

文章编号: 1000-2022(2004) 06-0836-08

山东春季一次罕见暴雨天气的湿位涡分析

赵宇¹, 张兴强², 杨晓霞¹

(1. 山东省气象中心, 山东 济南 250031; 2. 泰安市气象局, 山东 泰安 271000)

摘要: 应用湿位涡理论, 对2003年4月发生在山东境内的一次罕见暴雨过程进行了诊断分析。结果表明: 这次暴雨产生在925 hPa以下 θ_e 线陡立密集区附近, θ_e 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; 湿位涡在这次暴雨过程前期700 hPa上 $\xi_{MPV1} < 0$, $\xi_{MPV2} > 0$ 的演变, 综合反映了暴雨区对流不稳定及斜压不稳定的增强; 对流层高层高值湿位涡下传有利于位势不稳定能量的释放, 使降水增幅, 也是低涡东移发展为气旋的重要机制。

关键词: 湿位涡; 暴雨; 倾斜涡度发展

中图分类号: P458 **文献标识码:** A

研究表明, 暴雨的产生需要一定的动力学和热力学条件, 人们用单一的诊断量(如水汽通量、涡度、散度、垂直速度等)对暴雨进行诊断, 很难取得满意的结果。湿位涡是综合反映大气动力、热力和水汽作用的物理量, 能更全面、有效地描述暴雨的发生发展。20世纪90年代初, 吴国雄等^[1-2]证得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。我国地处东亚季风区, 夏季暴雨等强对流天气较为频繁, 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两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[4-9]根据湿位涡理论, 对暴雨和气旋等天气进行诊断研究, 得到了有意义的研究结果。对湿位涡的研究与分析, 有助于增进对气旋和暴雨的发生发展及演变机制的认识。

2003年4月17日白天到夜间, 山东出现了一次罕见的暴雨天气。暴雨来得非常突然, 暴雨产生前山东上空的对流云发展得很高、很厚, 雷达观测到云顶高达12~15 km, 过程具有明显的强对流特征, 通常在山东盛夏发生的雷雨大风天气却在4月份突发。本文利用湿位涡理论来探讨这次强降水的形成机制, 揭示冷空气在暴雨和气旋形成中的重要作用, 为山东春季暴雨的短期预报提供参考。

1 湿位涡的计算方法和资料

在 p 坐标系中, 湿位涡的定义为

收稿日期: 2003-11-19; 改回日期: 2004-04-05

基金项目: 山东省气象中心自立课题资助

作者简介: 赵宇(1968-), 女, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 硕士。

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

(1)

假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多, 引进静力近似, 湿位涡守恒的表达式为

$$\xi_{MPV} = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \frac{\partial \theta}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial \theta}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} = \text{常数}.$$

(2)

文献[1]中定义

$$\xi_{MPV1} = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p},$$

(3)

$$\xi_{MPV2} = g \frac{\partial \theta}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial \theta}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y}.$$

(4)

式中, ξ_p 为 p 坐标系中的垂直涡度分量, f 为科氏参数, θ 为相当位温, ∇_p 是 xyp 空间的三维梯度算子, $-g \frac{\partial \theta}{\partial p}$ 表示对流稳定度. ξ_{MPV1} 是湿位涡的垂直分量, 是正压项, 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. 因为绝对涡度是正值, 当大气是对流不稳定时, $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$, ξ_{MPV1} 是负值; 当大气是对流稳定的, 则有 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$, ξ_{MPV1} 是正值. ξ_{MPV2} 是湿位涡的水平分量, 是斜压项, 它的数值由风的垂直切变(水平涡度)和相当位温的水平梯度决定.

本文采用国家气象中心下发的 T213 全球网格点数据同化资料, 为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 8 层(1 000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300 hPa) 温、压、湿和风数据, 按公式(2)~(4) 分别计算 ξ_{MPV} 、 ξ_{MPV1} 和 ξ_{MPV2} , 然后分别讨论对流层低层湿位涡及湿位涡的空间分布.

2 降水概况和环流特征

2003 年 4 月 17 日白天到夜间, 鲁西南、鲁西北和鲁中山区普降大到暴雨, 降水中心主要稳定在山东的中西部地区, 向东推进缓慢. 17 日 06 时到 18 日 06 时, 全省共有 40 个县(市) 降暴雨, 7 个县(市) 降大暴雨, 泰山的降雨量最大, 为 145 mm(图 1).

这次暴雨的产生与特定的环流形势及海上副高异常偏强是密切相关的. 暴雨产生前的 16 日 20 时 500 hPa 高空图上, 乌拉尔山为东北-西南向的高压脊, 脊前中西伯利亚为低压, 低压不断分裂小股冷空气东移南下, 锋区在 40°N 以北, 30°N 以南有南支槽东移, 副热带高压明显西伸北抬, 与华北南部的西风带高压同位相叠加. 17 日 08 时, 副热带高压的西伸点为 123°E , 588 线北缘达 36°N , 南支槽与河套西部的中支槽结合, 位于 108°E 附近, 槽前形成了自南海经长江直到东北的宽广的西南气流区. 对流层中低层 850 hPa 和 700 hPa 从 16 日 08 时就建立起低空急流, 17 日低空

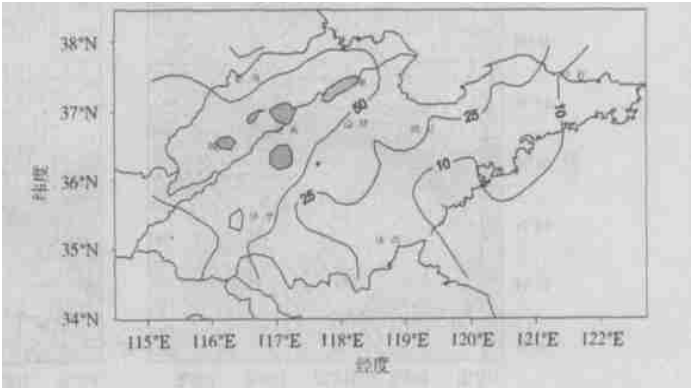


图1 2003 年 4 月 17 日 06 时—18 日 06 时降水量分布
(单位: mm; 阴影区为大于 100 mm 的降水区)
Fig. 1 The rainfall distribution from 0600 BST
17th April to 0600 BST 18th April 2003
(The shaded areas denote rainfall exceeding 100 mm)

的西南气流区. 对流层中低层 850 hPa 和 700 hPa 从 16 日 08 时就建立起低空急流, 17 日低空

急流进一步加强,并向东移动,山东西部地区处于低空急流的左前方,暖湿空气和不稳定能量源源不断地向山东输送。对流层中低层的河套地区有一低涡发展,17日08时850 hPa上低涡中心位于(108 E, 37 N)附近,东西向的暖切变线沿37 N伸向山东中西部地区,这一带表现出较强的辐合,地面上则表现为一条冷锋的缓慢南压。伴随着850 hPa上低涡沿切变线东移并发展,冷锋进入倒槽,18日02时在江苏的北部生成气旋。暴雨过程前期,华北地区为明显的暖脊控制,大气增温非常明显,为暴雨的发生储存了大量的不稳定能量。东移南下的冷空气与南支槽结合及副高的西伸北抬,为暴雨的发生发展提供了有利的大尺度背景场,低涡及其东伸切变线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,使得山东的中西部地区出现了十分有利的暴雨形势。

3 计算结果分析

3.1 相当位温分析

从850 hPa相当位温和风场分布(图2)可以看到,17日08时(图2a),华北北部地区有一条近东西向的等 θ_e 密集带,其北部为 θ_e 低值区,与低温、低湿区相对应,其南部的山东地区为从南向北伸的 θ_e 高值带控制,与高温高湿不稳定区相对应,这个等 θ_e 线密集带正是冷暖气团交界的锋区所在。从叠加的风场上可以看到,低空急流向北输送的暖湿空气,与南下的冷空气正好在锋区一带对峙。除半岛地区外,山东大部地区处于大于330 K的高能区内,只要有冷空气入侵,极易释放对流不稳定能量造成强降水。17日20时(图2b), θ_e 密集区进一步加强,并明显南压,在河套东部的低涡环流明显加强,西南暖湿气流也明显加强,等 θ_e 密集带在低涡环流的西北部形成了明显的向南弯曲,表明冷空气从低涡的西北部侵入,这非常有利于低涡的发展东移。山东大部地区为大于336 K的高能舌控制。随着 θ_e 密集带的南压,冷空气先行侵入山东西部的对流不稳定区,触发不稳定能量释放,产生对流性强降水。实况强降水产生在暖空气一侧,位于高能轴及其左侧的能量锋区附近。

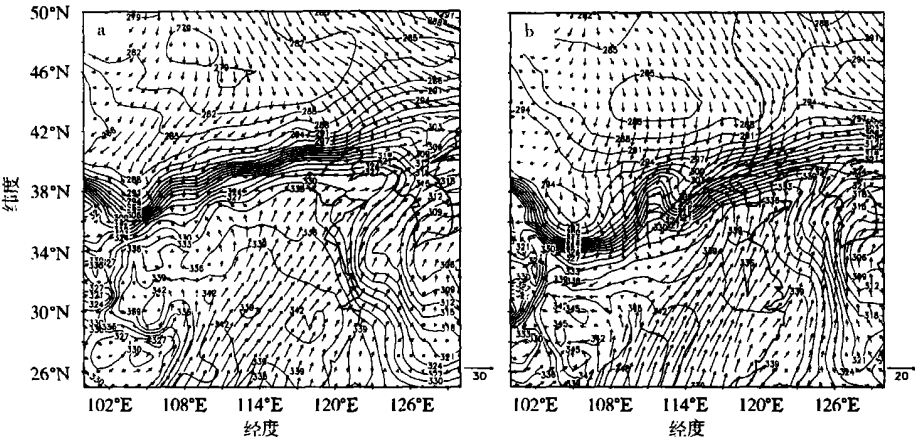


图2 2003年4月17日08时(a)和20时(b)850 hPa上相当位温和风场分布
Fig. 2 Distributions of potential equivalent temperature and wind field at 850 hPa level
at 0800 BST (a) and 2000 BST (b) 17th April 2003

由公式(2)可知,在湿位涡守恒的制约下,由于 θ 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。

从暴雨区沿117 E 所作的 θ_e 经向垂直剖面上看到, 暴雨产生前的17日08时(图3a) 暴雨区南侧的暖湿空气与北侧的干冷空气在暴雨区的北部形成了等 θ_e 线密集区, 此密集区随高度向北倾斜, 等 θ_e 线比较陡立, 暴雨区850 hPa 以下为对流稳定区, 850~500 hPa 之间为对流不稳定区。17日20时(图3b), 等 θ_e 线密集区南压到36~38 N 之间, 850~500 hPa 之间仍为对流不稳定区, 925 hPa 以下的相当位温线变得十分陡立, 几乎与水平面垂直, 说明对流层低层的对流稳定度变得很小 $\left[\frac{\partial \theta_e}{\partial p} \approx 0\right]$ 。湿位涡的正压项是湿位涡的主要部分, 当等熵面与等压面近似平行时, 受到湿位涡守恒的制约, 会导致对流层低层气旋性涡度的显著增长, 有利于低层涡旋的发展, 而925~850 hPa 之间为对流稳定区, 对流层低层浅薄对流稳定区的存在有利于低层大气的增暖, 850 hPa 以上的对流不稳定区有利于湿空气在不稳定层上升绝热冷却, 有利于上升运动发展, 从而有利于暴雨的产生。18日08时(图5d) θ_e 密集区南压到32~35 N 之间, 低层 θ_e 线仍十分陡立, 涡旋强烈发展, 最后演变为气旋。可见, 倾斜涡度发展是暴雨和气旋形成的重要机制。

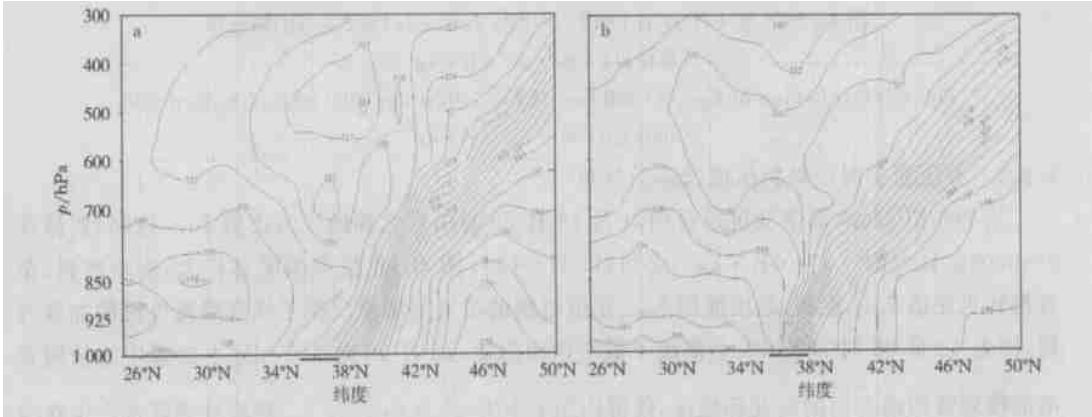


图3 2003年4月17日08时(a)和20时(b)沿117 E 经向 θ_e 垂直剖面(单位: K; 横线为暴雨区跨度)

Fig. 3 Longitudinal cross-sections of θ_e at 0800 BST (a) and 2000 BST (b) 17th April 2003 along 117 E (units: K; the horizontal bar indicates the span of rainstorm area)

3. 2 等压面上湿位涡分布

3. 2. 1 等压面上湿位涡正压项(ξ_{MPV1}) 分布

这次暴雨过程发生在对流层中低层 ξ_{MPV1} 负值区内, 暴雨产生前中低层850 hPa 和700 hPa 山东地区为负值 ξ_{MPV1} 控制, 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16日20时700 hPa 上(图略), 山东上空就已为 ξ_{MPV1} 负值区控制, 山东中西部地区的 ξ_{MPV1} 在 $-0.4 \times 10^{-6} \sim -0.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 39 N 以北为 ξ_{MPV1} 正值区控制, 为对流稳定的干冷空气。17日08时(图4a), ξ_{MPV1} 正值区明显加强, 呈近东西带状分布, 在(106 E, 39 N) 的中心值达 $3.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与700 hPa 上的锋区及西风槽相对应, 这是由于冷空气南压导致稳定度增强造成的; 长江下游一带有负的 ξ_{MPV1} 向山东伸展, 山东中西部地区为 $-0.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 ξ_{MPV1} 控制, 这反映了暖湿气流的加强引起不稳定度加大, 导致负值 ξ_{MPV1} 增强。正值 ξ_{MPV1} 与负值 ξ_{MPV1} 在河北到山东北部一带对峙。17日20时, 随锋区的缓慢南压, ξ_{MPV1} 正值区也缓慢南压, 由于降水的产生, 不稳定能量释放, 负值 ξ_{MPV1} 强度略减弱, 暴雨出现在高值 ξ_{MPV1} 前方的对流不稳定区内。到18日08时, ξ_{MPV1} 负值区东移到半岛地区, 山东中西部暴雨结束。

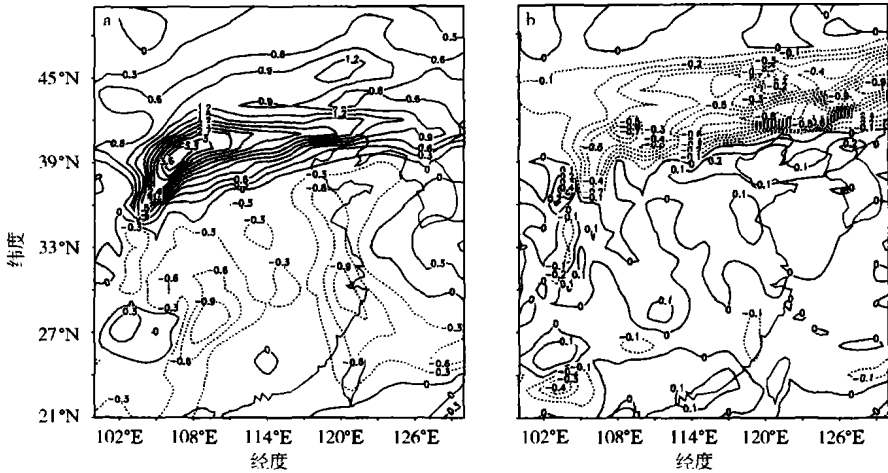


图4 2003年4月17日08时700 hPa上 ξ_{MPV1} (a)和 ξ_{MPV2} (b)的分布

(单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 4 Distributions of ξ_{MPV1} (a) and ξ_{MPV2} (b) at 700 hPa at 0800 BST 17th April 2003

(units: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)

3. 2. 2 等压面上湿位涡斜压项(ξ_{MPV2})分布

从700 hPa ξ_{MPV2} 的演变可以看到,4月16日20时山东北部地区为正值 ξ_{MPV2} 控制,数值在 $0 \sim 0.05 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,17日08时(图4b)正值范围明显扩大,强度增强,全省都转为正值 ξ_{MPV2} 控制,暴雨前期 ξ_{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,因为16日08时700 hPa上形成了低空西南急流,16日20时700 hPa上的暖中心从河套南部移到鲁西南与河南的北部地区,使得山东上空有 $\frac{\partial u}{\partial p} > 0, \frac{\partial \theta}{\partial y} < 0$ 。对流性强降水产生在冷锋前的暖区中,由公式 $\xi_{MPV2} = g \left(\frac{\partial}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$ 可知, $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ 项较小, $-\frac{\partial}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y}$ 起主要作用,故700 hPa上 $\xi_{MPV2} > 0$ 。可以看到,正是暖湿气流的加强,正值 ξ_{MPV2} 范围扩大、强度增强。因为随暖气流的加强,会导致低层 $\left| \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|$ 和 $\left| \frac{\partial u}{\partial p} \right|$ 的增大及垂直涡度发展,从而使得 ξ_{MPV2} 增加,并有利于降水加剧。故文献[1]提出低层较大的正值 ξ_{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。17日20时山东转为较弱的负值 ξ_{MPV2} 控制,主要是低层850 hPa上低涡东移,其前方形成东南气流, $\frac{\partial u}{\partial p} < 0$,虽然仍有 $\frac{\partial \theta}{\partial y} < 0$,但 $\xi_{MPV2} < 0$ 。18日08时,山东为 ξ_{MPV2} 的负值区所控制,此时山东已转为西北风,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 ξ_{MPV2} 的减弱消失,山东的暴雨过程基本结束。

ξ_{MPV1} 分布与湿位涡 ξ_{MPV} 的分布大致相同,负值中心位置也比较一致。由前面的分析可以看出,负 ξ_{MPV1} 的绝对值在暴雨过程中增大。根据湿位涡的守恒性,当负 ξ_{MPV1} 的绝对值增大, ξ_{MPV2} 的正值应加强,这与以上的分析结果是比较一致的。 ξ_{MPV2} 的数值虽说常常比 ξ_{MPV1} 约小一个量级,但 ξ_{MPV2} 表达式中风随高度的变化和相当位温的梯度表明,正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, ξ_{MPV2} 绝对值的增大,可以反映大气的斜压不稳定的增强,因为 ξ_{MPV2} 的表达式中含有等相当位温面的坡度项 $\frac{\partial \theta}{\partial y}$,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。

3.3 湿位涡正压项的垂直分布

为了揭示干冷空气的侵入在暴雨和气旋形成中的重要作用,这里讨论湿位涡正压项 ξ_{MPV1} 的垂直分布情况。由于锋区的分布为近东西向,过低涡中心或暴雨中心所做的经向剖面基本类似,均可以反映冷空气的活动情况,可以看到对流层高层有高值 ξ_{MPV1} 从北方伸向暴雨区及低涡的北部。现以过暴雨中心沿117°E ξ_{MPV1} 的经向垂直剖面为例进行讨论,从图中可以看到,16日20时(图5a),42°N以北有高值 ξ_{MPV1} 从对流层高层向对流层低层倾斜伸展, $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的湿位涡等值线下伸至600 hPa,此下伸区的低层700 hPa以下为 ξ_{MPV1} 负值区,为对流不稳定区,这里的 θ 线十分陡立密集,非常有利于低层涡旋发展。17日08时(图5b),高层高值 ξ_{MPV1} 进一步下伸,使得高低层上下贯通为一个倾斜的 ξ_{MPV1} 高值区,高层的 ξ_{MPV1} 高值已侵入暴雨区的低层,这股侵入的冷空气通过降低稳定性和强迫较暖空气抬升,导致对流不稳定能量及潜热能的释放,非常有利于降水的增幅。17日20时(图5c),低层的高值 ξ_{MPV1} 快速发展,38°N上空的850 hPa附近形成了 $3.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的中心,且完全与其北部的高值 ξ_{MPV1} 区打通,这为高纬的冷空气大规模侵入低涡和暴雨区创造了条件。而此时暴雨区500~700 hPa上空还存在弱的 ξ_{MPV1} 为负值的对流不稳定区,暴雨区的低层的涡旋发展,非常有利于上升运动发展,有利于不稳定能量的释放,产生对流性强降水。18日08时(图5d),低层的高值 ξ_{MPV1} 更进一步发展,850 hPa上形成了 $4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的中心,位于36°N附近,而此时低涡中心位于(118°E, 37°N)附近,此高值 ξ_{MPV1} 处于低涡的西北部,这与低涡的发展是相对应的,表明气旋已经处于成熟阶段。在整个过程中低层的高值 ξ_{MPV1} 都处于 θ 线陡立密集区附近,有利于低层涡旋发展。

从以上分析可以看出,冷空气的南下对气旋的形成具有重要作用。Hoskins等^[10]指出,一个高层正的位涡扰动移动到对流层低层或地面的斜压区上空时,位涡扰动会向下伸展,同时也会在斜压区激发出气旋性环流,导致正的位涡扰动出现。因为从高层下伸的高位涡来自层结稳定度比对流层大好几倍的平流层,平流层空气侵入对流层中下层,对流稳定度减小,引起气团在水平方向辐合,会导致气团正涡度加强,形成大的局地位涡扰动。位涡扰动的出现将引起环流的变化,高位涡引起气旋性环流,与低涡环流叠加,进而产生冷暖平流,形成斜压锋区,最后发展为气旋。

因此,这次暴雨过程的物理机制可以理解为:暴雨区的近地面层为对流稳定区,850 hPa以上为对流不稳定区,高位涡空气从对流层高层向对流层低层伸展,低层的暖湿空气在低空急流的作用下向山东输送,形成湿斜压锋区,冷暖空气在山东对峙,引起低层的锋区加强及垂直涡度发展,冷空气增强了对暖湿气流的强迫抬升作用,触发不稳定能量的释放,产生山东西部的大范围暴雨。

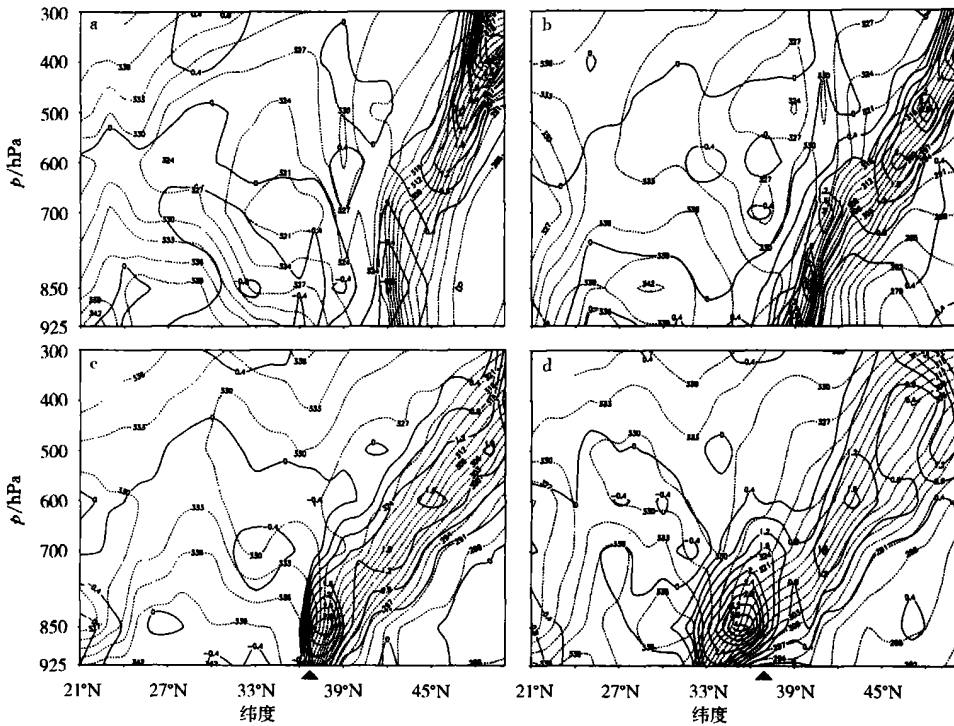


图5 2003 年4 月16 日20 时—18 日08 时沿117°E 的湿正压项 ξ_{MPV1} (实线)和相当位温(虚线)的垂直剖面(▲为暴雨中心位置)
a. 16 日20 时; b. 17 日08 时; c. 17 日20 时; d. 18 日08 时

Fig. 5 Longitudinal cross-sections of ξ_{MPV1} (solid lines) and potential equivalent temperature(dashed lines) from 2000 BST 16th April to 0800 BST 18th April 2003
(▲ denotes the center of the rainstorm)
a. 2000 BST 16th; b. 0800 BST 17th; c. 2000 BST 17th; d. 0800 BST 18th

4 结 论

- (1) 冷空气侵入由高温、高湿的暖湿气团控制的山东地区, 引起不稳定能量的迅猛释放, 而山东的中西部地区处于低涡切变的控制下, 有利于中尺度上升运动的发展, 从而造成暴雨天气。
- (2) 位涡理论能很好地解释这次春季暴雨的形成机制, 倾斜涡度发展和湿位涡扰动是暴雨及气旋形成的重要因素。在 p 坐标中, θ_e 陡峭和密集区附近, 对流稳定度较小, 易导致湿斜压涡度发展。
- (3) 湿位涡在这次暴雨过程前期 700 hPa 上 $\xi_{MPV1} < 0$ 及 $\xi_{MPV2} > 0$ 的演变, 综合反映了暴雨区对流不稳定和斜压不稳定的增强。
- (4) 对流层高层高值湿位涡向对流层低层的下传使得高层冷空气侵入暴雨区, 导致暴雨区的稳定度下降, 强迫较暖空气抬升, 有利于降水增幅。同时高值湿位涡的进一步下传, 形成大的局地位涡扰动。位涡扰动与低涡环流相叠加, 促使低涡发展为气旋。

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[C]. 台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究. 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] Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Q J R Meteorol Soc, 1985, 111(470): 877-946.

Analysis of Moist Potential Vorticity for an Exceptional Spring Rainstorm in Shandong Province

ZHAO Yu¹, ZHANG Xing-qiang², YANG Xiao-xia¹

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 2. Taian Meteorological Bureau, Taian 271000, China)

Abstract: By using the theory of moist potential vorticity (MPV, ξ_{MPV}), a rainstorm happened in Shandong Province in April 2003 is analyzed. Results show that the rainstorm occurred in the neighbourhood of the stiff and dense section of the moist isentropes, where the convective stability was so small that it is beneficial to the development of moist baroclinic vorticity. The evolution of $\xi_{MPV1} < 0$ and $\xi_{MPV2} > 0$ at 700 hPa level at the early stage of the rainstorm reflected convective instability and the intensification of baroclinic instability in the rainstorm area. The downward spread of high ξ_{MPV} from the upper troposphere availed the release and storage of potential instability energy, resulting in the strengthening of precipitation. It is also an important mechanism through which the low vortex moved eastward and developed into a cyclone.

Key words: moist potential vorticity; rainstorm; slantwise vorticity development