e$ 线更为密集,即湿斜压性增强。根据 $MPV$ 守恒原理,气块必然在铅直方向拉长,使其中 $\theta_e$ 等值线密集度减小<sup>[10]</sup>。同时它必定在水平方向收缩,导致 $\zeta_p$ 增长。因此,高层正 $MPV$ 下传可在低层锋区上诱生出气旋性环流。“温妮”低压由于得到附加的 $\zeta_p$ 而重新得到发展。台风低压环流明显增强。“温妮”变性发展表现为一个温带气旋强烈发展的过程。

“麦莎”与“温妮”的情况明显不同。图2显示,2005年8月7日20时,“麦莎”的低压环流仍较为明显,但 $MPV$ 增长很弱( $MPV$ 的6小时最大变量为 $6 \times 10^{-7} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}$ )。相应 $\theta_e$ 分布(图2b)表明,此时台风低

压位于相对暖区; 8 日 08 时至 8 日 20 时, 一条来自东北的冷舌向西南延伸。台风西部转为较冷区(约为 338K)、东部仍具有 348K 的暖中心, 标志着“麦莎”已发生变性。与“温妮”不同的是, “麦莎”东、西部暖、冷气团温度对比不明显, 其内部无  $\theta_e$  等值线密集区出

现, 大气湿斜压性很弱, 低层无明显的锋区出现。此间, 台风区域  $\Delta_6 MPV$  增长不明显(图略), 随着  $\theta_e$  冷舌加强南伸, 热带气旋区域冷气团加强而暖气团逐渐减弱。9 日 08 时, 整个台风区低层已被冷区占据, “麦莎”被逐渐填塞。

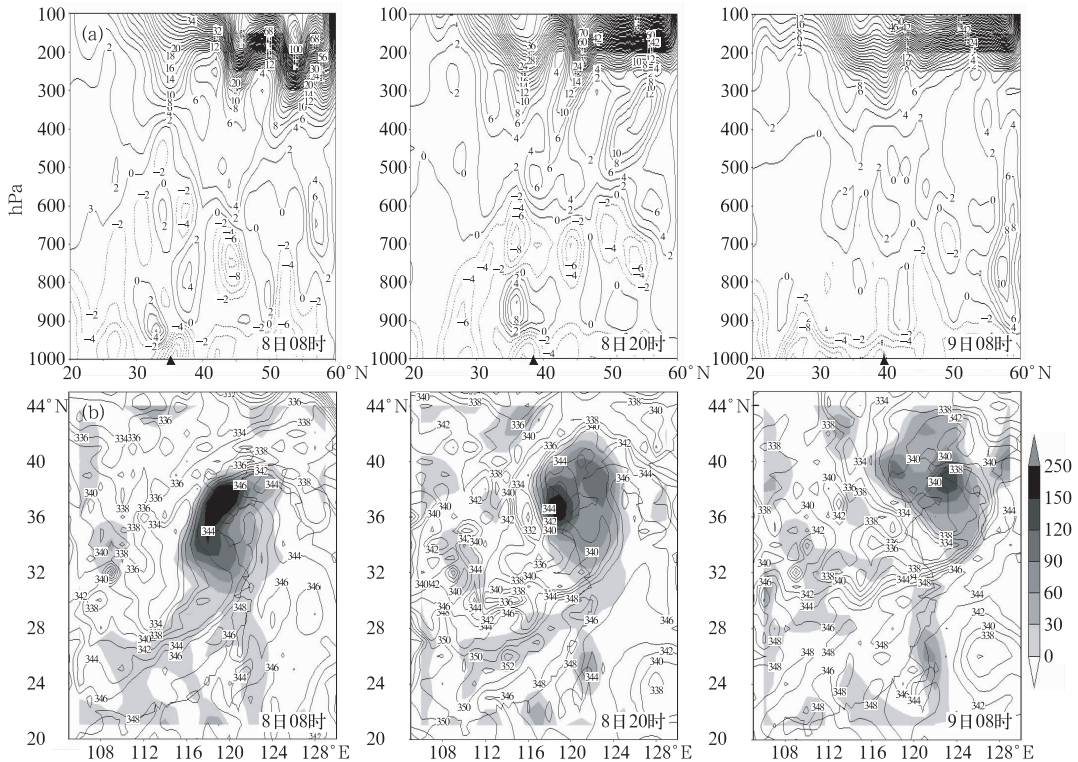


图 2 “麦莎”变性过程经台风中心剖面  $MPV$  的垂直分布(a)(三角符号指示台风中心位置

位;  $10^{-7} \cdot m^2 \cdot s^{-1} K \cdot kg$ )及 850hPa 相当位温  $\theta_e$  (K)和垂直涡度  $\zeta_p$  (b) ( $10^{-5} s^{-1}$  阴影是正值区)的分布

综上所述, “温妮”变性再加强过程主要与高层湿位涡扰动下传、热带气旋低压环流两者之间的相互作用有关。与“温妮”相比, “麦莎”的变性过程中没有高层湿位涡扰动下传及热带气旋低压环流之间的相互作用过程, 无再加强过程。

#### 4 两次台风暴雨过程的湿位涡分析

湿位涡包含水汽的作用, 它与降水存在很大关系。下面将对湿位涡进行分析, 探讨

湿位涡在河北台风暴雨中的表征。

##### 4.1 垂直和水平分量( $MPV1, MPV2$ )的分布特征

图 3 是“温妮”影响河北暴雨时 700hPa 等压面上  $MPV1$  的时空演变。由图可见, 8 月 19 日 20 点(图 3a)  $MPV1$  的正值区中心位于山东和江苏交界处。在河北的北面, 蒙古、山西和河南分别为两个  $MPV1$  负值中心。到 20 日 02 点南北两个负中心打通, 河北受  $MPV1$  负值区控制, 表明河北大气中低

层处于对流不稳定状态,河北沧州地区开始出现降水。20日02时至20日20时河北上空一直为 $MPV1$ 负值控制,其强度和范围比18小时前增加明显(图3b),此时对应着强降

水的集中时段。随着暴雨的产生,不稳定能量逐渐释放。到21日08点(图3c), $MPV1$ 正值区又重新控制了河北北部,虽然河北中北部地区为负值,但均在0值线附近,强降水结束。

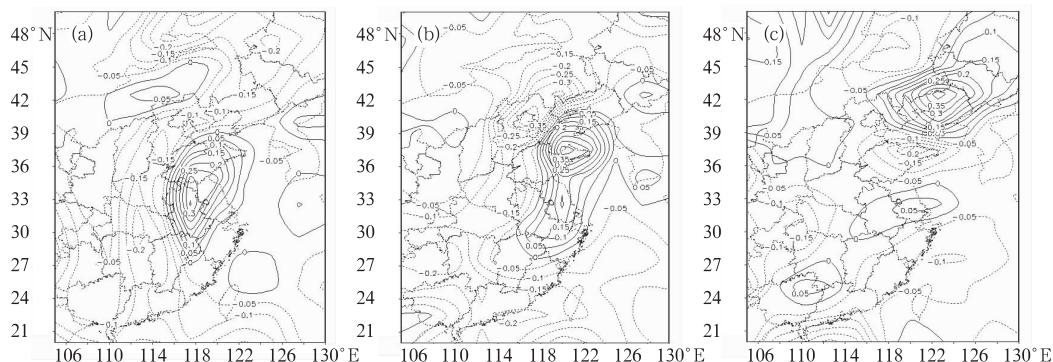


图3 “温妮”影响河北暴雨时700hPa等压面上湿位涡垂直分量 $MPV1$ 的时空演变

a. 19日20时; b. 20日20时; c. 21日08时

图4为同期“温妮”影响河北暴雨时700hPa等压面上湿位涡水平分量 $MPV2$ 的时空演变。 $MPV2$ 正值区的移动可作为低空急流和暖湿气流活动或涡旋活动的示踪。19日20时(图4a),在河南和东北有两个正中心,到20日08时两个正中心打通,河北大部地区为正值 $MPV2$ 覆盖。东北—西南向

的 $MPV2$ 正值区从长江中游经河南直伸向辽宁境内。反映了低空急流的形成过程。20—20时(图4b), $MPV2$ 正值区继续向河北输送,河北东部处于 $MPV2$ 正值中心区,暴雨持续。21日20时(图4c),河北上空 $MPV2$ 的正值区逐渐减弱,意味着暖湿气流不断减弱,河北东部暴雨结束。

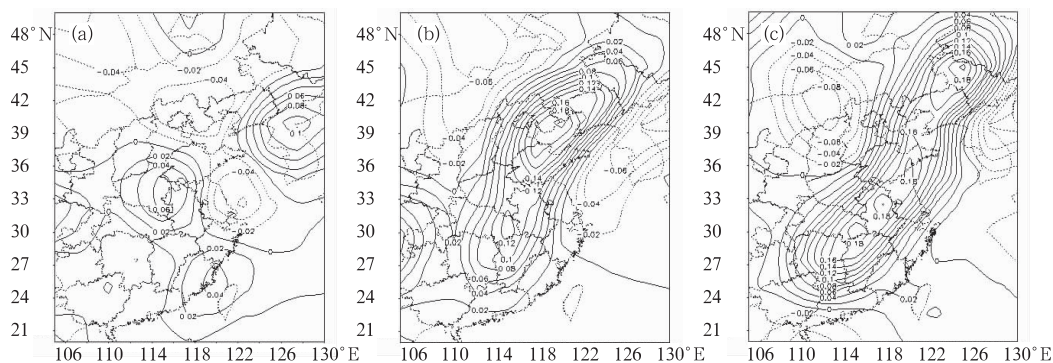


图4 “温妮”影响河北暴雨时700hPa等压面上湿位涡水平分量 $MPV2$ 的时空演变

a. 19日20时; b. 20日20时; c. 21日08时

“麦莎”与“温妮”情况类似,只是 $MPV1$ 负值( $MPV2$ 正值)(图略)的强度和范围比较

小,这也是“麦莎”天气没有“温妮”强烈的原因。到9日08时随着 $MPV1$ 负值( $MPV2$ 正



值)的逐渐减小,河北的强降水停止。

总之,强降水是与  $MPV1$  负值的密集区,并与  $MPV2$  正值的密集区相对应。因此,中低层湿位涡的分布对暴雨落区的预报具有一定的指导意义。

#### 4.2 湿位涡正压项( $MPV1$ )的垂直分布

根据吴国雄<sup>[1]</sup>的湿位涡理论,可以认为负的湿位涡代表不稳定的暖湿气流,正的湿位涡用来示踪冷空气活动。 $MPV1$  比  $MPV2$  大一个量级, $MPV1$  的分布与湿位涡  $MPV$  的分布大致相同,负值中心的位置也比较一致。分析两次台风影响河北时  $MPV$  的垂直分布(图略)得知,这两次暴雨过程 300hPa 以上河北都为  $MPV1$  正值区,表明对流层高层为对流稳定区,说明有冷空气的活动。两次暴雨产生前都有正值  $MPV1$  从对流层高层向暴雨区的“漏斗式”下垂,表明高层冷空气以高值位涡柱的形式向下入侵,与低层负值  $MPV1$  相互作用,弱冷空气通过降低低层稳定性和在低层形成冷垫强迫中层较暖空气抬升,导致对流不稳定能量及潜热能的释放,有利于暴雨产生。

### 5 结 论

(1)“温妮”和“麦莎”都发生在西太平洋副热带高压稳定的西伸加强,副高位置偏北的背景下,副高脊线一直稳定在  $30\sim 35^{\circ}\text{N}$  附近。两个台风的登陆点相似,“麦莎”沿  $119^{\circ}\text{E}$  往北移动;而“温妮”路径为北偏西;后期副高东撤,两个台风的移动路径均为北偏东。

(2)“温妮”变性再加强过程是一个温带

气旋强烈发展的过程,主要与高层湿位涡扰动下传、热带气旋低压环流两者之间的相互作用有关。而“麦莎”变性过程中,没有高层湿位涡扰动下传和热带气旋低压环流之间的相互作用过程,无再加强过程。

(3)强降水与  $MPV1$  负值的密集区,并与  $MPV2$  正值的密集区相对应。因此,中低层湿位涡的分布对河北暴雨落区的预报具有一定的指导意义。

(4)对流层高层高值湿位涡下传,有利于位势不稳定能量的储存和释放,使降水增幅。

### 参考文献

- [1] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓若. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995, 53(4): 387-404.
- [2] 朱佩君,郑水光,陶祖江. 发生在中国大陆的台风变性加强过程分析[J]. 热带气象学报, 2003, 19(2): 157-162.
- [3] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1985, 111: 877-946.
- [4] 余晖,吴国雄. 湿斜压性与热带气旋强度突变[J]. 气象学报,2001, 59(4): 440-449.
- [5] 程正泉,陈联寿,徐祥德,等. 近 10 年中国台风暴雨研究进展[J]. 气象,2005, 31(12):3-9.
- [6] 杨克明,康志明,王东生. 2003 年淮河流域梅汛期首场大暴雨成因分析[J]. 气象,2004, 30(1):16-21.
- [7] 赵宇,杨晓霞,孙兴池. 影响山东的台风暴雨天气的湿位涡诊断分析[J]. 气象,2004, 30(4):15-20.
- [8] 王丛梅,丁治英,张金艳. 西北涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 气象,2005, 31(11):28-33.
- [9] 张迎新,胡欣,张守保. 湿位涡在“96.8”特大暴雨过程中的应用分析[J]. 气象,2004, 32(21):25-28.
- [10] 李英,陈联寿,雷小途. Wenine(1997)和 bilie(2000)变性过程的湿位涡分析[J]. 热带气象学报, 2005,21(2):142-152.