

西北涡暴雨的湿位涡诊断分析

王丛梅^{1,2} 丁治英¹ 张金艳³

(1. 南京信息工程大学大气科学系, 210044; 2. 河北省邢台市气象局; 3. 国家气象中心)

提 要

利用常规的探空和地面观测资料、NCEP 格点资料以及中尺度 MM5 模式, 对 2000 年 7 月 4~5 日发生在华北南部的一次西北涡大暴雨过程的湿位涡场特征进行了诊断和分析。结果表明, 中尺度低涡暴雨的发生发展与湿位涡的时空演变有很好的对应关系, 湿位涡“正负区叠加”的配置是低涡暴雨发展的有利形势。强降雨区发生在对流层低层正压项的正值区南侧零线附近, 斜压项的最大负值区对暴雨的落区和移动有指示作用。

关键词: 低涡暴雨 湿位涡 诊断分析

引 言

大暴雨的形成需要有丰富的水汽供应以及有利的动力、热力不稳定条件, 湿位涡这一物理量不仅表征了大气动力、热力属性, 而且还考虑了水汽的作用, 所以对湿位涡进行诊断, 可以寻求热力和动力及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。近年来, 湿位涡理论被广泛地应用于中尺度低涡暴雨、台风暴雨、爆发性气旋、锋面强降水等研究中^[1~4], 对暴雨形成的物理机制以及暴雨的强度和落区方面得到了一些有意义的结论。吴国雄^[5]提出倾斜涡度发展理论, 指出在湿位涡守恒的制约下, 由于湿等熵面的倾斜, 大气水平风的垂直切变的增加或水平湿斜压的增加引起垂直涡度的增长, 从而导致暴雨的发生。而且等熵面倾斜越大, 气旋性涡度增长越剧烈。寿绍文等^[6]根据湿位涡理论分析了一次江淮梅雨锋暴雨过程中对流层低层的中尺度低涡及地面气旋发展的原因, 指出在有利的等熵面形态下, 具有较高湿位涡值的高层冷空气沿等熵面快速南下的过程中绝对涡度增加导致了气旋性涡度的发展加强。于玉斌^[7]通过对台风暴雨的位涡诊断

发现, 特大暴雨落区位于低层等熵面位涡高值区的东北侧, 与中低层位涡斜压部分最大负值区相对应, 并随着位涡斜压部分负值中心强度的增强而增幅。

本文选取了 2000 年 7 月 4~5 日在华北南部由西北涡东移停滞造成的大暴雨过程, 进行了湿位涡的诊断研究, 来探讨湿位涡场的特征与强降水的关系, 从而对预报西北涡暴雨的落区及移动提供有益的参考。

1 天气过程简介

2000 年 7 月 4~6 日, 受东移的西北涡和暖湿气流的共同影响, 华北南部出现了一次大范围的大暴雨天气过程。此次降雨过程强度之大、持续时间之长为历史同期所罕见。特别是河北省, 在整个降雨过程中, 有 75 个县市降雨量达到 50mm, 其中石家庄、邢台、邯郸有 20 个县市超过 250mm。这是继“96.8”大暴雨后华北地区又一次连续的大暴雨过程。

产生此次暴雨过程的环流背景为稳定的经向环流型, 主要影响系统是东移到河套地区稳定的低涡。由于低涡的东侧和北侧分别有副热带高压和贝加尔湖阻塞高压阻挡, 使

低涡稳定少动。西北太平洋洋面上有3号台风鸿雁活动,为此次暴雨过程提供了充足的水汽条件。

在4日08时~5日08时降雨过程中,对华北南部而言,分别有两个强的降雨时段,即4日下午和5日凌晨。通过对暴雨过程的数值模拟及湿位涡诊断,来探讨暴雨两次加强的原因。

2 模式方案及资料介绍

本次模拟资料是使用美国大气中心的NCEP数值预报产品分析场以及高空、地面实况资料,采用中尺度MM5数值模式,中心取在(38°N、115°E),格点91×91,格距为45km,垂直方向为不等距的17层。模式起报时间为2000年7月04日08时(北京时间,下同),积分时间24小时,时间步长90

秒。

图1a是模式输出的4日08时~5日08时24小时雨量场,与实际雨量场(图1b)相比较,暴雨区的形状、位置与实况大体吻合。雨区呈南北带状分布,大于150mm的降水中心主要在36~38°N、113~115°E范围内,比实况略偏西。而模式输出的5日08时的500hPa高度场与实况场的对比(图略),500hPa低涡的中心与强度与模拟的结果非常接近,都位于37°N、111°E附近,中心值也都为5820gpm。由此可见,运用MM5模式对本次降水过程的模拟是比较成功的,较好地模拟出了影响此次华北暴雨的西北涡系统以及暴雨区的位置、移动和强度的变化趋势,因此可以利用对模拟结果进行湿位涡的计算和诊断分析。

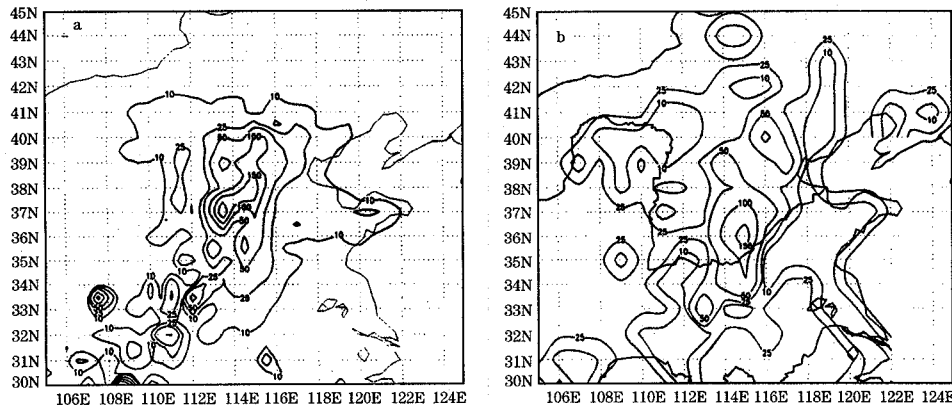


图1 2000年7月5日08时24小时模拟雨量(a)和实况雨量(b)

3 湿位涡诊断分析

等压面上湿位涡的表达式为:

$$MPV = -g \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} - g \left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \right)$$

湿位涡可分为湿正压项 MPV1 和湿斜压项 MPV2。

$$MPV1 = -g \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial \theta_e}{\partial p}$$

$$MPV2 = -g \left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \right)$$

MPV1 表示惯性稳定性($\zeta + f$)和对流稳定性 $-g \frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ 的作用,MPV2 包含了湿斜压性($\nabla_p \theta_e$)和水平风垂直切变的贡献。一般来说,绝对涡度为正值,当 $\partial \theta_e / \partial p < 0$ (对流稳定)时,MPV1 > 0;当 $\partial \theta_e / \partial p > 0$ (对流不稳定)时,MPV1 < 0。MPV2 与 θ_e 面的倾斜有关,其值与水平风的垂直切变和相当位温的水平梯度有关。湿位涡的单位为 PVU

($1\text{PVU} = 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)。利用模拟的基本物理量计算出了等压面上的湿位涡及其正、斜压项,对其与本次低涡暴雨的关系进行分析研究。

3.1 湿正压项与低涡暴雨的发展

由于湿正压项 $MPV1$ 比湿斜压项 $MPV2$ 要大,所以湿位涡 MPV 的大小主要由湿正压项 $MPV1$ 决定。

从沿暴雨中心 38°N $MPV1$ 的纬向剖面图中看到(图2),湿位涡最大值集中在 300hPa 以上,4日11时,从平流层向下有一高位涡区伸展,高位涡舌 ($>0.6\text{PVU}$) 的范围伸展到 550hPa 附近,位于低涡环流的西侧。表明对流层高层为对流稳定区,冷空气以高位位涡柱的形式向下入侵。同时,在对流层低层对应为负值区,负中心在 850hPa ,中心值为 -0.6PVU ,为对流不稳定区。这

种湿位涡正负区叠置的形势有利于低层低涡系统的发展。而在 $114 \sim 115^\circ\text{E}$ 降水区的上空,从大值位涡区东侧分离出一条小值的正位涡舌向下延伸至 800hPa ,正位于边界层中心为 -0.6PVU 的负值区之上,表明从高层下传的正位涡东移后在低层向华北地区切入,使这里层结稳定度减弱,有利于暴雨的发展。到了17时(图2a),小值的正位涡舌到达 850hPa 附近并加强, 700hPa 高度上出现了 0.4PVU 的正中心,表明入侵到低层的弱冷空气有所加强。边界层负值区整体向东推移,前锋到了 115°E 附近,二者在 115°E 附近相遇,配合降雨量图,可以发现此时此处的对流性降雨开始增强。到了23时,向下伸展的高位涡舌位置稳定少动,强度有所减弱,低层的负值区有所加强,此时的降雨则有所减弱。5日05时(图2b),高位涡舌 ($>0.6\text{PVU}$) 回

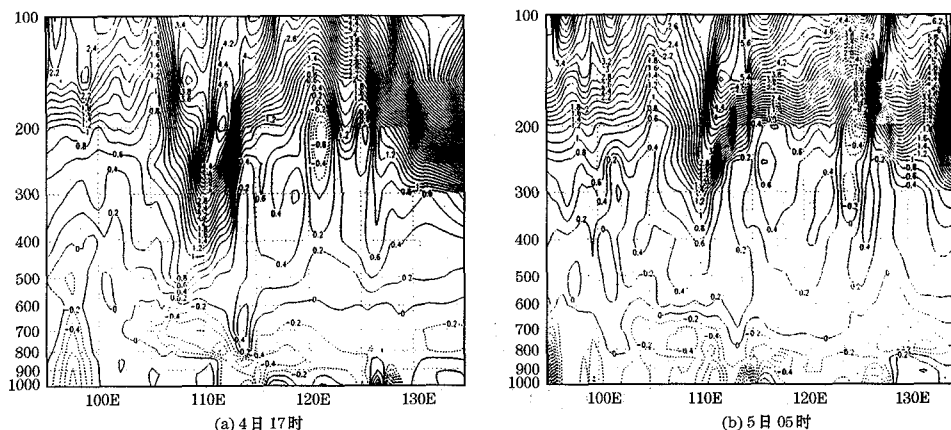


图2 2000年7月4日17时(a)和5日05时(b) $MPV1$ 沿 38°N 纬向垂直剖面图

缩到 400hPa 以上,低层的负中心值则达到最大,并伸展到 700hPa ,表明低涡环流虽然减弱,但 925hPa 上的负中心值达到最大,为 -1.4PVU ,对流不稳定性的加强,使3小时雨量再一次增大。

在 700hPa 湿位涡正压项的分布图上,4日17时(图3),在 38°N 、 114°E 附近有一个 0.5PVU 的正中心,正值区位于低涡环流的东北侧,西侧为负值区。负值区的出现主要

是对流不稳定 ($\partial\theta_e/\partial p > 0$) 造成的,弱冷空气与 $MPV1$ 正值区相对应。在 $MPV1$ 等值线相对密集的零线附近,正是冷暖空气交汇的地带,有利于水汽辐合、垂直涡度剧烈发展。对比3小时的降雨量图发现,强降雨区落在正压位涡正值区的东南和西南部,降雨中心的位置正位于正位涡中心南侧零线附近。其后正中心值逐渐减弱,表明入侵到 700hPa 上的冷空气逐渐减弱,而逐3小时的

降雨中心一直与正值区南侧的零线位置对应得很好。

可见,对流层高层、对流层顶以及平流层的大值位涡下传,使具有高位涡的冷空气叠加在低层扰动所对应的负位涡中心之上,对于位势不稳定能量的储存和释放十分有利,也利于低层气旋式辐合。而在大值位涡东侧分离出的小值的正位涡舌延伸至对流层的中低层,在114~115°E附近上空与边界层的扰动叠加,造成此地区暴雨的增幅。

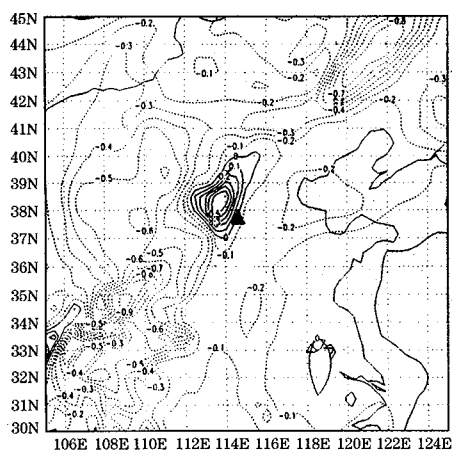


图3 2000年7月4日17时700hPa湿位涡正压项水平分布图(▲为后3小时降雨中心)

3.2 湿斜压项与低涡暴雨的发展

根据湿位涡守恒,当MPV1增大时,

MPV2应该减小。湿位涡斜压项的大小决定于水平风的垂直切变和相当位温的水平梯度,所以负值越大表明大气的斜压性越强。

从沿38°N的斜压位涡纬向剖面图上看到(图4),2000年7月4日11时在对流层高层200hPa有一个大的负值中心(-0.7PVU)。这是由于东南气流伸展到300hPa以上,而200hPa以上为西北气流,此处的水平风垂直切变达到最大,从而使大气的斜压性达到最强。由此中心向下伸展,在400hPa附近有一个-0.2PVU负值中心,在对流层低层850hPa附近也有一个-0.2PVU负值中心,它主要与此处位温的水平梯度有关,西北冷空气与东南暖湿气流的交绥使其湿斜压性增强。到4日17时(图4a),200hPa上负值中心有所减弱,而400hPa和850hPa上的负中心值则显著增加。850hPa上中心为-0.45PVU,是由于冷空气和暖湿气流在850hPa上形成的斜压锋区加强所致。5日05时(图4b),负值中心在925hPa上达到最强,为-0.6PVU,降雨因此再次加强。因此看到,强降水总是发生在对流层低层冷空气前部斜压性最强的区域。

在850hPa上湿位涡斜压项的水平分布图上,4日17时(图5),在38°N、115°E附近

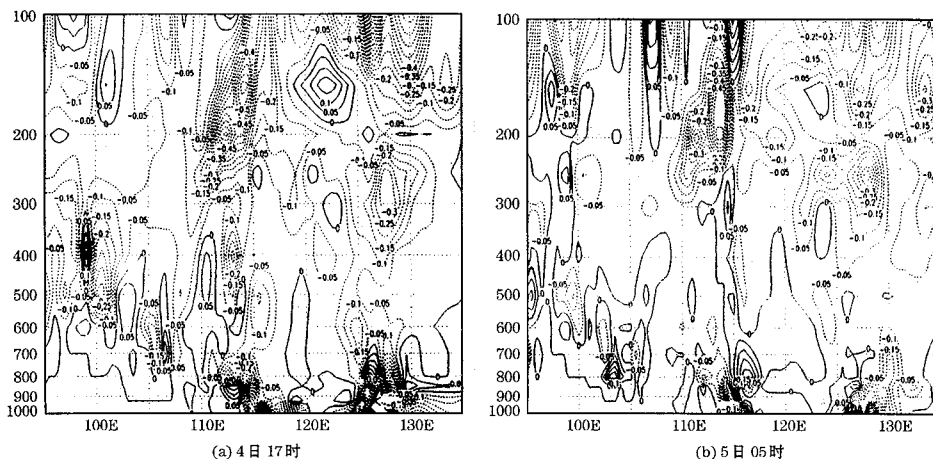


图4 2000年7月4日17时(a)和5日05时(b)沿38°N湿位涡斜压项纬向垂直剖面图

有一个负值中心(-0.5PVU),负值区呈南北带状分布。其后3小时的强降水中心正位于负值中心附近。20时,负值中心稳定少动,强度增强到了-0.6PVU,负值区域向西南方向略有伸展,而后3小时降水中心也向西南有所移动。5日02时,位于北部负值中心位置变化不大,而其东南方向又有负值区域在加强。此时北部的强降水区稳定,而南部对应又有新的强降雨区随负值区北上。

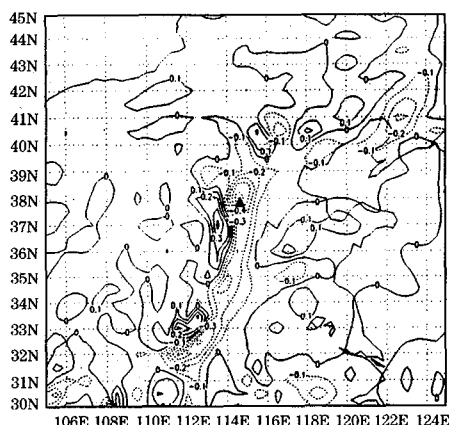


图5 2000年7月4日17时850hPa湿位涡斜压项的水平分布图(▲为后3小时降雨中心)

由以上分析可以看出,对流层高层MPV2负值位涡舌的向下伸展有利于中低层大气斜压性增强,使对流性降水加强。对流层低层斜压位涡项负值区与强降水落区对

应的较好,3小时的降雨中心总是在前一时刻低层MPV2最大负值中心的附近,并随着MPV2负值区域的变化而变化。尽管湿位涡的斜压部分数值比正压部分要小,但是它在低涡暴雨的落区方面是很好的预报参考指标。

3.3 湿位涡与相当位温的垂直分布特征

为进一步揭示冷空气与湿位涡“正负区叠加”对低涡暴雨的作用,沿暴雨中心作湿位涡与相当位温的纬向垂直剖面图(图6)。4日17时(图6a),对流层中高层高位涡区位于低涡环流的西侧,中心位于200hPa以上,正值区呈“漏斗状”向下延伸,对应低层为负值区,这种形势有利于低层气旋性辐合。而在暴雨区114~115°E上空,对流层中低层是一支小值的正位涡舌叠加在低层扰动所对应的负值中心之上,有利于对流发展。而从此

时位温的垂直剖面图上看到,在暴雨区附近为等 θ_e 线的下滑区,在两侧都是陡立的等 θ_e 线, $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$ 对流稳定区对应东西两侧的冷空气,主体都位于600hPa层上。暴雨区上空800hPa以下为对流不稳定区,其西北侧有冷舌入侵。与前一时刻相比,700hPa上弱冷空气的加强,对应湿位涡正值中心的增大,致使暴雨在午后增幅。5日05时(图6b),中高层

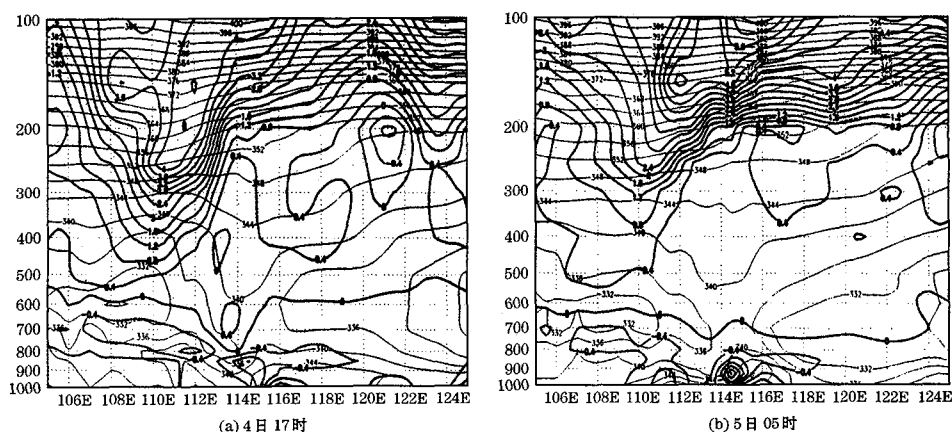


图6 2000年7月4日17时(a)和5日05时(b)沿38°N湿位涡和相当位温纬向垂直剖面图(粗线为等位涡线,细线为等位温线)

大值位涡舌虽然有所减弱,但低层的负值中心却明显加强,说明此时对流不稳定性在增强。位温剖面图上,也可以看到在东侧冷空气前下方等 θ_e 线上凸的区域变得更加狭窄,东西两侧冷空气主体下降到600hPa以下。冷空气通过降低低层稳定性和强迫中层较暖空气抬升,对流不稳定性及潜热能的释放,使上升运动显著增强,从而使降雨在凌晨再一次加强。

4 结论

(1)湿位涡“正负区叠加”的配置是低涡暴雨发展的有利形势,不但靠正位涡还需要负位涡的配合。高层的正的高值位涡的下传有利于气旋性涡度的发展,低层的负位涡区有利于对流的发展。这两者的结合有利于暴雨和低涡的维持。

(2)对流层低层湿位涡正压项的正值区对暴雨区有指示作用,降雨区与700hPa正值区的位置对应得很好,强降雨中心位于正值区南侧的零线附近。

(3)斜压项负值位涡舌的向下伸展有利于中低层斜压性增强,促进降水加强。低层斜压项的负值区对暴雨的落区和移动有指示作用。

参考文献

- 1 王川,寿绍文.一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析.气象,2003,29(7):7~12.
- 2 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.气象,2004,30(4):15~19.
- 3 牛宝山,丁治英,王劲松.一次爆发性气旋的发展与湿位涡关系的研究.南京气象学院学报,2003,26(1):7~16.
- 4 刘还珠,张绍晴.湿位涡与锋面强降水天气的三维结构.应用气象学报,1996,7(3):275~284.
- 5 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁.湿位涡和倾斜涡度发展.气象学报,1995,53(4):378~405.
- 6 寿绍文,李耀辉,范可.暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析.气象学报,2001,59(5):560~567.
- 7 于玉斌,姚秀萍.对华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析.高原气象,2000,19(1):111~120.
- 8 寿绍文,励申申,姚秀萍.中尺度气象学.北京:气象出版社,2003.

Diagnostic Analysis of Moist Potential Vorticity for Northwest Vortex Heavy Rain

Wang Congmei^{1,2} Ding Zhiying¹ Zhang Jinyan³

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, 210044,

2. Xingtai Meteorological Office, Hebei Province; 3. National Meteorological Center)

Abstract

Based on the routine sounding and surface observation data, NCEP grids data, MM5 model output, a diagnosis of the moist potential vorticity of the heavy rain event in the southern of North China on 4—5 July, 2000 is made. The results show that the spatial and temporal variations of moist potential vorticity can give good indication of the development of mesoscale vortex and heavy rain. It is advantage to the development of the vortex rainstorm that plus positive zone just over minus one. The heavy rain is located near the zero line at the south of the positive value zone of the barotropic moist potential vorticity in lower troposphere. The negative value of the baroclinic moist potential vorticity zones has a very good correspondence with the location and movement of the heavy rain.

Key Words: vortex heavy rain moist potential vorticity diagnostic analysis