

湿位涡分析在河北东北部暴雨预报中的应用

王 宏¹, 马凤莲¹, 王万筠², 彭九慧¹

(1. 河北省承德市气象局, 河北 承德 067000; 2. 天津市塘沽区气象局, 天津 塘沽 300457)

摘要:应用湿位涡理论,对 2008 年 6 月 25 日发生在河北省东北部的 1 次局地暴雨天气进行了诊断分析。结果表明,暴雨产生在 线陡立密集区附近, 线陡立密集区附近对流稳定度较小,有利于湿斜压涡度发展, $MPV1$ “高层正值区低层负值区垂直迭加”的配置是暴雨发生、发展的有利形势,暴雨区位于 850 hPa 上 $MPV1$ 零线附近,湿位涡在 850 hPa 上具有 $MPV1 < 0, MPV2 > 0$ 的特征,在夏季可以作为河北省北部预报暴雨的一个有效辅助工具。

关键词:暴雨;湿位涡;诊断分析

中图分类号: P458.1⁺21.1

文献标识码: A

引 言

暴雨的发生发展与低空流场的辐合、较强的垂直上升运动和充沛的水汽输送密切相关。但由于暴雨等灾害性天气过程形成的机理比较复杂,单一的诊断量如涡度、垂直速度、水汽通量等难以全面诊断暴雨发生发展的物理机制。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、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。20 世纪 90 年代初吴国雄等^[1-2]证明绝热无摩擦的饱和湿空气具有湿位涡守恒的特性,并在此基础上研究了湿斜压过程中涡旋垂直涡度的发展。近年来,湿位涡这一综合物理量在暴雨的诊断分析中倍受关注。刘还珠等^[3]应用湿位涡理论,研究了强降水的锋面 2 侧冷暖区的垂直环流,给出了强降水锋面的三维热力流型结构。文献 [4-11] 根据位涡理论,对暴雨和其它天气系统进行诊断研究,得到了有意义的研究结果。马新荣等^[12]应用下滑倾斜涡度发展理论,对“2002 10”暴雪天气过程进行了诊断分析,对进一步研究高原暴雪发生机制及湿位涡理论的应用具有实践价值。

2008 年 6 月 25 日,河北省承德市出现了历史罕见的强对流暴雨天气,2 h 内有 10 个站(区域自动雨量站)降雨量 > 40 mm,4 个站达到暴雨,强降

水伴随着大风、冰雹,瞬时极大风速达 20.1 m/s。据不完全统计,此次过程共造成市区 37 棵大树倒伏,有 10 余棵大树被大风连根拔起。造成 10 条 10 kV 和 1 条 110 kV 供电线路故障停电,致使南园、开发区、下二道河子、高庙、下营房、铁路、双峰寺及上二道河子等区域停电。给承德市的交通、供电、商业、建筑及农业等造成了巨大损失。本文利用湿位涡理论来探讨这次强降水的形成机制,为河北北部暴雨的短期预报提供参考。

1 湿位涡的计算方法

在 p 坐标系中,湿位涡的定义为:

$$MPV = -g(f\bar{k} + \nabla_p \times V) \cdot \nabla_p s_e$$

考虑大气垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多,当忽略 的水平变化时, p 坐标下湿位涡守恒方程为:

$$\begin{aligned} MPV = & -g(\bar{p} + f) \frac{\partial s_e}{\partial p} \\ & + g \left[\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial s_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial s_e}{\partial y} \right] \\ = & const \end{aligned} \quad (1)$$

将其写成分量形式,有:

$$MPV1 = -g(\bar{p} + f) \frac{\partial s_e}{\partial p} \quad (2)$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \quad (3)$$

式中: $MPV1$ 为湿位涡的垂直分量(正压项),其值取决与空气块绝对涡度的垂直分量和相当位温垂直梯度的乘积(ζ_p 是垂直方向涡度, f 是地转涡度, θ_{se} 是假相当位温),因为绝对涡度是正值,当大气为对流不稳定时, $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$, 所以 $MPV1 < 0$; 若大气为对流稳定时, 则 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$, $MPV1 > 0$; $MPV2$ 是湿位涡的水平分量(斜压项),它的数值由风的垂直切变(水平涡度)和 θ_{se} 的水平梯度决定,表征大气的湿斜压性。风的垂直切变的增加或水平湿斜压的增加,均能因湿等熵面的倾斜而引起垂直涡度的增长,有利于强降水发生或加剧。

2 天气概况和环流特征

2008年6月25日17:30~20时(北京时间),河北省承德市的市区、围场、隆化、承德县降大到暴雨,2h内有10个站降雨量 >40 mm,4个站达到暴雨。强降水伴随着大风、冰雹,降水时段主要集中在18~20时,是1次非常典型的短时强对流暴雨过程。

6月25日08时的500hPa高空图(图略)上,40°N以北为经向环流控制,东蒙古冷涡中心位于106°E,48°N,鄂霍次克海维持阻塞高压,东西伯利亚为低压,低压不断分裂小股冷空气东移南下,锋区在40°N以南,在40°N有20m/s的偏西急流,副热带高压稳定在25°N,呈东西带状分布。

850hPa流场图上(图1),辐合中心位于106°E,45°N附近,蒙古国中部到内蒙古东部一线有1条中尺度暖性切变线,这一带表现出较强的辐合。高空(图略)东西向的暖舌位于新疆北部到河套附近,辐合中心沿能量脊自西向东移动,随着辐合中心南压到河北省西北部,暖性切变线位于河北省北部承德地区上空。阻塞高压的稳定少动,造成低涡系统难以东移。同时由于副热带高压稳定,低涡引导冷空气直接影响40°N附近地区。暴雨过程前期,大气增温增湿明显,25日14时的水汽压和露点温度达到了6月份的最高值。东移南下的冷空气与低涡系统的结合及阻塞高压底部的偏东风的水汽输送,为暴雨的发生提供了有利的大尺度背景场,低涡及人字形切变为暴雨的发生提供了有利的辐合上升条件,有利于中尺度系统的发生发展。

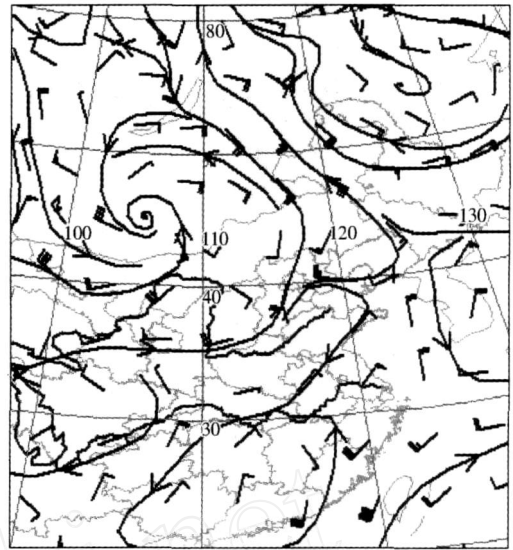


图 1 6月25日08时850hPa流场

Fig 1 Wind field on 850 hPa at 08:00 on 25 June 2008

3 计算结果分析

3.1 假相当位温分析

假相当位温 θ_{se} 是能够综合反映温度和水汽条件(湿度)的物理量, θ_{se} 高值区代表高温高湿区。由公式(1)可知,在湿位涡守恒的制约下,由于 θ_{se} 面的倾斜,大气水平风垂直切变或湿斜压性的增加,能够导致垂直涡度的显著发展。湿等熵面倾斜越大,气旋性涡度增长越激烈,越容易造成暴雨天气,这种涡度增长称为倾斜性涡度发展。

从沿41°N所做的纬向剖面图上看到,14时(图2a)116~118°E有高能舌从地面向上伸展到700hPa高度,此处 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$, 为对流不稳定区域;而在118°E上空,850~700hPa高度上,有 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$ 的对流稳定区域,对应冷空气在这个高度从东侧侵入高湿高能的气团,从而触发对流不稳定能量的释放。从沿118°E所做的 θ_{se} 经向垂直剖面图上可看出,08时(图略)37~40°N由低层到800hPa有一高值舌向南伸展,中心值为336K,极易产生中尺度对流云团及对流性强降水。14时(图2b)高能中心逐渐向高层扩展,800~700hPa的相当位温线几乎与等压面垂直,说明该层的对流稳定度变得很小 ($\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$)。 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$ 的对流不稳定区域位于40°N上空800

~700 hPa上,而对流稳定的区域位于其北侧,因此弱冷空气主要从东北路径在对流层低层与西南暖湿

气流交汇,使大气的湿斜压性增强,从而导致垂直涡度发展。

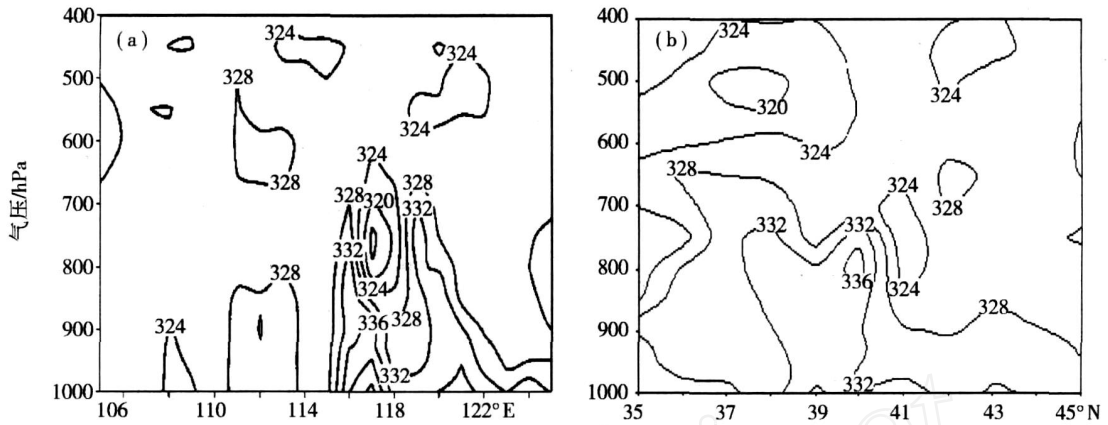


图 2 2008年 6月 25日 14时 se (单位: K)沿 41°N (a)和 118°E (b)的垂直剖面图
Fig 2 The cross sections of se along 41°N (a) and 118°E (b) at 14:00 on June 2008

3.2 湿位涡的分布

3.2.1 湿位涡正压项的分布

从沿暴雨中心 41°N MPV1的纬向剖面图中看到(图 3),25日 08时 900 hPa以下 116~120°E范围内 MPV1为正值区,以上到 750 hPa是负值区, < -1.2 PVU的中心位于 850 hPa,为对流不稳定区。14时位于上述区域的正值区已经不明显,负值中心强度增强。从 500 hPa向下有一“漏斗”形高湿位涡区伸展,高位涡(0.9 PVU)的范围伸展到 800 hPa附近,表明对流层高层为对流

稳定区,冷空气向下入侵。对流层高层正的大值区对应着对流层低层负值中心,这将有利于低层的不稳定能量大大释放,对流不稳定迅速发展。这种 MPV1“正负值区垂直迭加”的配置是暴雨发生发展的有利形势,高层正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产生。20时对流层高层高值带减弱,850 hPa以下正值区范围扩大,对流层低层以下转为对流稳定,降水逐渐减弱。

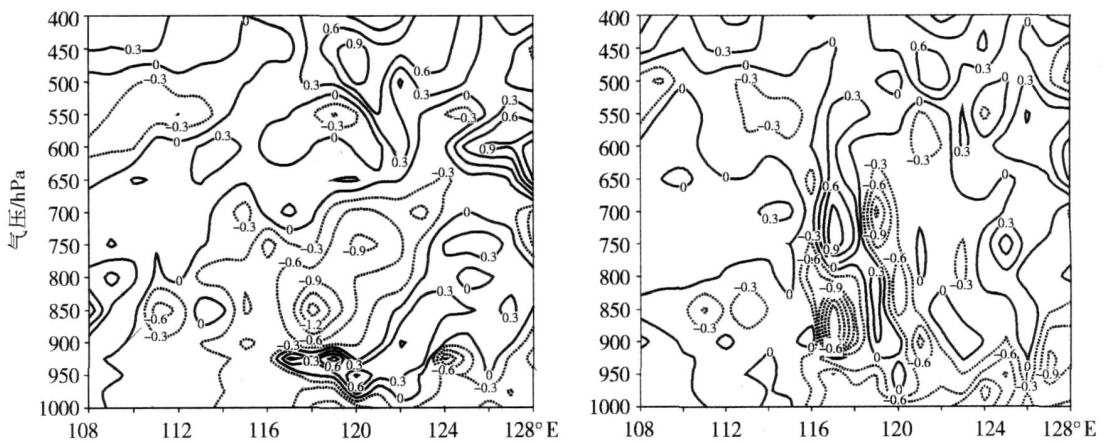


图 3 2008年 6月 25日 MPV1沿 41°N纬向垂直剖面图
(a) 08时; (b) 14时 (单位: PVU)
Fig 3 Longitude - height cross sections of MPV1 along 41°N at 08:00 (a) and 14:00 (b) on 25 June 2008

这次暴雨过程发生在对流层中低层 MPV1负值区内。暴雨产生前 850 hPa和 700 hPa承德地区为

负值,表明大气处于对流不稳定状态,一旦有冷空气触发潜在不稳定能量释放,将产生对流性强降水天气。暴雨发生前 25 日 14 时 850 hPa 湿位涡正压项分布图(图 4a)上,承德上空就已被 $MPV1$ 负值区控制,承德西部的 $MPV1$ 值在 $-0.5 \sim -1.5$ PVU 之间,东部为正的 $MPV1$ 控制,为对流稳定的干冷空气。正值 $MPV1$ 与负值 $MPV1$ 在承德附近对峙。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。与实况降雨量相比发现,强降雨区落在正压位涡正值与负值的对峙区,降雨中心的位置正位于 $MPV1$ 零线附近。20 时正中心值逐渐减弱,表明入侵到 850 hPa 上的冷空气逐渐减弱,暴雨过程逐渐结束。

3.2.2 等压面上湿位涡斜压项分布

从 6 月 25 日 08 时 850 hPa 湿位涡斜压项 ($MPV2$) 分布图可看出,暴雨开始前承德为 0 值区,14 时(图 4b)正值范围扩大,强度增强,承德中东部转为正值 $MPV2$ 控制,中心值为 0.1 PVU,表明此处有对流云团产生。文献 [1] 提出低层较大的正值 $MPV2$ 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,故暴雨前期 $MPV2$ 正值范围的扩大与增强反映了低空暖湿气流的加强过程。20 时东部正值中心消失,预示着对流云团在逐渐减弱消亡。此时承德上空已转为西北风,意味着低空暖湿气流减弱,随着对流不稳定能量的释放及正值 $MPV2$ 的减弱消失,该区的暴雨过程基本结束。

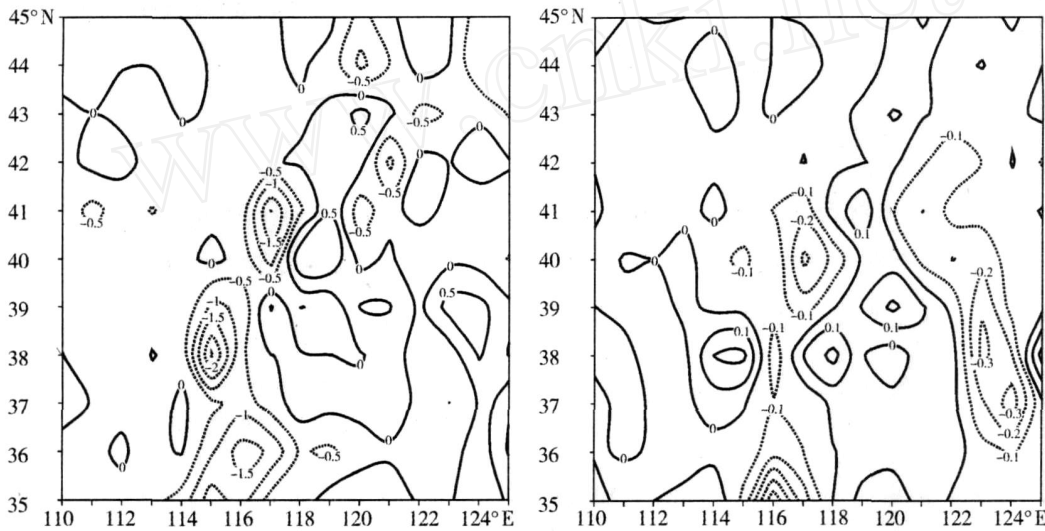


图 4 2008 年 6 月 25 日 14 时 850 hPa $MPV1$ 和 $MPV2$ 分布图

(a) $MPV1$; (b) $MPV2$ (单位: PVU)

Fig 4 Distributions of $MPV1$ (a) and $MPV2$ (b) on 850 hPa level at 14: 00 25 June 2008 (units: PVU)

由于 $MPV1$ 的绝对值明显比 $MPV2$ 大, $MPV1$ 分布与湿位涡 MPV 的分布大致相同, 负值中心位置也比较一致。 $MPV2$ 的数值虽然常常比 $MPV1$ 约小 1 个量级, 但 $MPV2$ 表达式中风随高度的变化和相当位温的梯度表明, 数值越大说明大气的斜压性越强, 大气的斜压性可转化成正压位涡扰动, 有利于气旋性涡度发展, 有利于暴雨的产生。同时 $MPV2$ 绝对值的增大, 可以反映大气的斜压不稳定的增强, 因为 $MPV2$ 的表达式中含有等相当位温面的坡度项 $\frac{\partial_{se}}{\partial y}$, 而斜压不稳定决定于等位温面的坡度。因此, 湿位涡的正压项与斜压项综合反映了暴雨区对流不稳定和斜压不稳定状况。这一判据将大气中的对流

不稳定和斜压不稳定很好地联系在一起, 为暴雨天气的诊断和实际预报提供了一种思路。

5 结 论

(1) 东蒙古冷涡及人字形切变的环流形势, 有利于中尺度系统的发生发展。对流不稳定能量和潜热释放, 造成暴雨天气。

(2) 线陡立密集区附近对流稳定度较小, 易导致湿斜压涡度发展和暴雨的产生。

(3) 位涡理论能很好地解释这次暴雨的形成机制, 对流层高层 500 hPa 湿位涡正压项 ($MPV1$) 正的大值区对应着对流层低层 750 hPa 负值中心, 故 $MPV1$ “高层正值区和低层负值区垂直迭加” 的配置

是暴雨发生发展的有利形势。

(4) 暴雨区 850 hPa 上具有 $MPV1 < 0$, 同时 $MPV2 > 0$ 的特征, 这一判据将大气中的对流不稳定和斜压不稳定很好地联系在一起。

(5) 850 hPa 湿位涡正压项的正、负值对峙区对暴雨落区有指示作用。降雨区与对峙区相对应, 暴雨中心位于 $MPV1$ 零线附近。

参考文献:

- [1] 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 - 404.
- [2] 吴国雄, 蔡雅萍. 低空急流和倾斜涡度发展 [A]. 台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究 [C]. 北京: 气象出版社, 1996. 159 - 167.
- [3] 刘还珠, 张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构 [J]. 应用气象学报, 1996, 7(3): 275 - 284.
- [4] 高守亭, 雷霆, 周玉淑, 等. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 662 - 670.
- [5] 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 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(1): 8 - 16.
- [6] 吴海英, 寿绍文. 位涡扰动与气旋的发展 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(4): 510 - 517.
- [7] 袁佳双, 寿绍文. 1998 年华南大暴雨冷空气活动的位涡场分析 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 92 - 98.
- [8] 段旭, 李英. 滇中暴雨的湿位涡诊断分析 [J]. 高原气象, 2000, 19(2): 253 - 259.
- [9] 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 [J]. 气象学报, 2001, 59(5): 560 - 568.
- [10] 黄海波. 位涡分析在新疆暴雨预报中的应用 [J]. 干旱气象, 2005, 23(3): 22 - 25.
- [11] 程鹏, 赵庆云, 李江萍, 等. 西北地区东部一次连阴雨过程等熵面位涡分析 [J]. 干旱气象, 2007, 25(1): 58 - 62.
- [12] 马新荣, 任余龙, 丁治英. 青藏高原东北侧一次暴雪过程的湿位涡分析 [J]. 干旱气象, 2008, 26(1): 57 - 63.

Application of Moist Potential Vorticity Analysis in Forecasting Heavy Rain in Northeast of Hebei Province

WANG Hong¹, MA Fenglian¹, WANG Wanjun²

(1. Chengde Meteorological Bureau of Hebei Province, Chengde 067000, China;
2. Tanggu Meteorological Bureau of Tianjin, Tanggu 300457, China)

Abstract: By using the theory of moist potential vorticity (MPV), a rainstorm occurred in northeast of Hebei Province on 25 June 2008 was analyzed. The results show that the heavy rain occurred in the neighborhood of the stiff and dense section of Pseudo-equivalent potential temperature lines, where the convective stability was so small that it was beneficial to the development of moist baroclinic vorticity. The overlapping of the positive and negative MPV1 areas at the lower and upper level was advantageous to the development and appearance of rainstorm, and the rainstorm was located near the zero line of MPV1. $MPV1 < 0$ and $MPV2 > 0$ at the level of 850 hPa can be a useful condition for rainstorm occurring in the north of Hebei Province.

Key words: rainstorm; moist potential vorticity; diagnostic analysis