

171-178

一次江淮暴雨的MPV及对称不稳定研究^{①*}李耀辉^② 寿绍文
(南京气象学院, 南京 210044)

p458.121.1

摘要 根据湿位涡(MPV)理论分析了1991年7月5~6日的暴雨过程中700hPa高度上的湿位涡垂直部分MPV1和水平部分MPV2。结果显示,MPV1和MPV2的分布特征同对流层低层造成暴雨的天气系统——中尺度气旋的发展演变有很好的对应关系;MPV1>0,MPV2<0且|MPV1|≥|MPV2|的环境大气有利于对称不稳定出现;计算表明,这次过程的对流层中低层确有对称不稳定区域存在,它对暴雨及其系统的发展起了重要作用。

关键词 湿位涡;对称不稳定。
分类号 P458

暴雨,降水过程分析

引言

早在1942年, Ertel提出了等熵面上的位涡(IPV)概念,并指出,在绝热无摩擦过程中,等熵位涡是一个守恒量。后来, Hoskins^[1-2]在对位涡理论进行了深入的研究和比较全面的总结后认为,如果不计非绝热加热和摩擦效应,等压面位涡(PV)以及有降水发生的湿过程中的湿位涡(MPV)同样具备守恒性;当MPV为负值时,有可能出现条件性对称不稳定。还指出,对流层上部或平流层的位涡扰动可以下传而影响到对流层下部及地面的气旋发展;位涡还具有反演性等。利用位涡性质,气象学家对大气现象、特别是中尺度天气现象进行了大量的研究,得出了很多有用的结论。盛华^[3]对“81·7”大暴雨进行了位涡分析,表明位涡中心与暴雨区的移动基本一致,较大的相当位涡局地变化是中小尺度系统的能源,是发生局地强对流天气的重要指标。QinXu⁴研究了准地转位涡(GPV)与带状降水的关系,并用模式说明了出现单条雨带和多条雨带的不同情况以及它们形成、维持的机制。陆尔、丁一汇等^[5]的研究指出,1991年5~7月间从北方或东北方向南下的高位涡冷空气与暖空气相互作用,维持梅雨锋,形成了江淮地区的持续性暴雨。吴国雄^[6]通过对等熵面上位涡的理论研究,提出了关于空气块沿等熵面运动与其垂直涡度发展关系的“倾斜涡度发展”观点。

1991年5~7月,我国江淮地区出现了严重的大范围暴雨和洪涝,期间7月5~6日的暴雨过程是一次高层冷空气与低层中尺度的低涡和地面气旋相互作用而产生的较为典型的梅雨锋暴雨,中尺度系统在其中起了关键作用。本文将在前人的工作基础上,试图运用位涡原理,对

① 收稿日期:1999-01-12;修改稿日期:1999-05-02。

② 现在地址:兰州干旱气象研究所,兰州 730020。

* 国家自然科学基金资助。

这次过程中的中尺度低涡发生发展的原因做一些初步的分析。

1 资料和天气概况

1.1 资料

我们在分析和计算中所使用的资料为取自国家气象中心中期数值预报全球资料同化系统逐日两个时次(08和20北京时)的00时效全球格点资料。该资料将探空资料和卫星、雷达等非常规的探测资料进行了同化处理,其中包含了常规观测资料不能分辨的实际中尺度信息,在国内已有许多研究机构和科研人员利用这一资料进行了中尺度分析和研究。它的分辨率是 2.5×2.5 经纬度网格,包括等压面高度、温度、纬向风U、经向风V(100,200,300,500,700,850,1000hPa七层)、相对湿度(300,500,700,850,1000hPa五层)和海平面气压。我们取 $12.5^{\circ}\text{N} \sim 62.5^{\circ}\text{N}$, $87.5^{\circ}\text{E} \sim 142.5^{\circ}\text{E}$ 作为分析范围。进行诊断计算时,在垂直方向用拉格朗日内插成十四层(100,150,200,250,300,400,500,600,700,800,850,900,950,1000hPa),水平方向将资料内插到60km。

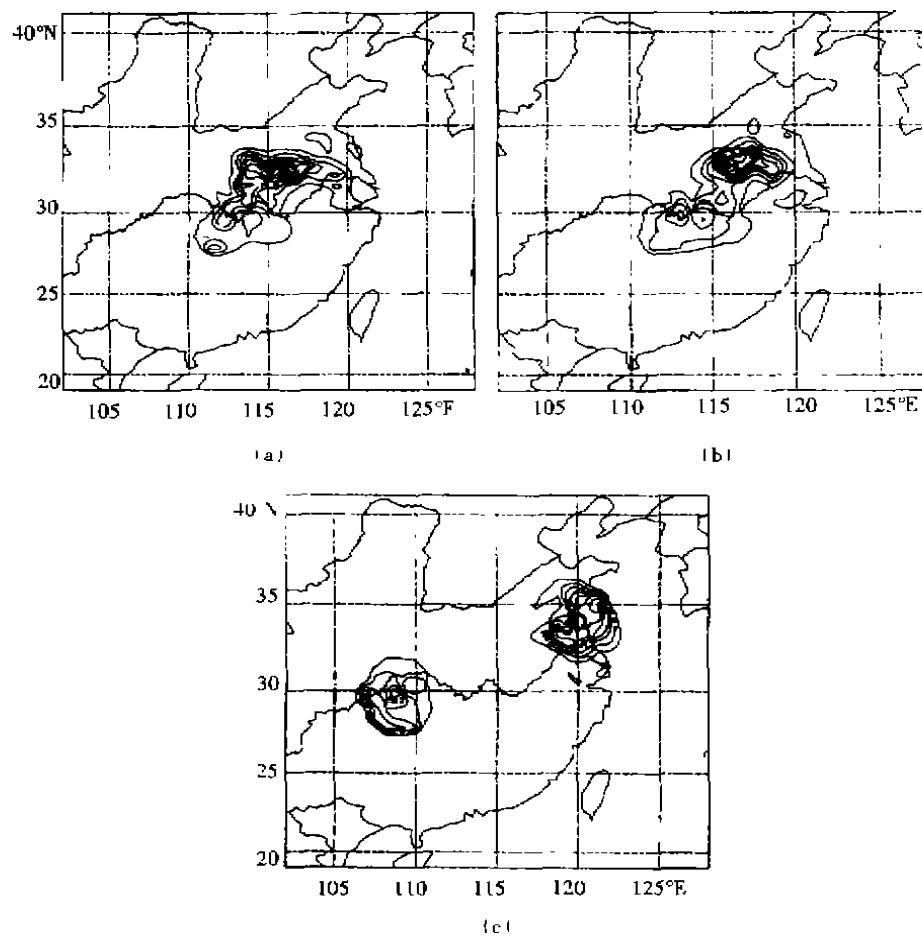


图1 6日08时(a)、11时(b)和20时(c)三个时次的3小时的降水实况。

Fig. 1 The distribution of 3-h rainfall at (a), 0800 BST (Beijing Standard Time), (b) 1100 BST and (c) 2000 BST, July 6, 1991.

1.2 暴雨时空分布

这次降水过程开始于 7 月 5 日 20 时,到 7 月 6 日 21 时基本结束,影响范围广及鄂、豫、皖、苏等四省,最大日降水量超过了 200mm。降水区中很多地区出现了暴雨或大暴雨。从每隔三小时的降水量分布图(图 1 为其中 6 日 08 时、11 时和 20 时三个时次的 3 小时降水分布)可以看到,5 日 20 时,在湖北北部出现了孤立的降水区,然后向东扩展,降水中心东移。6 日 08 时降水增幅达最大,11 时出现最大三小时降水 65mm。雨团主要沿引导气流在江淮之间向东偏北方向移动,6 日 20 时,在苏北沿海形成一个中心值 40mm/3 小时的主要暴雨区。所以,从 24 小时的总降水量来看,长江中下游地区就表现为一条近乎东西向的雨带。

1.3 低空环流概况

低空 850hPa 上,5 日 08 时在四川地有低涡生成,并东移加强,到了 6 日 08 时其中心位于郑州与汉口之间,气旋性环流变得十分清楚,东南部的西南风明显加强;之后低涡开始减弱,7 日 08 时已经移到朝鲜半岛上空,我国华东地区被其后的高压所控制(见图 2)。相应地,地面图上 7 月 5 日 14 时在四川盆地东部有低压发展起来并逐渐东移,6 日 08 时~14 时,该系统移到了安徽省境内,强度明显增大,气旋性环流十分清楚,最低气压值达到 947hPa,东西向切变线就位于江淮之间,形成了一个典型的江淮气旋。我们发现,在 700hPa 和 850hPa 的低涡加深、地面气旋加强的同时或之后不久,暴雨强度也就相应出现明显的增大(6 日 08 时、6 日 11 时)。所以说,对流层低层中尺度低涡的生成并东移加强,促使了地面冷锋上的扰动加剧,有气旋波发展,形成了地面气旋,随之便造成大暴雨发生。这种中尺度的低层低涡和地面气旋可以说是造成这次暴雨过程的直接影响系统。

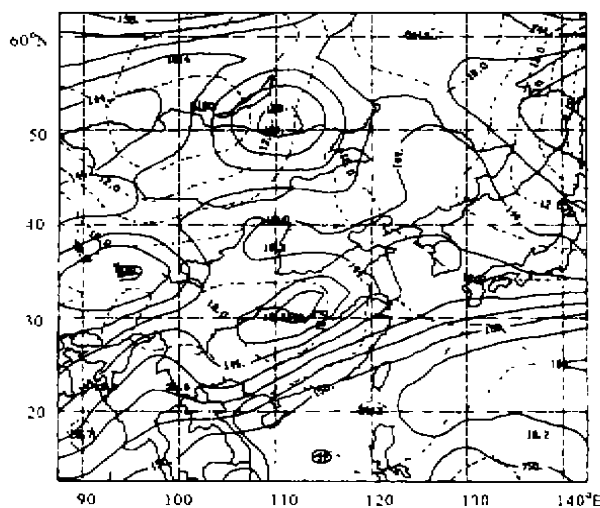


图 2 6 日 08 时 850hPa 的环流形势(实线为等高线,虚线为等温线)

Fig. 2 850hPa circulation pattern at 0800 BST, July 6, 1991 where solid(dashed)line denotes isohypse(isotherm)

2 湿位涡(MPV)分析

2.1 MPV 理论

在绝热、无摩擦的大气中,如果引入静力近似,那么 p -坐标系中的湿位涡就可以表示为:

$$MPV = -g(f \cdot \vec{k} + \nabla_p \times \vec{V}) \cdot \nabla_p \theta_e = \text{常数} \quad (1)$$

式中 $\nabla_p = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial p} \vec{k}$ 为三维梯度算子。

假设垂直速度的水平变化相对较小,可以忽略,则上式变为:

$$MPV \approx -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \quad (2)$$

其中 $\zeta = (\partial v / \partial x - \partial u / \partial y)_p$, 为 p -坐标中的垂直涡度。

将(2)式右端第一项定义为湿位涡的垂直部分,第二项定义为水平部分,则有:

$$\begin{cases} MPV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \\ MPV2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (3)$$

由此可知,MPV1 为湿正压项,表示惯性稳定性($f + \zeta$)和对流稳定性($-g \frac{\partial \theta_e}{\partial p}$)的作用;MPV2 为湿斜压项,它包含了湿斜压性($\nabla_p \theta_e$)和水平风垂直切变的贡献。

2.2 MPV 特征与环境大气状况

现在来分析 7 月 5 日 08 时~7 日 08 时等压面上的 MPV1 和 MPV2(图 3,4)。5 日 08 时的 MPV1 图上(图 3),我国境内(130°E 以西)的约 110°E 往西的区域为 MPV1 的正值区,表示了冷空气的活动;而且 110°E 以东则为表示暖湿空气和反气旋环流的负值区域。110°E~110°E 之间的高纬度地区(50°N 以北)以及我国西部 30°N~40°N 之间各有一个 MPV1 正值中心,后者的比焓度大于前者。5 日 20 时,我国西部的正值中心明显加强,中心数值由 0.24PVU 增至 0.36PVU,并且向东扩展,随着其强度的增大,过程降水也自此开始;到了 6 日 08 时,在湖北西部(110°E,30°N)出现了一个 0.17PVU 的闭合中心,略偏东则正好是同一时刻 700hPa 等压面以下的低涡中心所在地;6 日 20 时以后,该闭合中心减弱,向东北方向移动到我国渤海西侧;同时,MPV1 正值区截的西边界表现出西退的趋势。7 日 08 时(图略)我国西部又有一个正值中心出现。

MPV2 图中(图 4)可以看出,5 日 08 时我国长江中下游地区为沿 30°N 的负 MPV2 东西向带状区域,无明显的闭合中心;到 5 日 20 时,负 MPV2 有所增强,湖北省境内出现了闭合中心,此时,降水也在与负 MPV2 中心对应的地区发生。5 日 20 时到 6 日 08 时是该中心发展最为强烈的阶段,强度和范围明显增大,位置迅速东移。此后,该负中心逐渐减弱,于 6 日 20 时东移至黄海,降水也移到苏北沿海;这时四川、湖北交界的长江中游又有一较弱的负值中心形成,促使这一地区出现了新的强降水中心(图 1c)。

所以,在 7 月 5 日 20 时~7 月 6 日 21 时的江淮暴雨过程中,700hPa 等压湿位涡具有以下几个特点:

(1)MPV1 正值区和 MPV2 负值区的发展演变同对流层低层的天气系统(即中尺度低涡)和暴雨中心的演变基本一致,而负 MPV2 中心对应得更好一些。从 5 日 20 时到 6 日 08 时,MPV1 和 MPV2 均有较大的发展变化,6 日 08 时便出现大的暴雨增幅,11 时出现最大的三小时降水,说明湿位涡对暴雨的发展有促进作用。

(2)MPV1 和 MPV2 系统东移当中,正的 MPV1 随时间由强变弱,而负的 MPV2 则由弱变强,但总的来说,特别是 6 日 08 时之前 $|MPV1| \geq |MPV2|$ 。这说明大气中惯性稳定性($f +$

$\zeta) > 0$ 和对流(静力)稳定性($N_m > 0$)起了主要作用;

(3) 对流(静力)稳定性对 MPV1 的贡献是主要的, MPV1 的减弱主要是由于对流稳定性的减小所致。风的垂直切变(低空急流一般位于 700hPa, 故 $\frac{\partial u}{\partial p} < 0$)斜压性为 MPV2 提供了负值, 而 MPV2 的加强主要归因于斜压性的增强;

(4) MPV2 的负值区域始终表现为约 30°N 以北的东西带状分布, 沿 30°N 附近等值线密集, 表明这里的斜压性尤其是经向的斜压性($\frac{\partial \theta}{\partial y} > 0$)比较强。

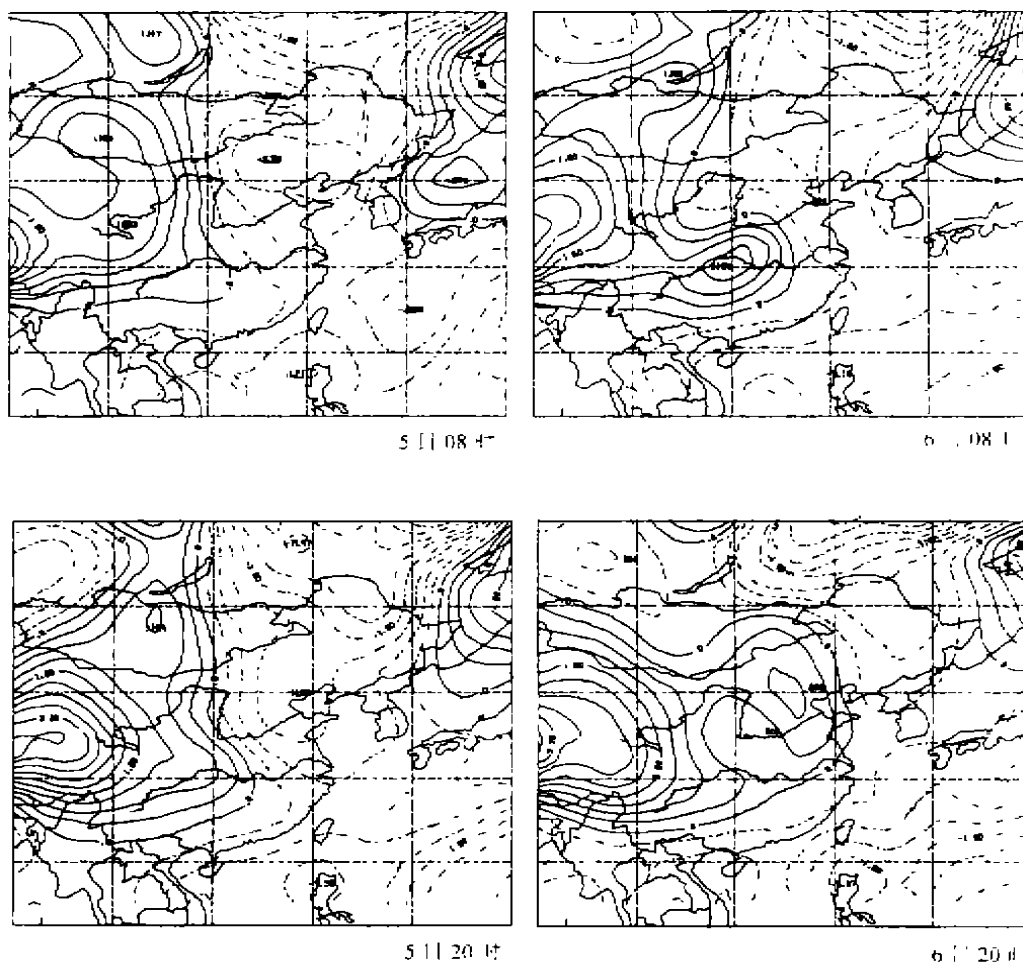


图3 700hPa 的湿位涡垂直部分 MPV1($\times 0.1$ PVU)

(7月5日08时至7月6日20时)

Fig. 3 700hPa MPV1 distribution in the period from 0800 BST, July 5 to 2000 BST, July 6, 1991

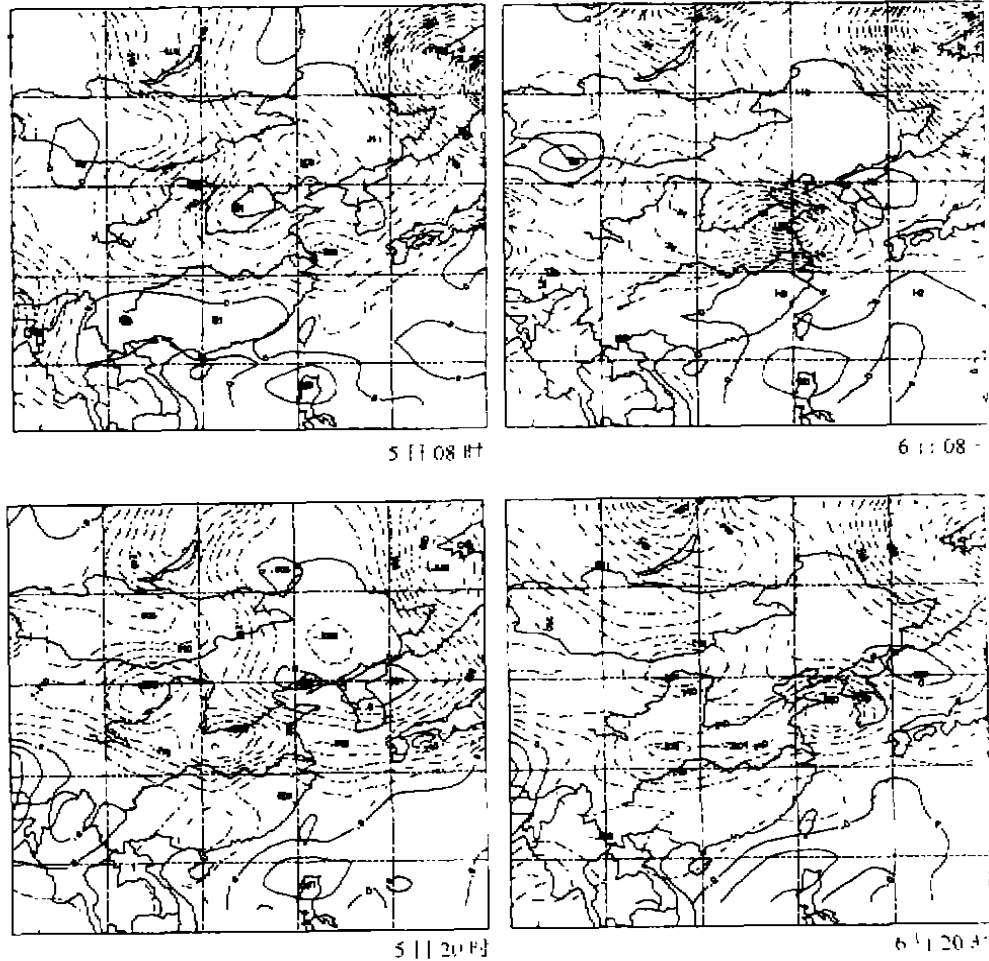


图4 700hPa的湿位涡水平部分 MPV2(7月5日08时至7月6日20时)

Fig. 4 As in Fig. 3 except for MPV2

3 对称不稳定与MPV

对称不稳定是一种浮力—惯性不稳定。定性地讲,当等M(绝对动量)面的倾斜度小于等位温面的倾斜度时,空气块倾斜上升时就会产生对称不稳定^[7]。由以上等压MPV分析可知,在这次暴雨过程中,暴雨区上空对流层中、低层环境大气基本上处于惯性稳定($f+\zeta$)>0、对流(静力)稳定 $N_m > 0$ 或者弱的不稳定状态,并有比较强的斜压性。那么,在这样的环境中是否有对称不稳定在起作用?对于湿空气来讲,对称不稳定的判据为:

$$Ri < f/\zeta_a \quad (4)$$

式中 Ri 为理查逊数, ζ_a 为绝对涡度。Hoskins^[2](1974)指出,MPV<0也是判断带状降水条件对称不稳定的一个必要条件。这里我们计算了绝对地转动量 Mg ($Mg = u_g - f_r$),并沿暴雨中心绘制了等 Mg 面和 θ_e 面的经向剖面(图5),发现6日08时800~500hPa之间有等 Mg 面斜率小于等 θ_e 面斜率的对称不稳定存在,但其它时次则表现得比较弱;对称不稳定区域的层结

是弱稳定或者中性的,而且对应着 MPV 剖面中的一个负值中心(见图 6)。这说明本次暴雨过程中对称不稳定确实存在,不稳定出现后三小时(6 日 11 时)便产生最强降水,因此对称不稳定对暴雨的发展起着积极作用,可能是造成强暴雨的一种重要机制。

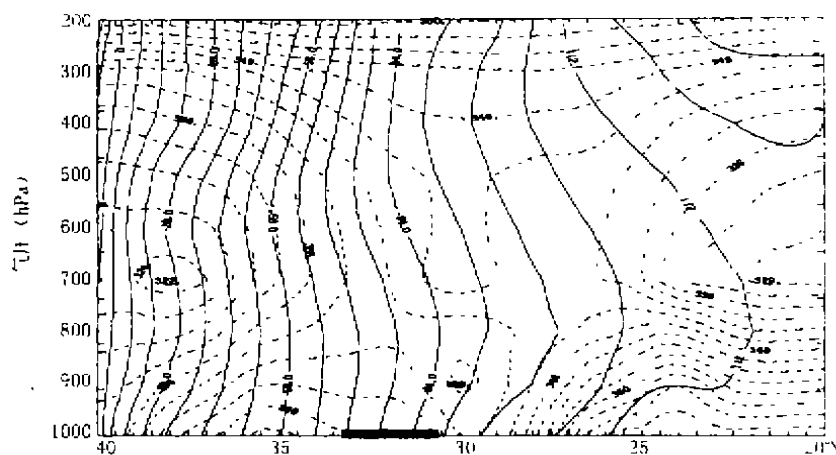


图 5 6 日 08 时等 M_g 面和等 θ_e 面沿 116.2°E 的经向剖面
细实线为等 M_g 线 细虚线为等 θ_e 线 加粗短实线表示雨区所在纬度

Fig. 5 116.2°E meridional section of constant M_g (thin solid line) and constant θ_e (thin dashed line) for 0800 BST, July 6
(The thick bar below denotes the latitudes of the hyetal region.)

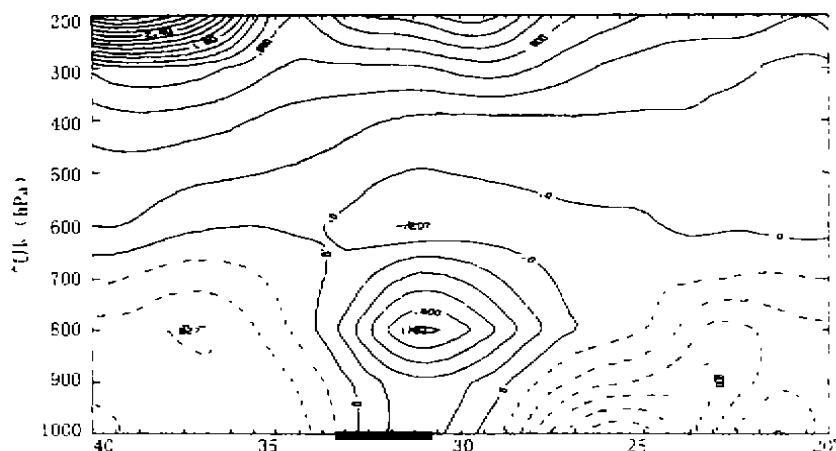


图 6 对应于图 5 的 MPV 经向剖面
虚线为负值,加粗短实线表示雨区所在纬度

Fig. 6 As in Fig. 5 except for MPV

4 讨 论

由定义可知,湿位涡(MPV)本身包含有动力和热力性质,用它可以更准确地描述环境大气的状态。在本文所研究的这次暴雨过程中, $MPV_1 > 0$, $MPV_2 < 0$, 而且 $|MPV_1|$ 较大, |

MPV2|较小,说明环境大气处于层结弱稳定和惯性稳定的状况,并且有利于对称不稳定出现,有利于暴雨和中尺度系统的发生发展。

参 考 文 献

- 1 Hoskins, B. J., On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 1985, 111: 877~946.
- 2 Hoskins, B. J., The role of potential vorticity in symmetric stability and instability. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 1974, 100: 480~482.
- 3 盛华, "81·7"大暴雨位涡与相当位涡的诊断分析, *高原气象*, 1984, 3(3): 10~18.
- 4 Qin Xu, Frontal circulation in the presence of small viscous moist symmetric stability and weak forcing. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 1989, 115: 1325~1353.
- 5 陆尔、丁一汇、李月洪, 1991年江淮特大暴雨的位涡分析与冷空气活动, *应用气象学报*, 1994, 3(8): 266~274.
- 6 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.
- 7 寿绍文, 中尺度天气动力学, 北京, 气象出版社, 1993, 119~134.

A STUDY ON MPV AND SYMMETRIC INSTABILITY DURING A TORRENTIAL RAIN PROCESS

Li Yaohui Shou Shaowen

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract Based on the moist potential vorticity (MPV) theory, this paper analysed the vertical and horizontal components of MPV, MPV1 and MPV2, on 700hPa for the torrential rain process occurred during 5-6 July, 1991 in the Changjiang-Huaihe Basin. The results showed that the distributions of MPV1 and MPV2 were consistent with the development of low-level mesoscale cyclonic circulation that was caused the torrential rain. It is favourable to develop symmetric instability when $MPV1 > 0$, $MPV2 < 0$ and $|MPV1| \geq |MPV2|$. The symmetric instability intensified the torrential rain.

Key words Moist potential vorticity (MPV); Symmetric instability; Torrential rain.