

暴雨过程中湿位涡的中尺度时空特征

安洁 张立凤

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

摘 要 本文用 21 层的 η 坐标细网格模式对 1998 年 7 月 19 日~22 日发生在武汉地区的一次持续性特大暴雨过程进行数值模拟, 并利用较高时空分辨的模式输出结果对湿位涡进行了诊断, 从而揭示暴雨过程中湿位涡的中尺度演变特征和空间结构, 得到暴雨的发展与负湿位涡有很好的联系。

关键词 暴雨 湿位涡 中尺度 时空特征 η 坐标模式

分类号 P458 **文献标识码** A

引 言

位涡是描述大气热力和动力性质的重要特征量, Rossby(1940)^[1] 最早提出位涡的概念, 并指出在绝热无摩擦条件下位涡具有严格的守恒性; 王永生、杨大升(1984)^[2] 研究暴雨与低层流场的问题时, 认为位涡的发展和暴雨的发展是一致的; 盛华(1987)^[3] 指出位涡场比涡度场更能表现暴雨的移动和强度的变化; 陆尔、丁一汇^[4] 应用位涡分析讨论了 91 年江淮特大暴雨冷空气活动的特征, 提出南下的冷空气在江淮一带被来自低纬西南暖气流和东南暖气流所切断, 形成高位涡冷空气中心, 它与两支暖气流相互作用, 维持梅雨锋, 从而形成持续暴雨; 吴国雄^[5] 从完整的原始方程出发, 在导出精确形式湿位涡方程的基础上, 证明了绝热无摩擦饱和湿空气具有位涡守恒特性。并发展了 Z 坐标及 P 坐标中倾斜涡度发展理论, 认为低空急流的加强或暖湿气流的加强均可导致斜压湿位涡增加及发展, 有利于降水加剧。

梅雨暴雨的发生发展与低空流场的辐合、垂直运动的发展有关, 并常伴有气旋性垂直涡度的急剧增大^[6]。因此, 研究气旋性涡度的发展机制是研究暴雨发生发展的一个重要内容。位涡诊断可以成为梅雨暴雨诊断和预报的一个实用工具。但以往的研究多是利用常规观测资料, 而暴雨是一种时空尺度都非常小的天气现象, 用常规观测资料诊断来揭示湿位涡的演变与暴雨发生发展的关系, 具有很大的局限性, 往往不能表现出湿位涡演变的中尺度特征。为了弥补资料分辨率的不足, 本文用 η 坐标模式的时空高分辨率的输出场代替实际观测资料, 诊断暴雨区的湿位涡, 从而揭示中尺度湿位涡演变的性质。

收稿日期: 2002-11-10; 修改稿日期: 2003-04-10

基金项目: 本文得到国家重点基础研究发展规划项目 G1998040907 资助

第一作者简介: 安洁(1979-), 女(汉), 山东济南, 解放军理工大学气象学院 2001 级硕士生, 主要从事中尺度数值研究

1 η 坐标系下湿位涡的定义及 η 模式中湿位涡的计算

为了保证湿位涡的计算精度,湿位涡的计算在 η 坐标系下进行。故必须推导出 η 坐标系下湿位涡的表达式,在此之前首先对 η 坐标的定义及所用的 η 坐标模式作一简单介绍。

1.1 η 模式的简介

众所周知,暴雨与地形特别是中尺度地形的关系是非常密切的, σ 坐标系下的数值预报模式在地形非常陡峭时,由于 σ 等值面的过于倾斜,往往会造成很大的计算误差,而中尺度地形往往复杂陡峭, σ 坐标模式对它并不能对它有很好的描述。曾庆存(1982)和 Mesinger(1982)提出的 η 坐标把地形表示为阶梯状,在模式内部形成刚体边界,这既保留了 σ 坐标具有的简单下边界条件,又避免了在陡峭地形情况下 σ 等值面过于倾斜的缺点,很好的解决了该问题。

η 坐标系又被称为阶梯地形坐标系^[1],其定义为

$$\eta = \sigma\eta_s, \quad \eta_s = \frac{P_{rt}(z_s) - P_t}{P_{rt}(0) - P_t}, \quad \sigma = \frac{P - P_t}{P_s - P_t} \quad (1)$$

其中, $P_{rt}(z_s)$ 为模式地形高度 z_s 上的参考大气气压, $P_{rt}(0)$ 为海平面高度上的参考大气气压,其它均为数值预报中常用符号。

与 σ 坐标相比,由于等 η 面和等压面近于一致, η 坐标在水平气压梯度力的计算以及水平平流项、水平扩散项的计算上,具有明显的优越性。由于 η 坐标在地形复杂区域计算误差小,所以对预报暴雨的中尺度模式,它具有无法比拟的优越性。在近二十年,国内外 η 坐标下的数值预报模式取得了长足的发展,特别是在模拟暴雨及强对流的中尺度模式方面,这与其处理复杂地形的能力是分不开的。

本文所用模式^{[8][9]}的水平网格采用 E 网格,模式预报范围为 $100 \sim 125^\circ\text{E}$, $20 \sim 45^\circ\text{N}$,模式水平分辨率约为 18 km,水平格点数是 101×201 ,垂直方向采用上疏下密的不等距分层,分为 21 层。

1.2 η 坐标系下湿位涡

1942 年,ErteI^[10]提出了广义位涡的概念(也称 ErteI 位涡),即 $PV \equiv \frac{1}{\rho} \vec{\zeta}_s \cdot \nabla \theta$,它是绝对涡度与静力稳定度的乘积,因而是一个既含有热力因子又含有动力因子的物理量。位涡最大特性是在绝热、无摩擦的干空气中具有严格的守恒性。

一般而言,干位涡(PV)对许多中高纬天气系统的移动和发展具有指示性,但在对流层低层,尤其是在低纬,PV 很弱,再者,PV 不包括水汽分布。因此,在考虑降水特别是暴雨生成机制时必须考虑水汽的作用,从而引入湿位涡(MPV),其表达式为 $MPV \equiv \frac{1}{\rho} \vec{\zeta}_s \cdot \nabla \theta_w$ 。取静力近似,在 P 坐标系中则有

$$MPV = -g(f\vec{k} + \nabla_P \wedge \vec{V}) \cdot \nabla_P \theta_w = -g\zeta_P \frac{\partial \theta}{\partial P} - g(D_P \wedge \vec{v}_h \cdot \nabla_P \theta_w) \quad (2)$$

其中, ζ_P 为 $\vec{\zeta}_s = (f\vec{k} + D_P \wedge \vec{v})$ 在垂直方向的投影及下标 h 表示水平投影矢。若忽略 w 的水平变化,上式变为

$$MPV \cong -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_w}{\partial p} + g\left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_w}{\partial y}\right) \quad (3)$$

按(1)定义的 η 坐标,对 p 求导后有

$$\frac{\partial \eta}{\partial P} = \eta_s \frac{\partial \sigma}{\partial P} = \frac{\eta_s}{P_s - P_t}$$

这样可得到 η 坐标系下按(3)式定义的湿位涡

$$\begin{aligned} MPV &= -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial P} + g \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} \frac{\partial \theta_s}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \theta_s}{\partial y} \right) \frac{\partial \eta}{\partial P} \\ &= -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta} \frac{\eta_s}{P_s - P_t} + g \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} \frac{\partial \theta_s}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \theta_s}{\partial y} \right) \frac{\eta_s}{P_s - P_t} \\ &= MPV1 + MPV2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$MPV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta} \frac{\eta_s}{P_s - P_t} \quad (5)$$

$$MPV2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} \frac{\partial \theta_s}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \theta_s}{\partial y} \right) \frac{\eta_s}{P_s - P_t} \quad (6)$$

MPV1 是湿位涡中涡度矢垂直分量,称为湿正压项,是主要项,表示惯性稳定性和对流稳定性的作用。MPV2 是湿位涡中涡度矢水平分量部分,称为湿斜压项,包含了湿斜压性和水平风垂直切变的贡献。

2 η 模式对暴雨的模拟结果

本文选取了 1998 年 7 月 19 日~22 日发生在武汉地区的一次持续性特大暴雨过程,也即长江流域“二度梅”的过程为个例。所用的资料是常规站点资料,模式以每日 00 时资料为初始场,积分 24 h,每小时输出一次计算结果。

7 月 19 日~22 日期间,长江流域中下游至日本南部地区,一直维持着一条地面准静止锋。从 19 日 18 时开始,在 107°E 附近开始出现低气压区,以后,长江流域及以西地区均为西南~东北向低气压区控制,直到 23 日。

从流场和高度场来看^[11],7 月 20 日至 22 日,在对流层低层的 29°N 和 107°E 附近有一低涡存在,低涡东侧,长江流域一直维持着一条切变线。

降水集中在长江流域中下游地区,即集中在低涡和切变线附近。与低涡的移动方向和发展情况一致,雨带逐渐向南向东移动。分析各测站逐时降水量,20 日 12 时以前整个区域并无明显降水,主要暴雨阶段集中在 20 日 21 时~22 日 06 时,由两场暴雨组成:第一场,20 日 18 时为暴雨临近,21 日 00 时,为暴雨盛期,暴雨中心在武汉市;第二场,21 日 18 时为暴雨临近,22 日 00 时,为暴雨盛期,暴雨中心在黄石市。

2.1 形势场模拟结果

模式的模拟结果和客观分析的结果对比分析发现,模拟出系统的位置与实况非常接近,但强度偏弱。模式对西南低涡(107°E,29°N)的位置模拟的很好(图略)。

2.2 降水模拟结果

图 1 给出了 7 月 21 日 00 时到 7 月 22 日 00 时的 24 h 的降水预报场与 24 h 降水的实况场(图 1b 选自中国科学院大气物理研究所贝耐芳的博士学位论文)。由图可见,模式的降水区与实况的降水区基本相似,雨带的走向也基本相似。另外,强降水中心的位置模拟的也不错,模拟的降水量达到了与实况相近的量级。总体来说,降水的模拟是成功的。

综上所述,此模式有很好的计算稳定性和暴雨模拟能力。

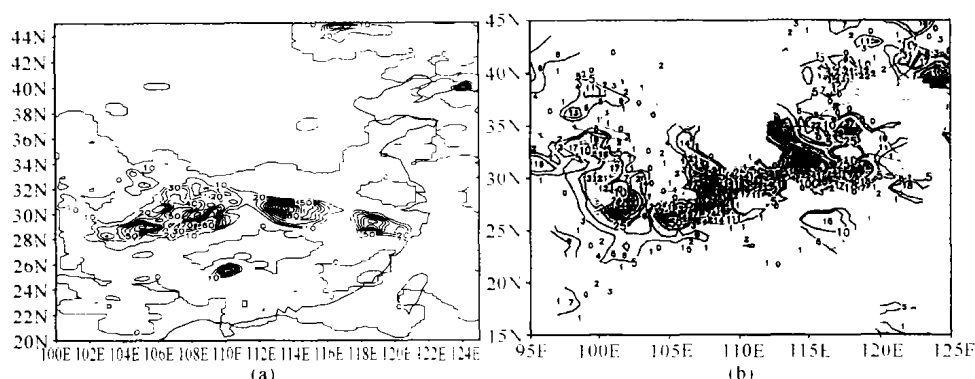


图 1 21 日 00 时~22 日 00 时降水预报场, (a)与实况场(b)对比

Fig. 1 The contrast of forecasted precipitation (a) and observed precipitation (b) from 00 BST 21 to 00 BST 22 July, 1998

3 湿位涡诊断结果分析

3.1 湿位涡(MPV)的时间演变

以往人们多用常规观测资料诊断位涡与暴雨的关系,但常规资料的时空分辨率远远不能细致地描述暴雨这样的中尺度系统,故本文利用有着很好模拟能力的、具有高时空分辨率的数值模式输出结果,对湿位涡进行了诊断。从而揭示湿位涡的时间演变特征与暴雨发展的关系。

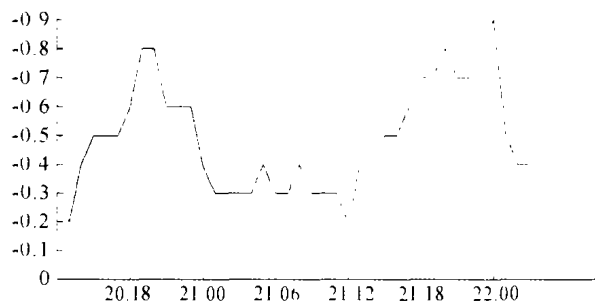


图 2 20 日 12 时~22 日 06 时 MPV 极值时间演变图(单位:1PVU)

Fig. 2 The evolution of MPV's extremum from 12 BST 20 to 06 BST 22 July, 1998, Unit: 1PVU)

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

图 2 给出了 20 日 12 时至 22 日 06 时 700 hPa 上与雨团对应的 MPV 中心极值随时间的演变,从图上可以看出,20 日 12 时以前,湿位涡的绝对值随着暴雨的临近而增大,14 时湿位涡负值中心为 $-0.4 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,15 时湿位涡负值中心为 $-0.6 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,位置在 $29^\circ \text{N}, 113^\circ \text{E}$ 附近,此时暴雨中心在 $29^\circ \text{N}, 107^\circ \text{E}$,19 时湿位涡负值中心数值达到 $-0.9 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,绝对值达到最大。以后暴雨继续发展,而湿位涡负值的绝对值开始减小。20 时负值中心减小到 $-0.3 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,当暴雨在 00 时达到最盛期时,该区域一直维持较弱的湿位涡负值,其绝对值达到最小。然后湿位涡比较稳定,随时间只有小的波动。21 日 12 时后随第二场暴雨的临近,湿位涡绝对值再次增大,21 日 15 时负值中心为 $-0.5 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,位置在 $29^\circ \text{N}, 114^\circ \text{E}$ 附近,16 时、17 时负值中心也非常明显,18 时负值中心向东南地区移至 $28^\circ \text{N}, 116^\circ \text{E}$,此时暴雨中心在 $30^\circ \text{N}, 115^\circ \text{E}$,

23 时达到 $-0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 为负值最大, 然后开始减弱, 而暴雨则在 22 日 00 时达强盛期, 此时湿位涡几乎达到最弱。

图 3 给出了 21 日 18、23 和 22 日 00 时 700 hPa 上湿位涡的分布, 为清晰, 图中只给出了湿位涡负值, 等值线的闭合中心为负值最大中心(以下图相同), 由该图可见, 这次暴雨过程中武汉及其以东地区一直为湿位涡的负值区, 湿位涡中心位于雨团的东部, 且随着雨团的东移, 其中心也东移。

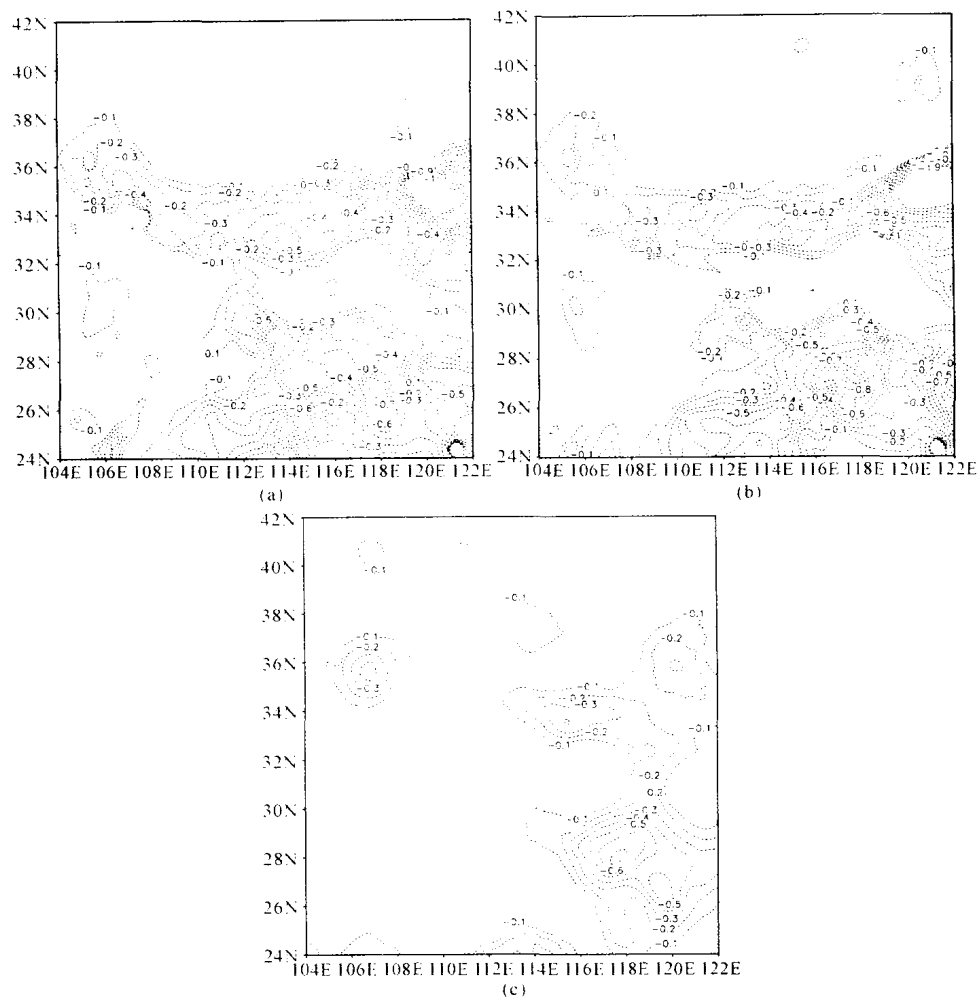


图 3 700 hPa 湿位涡分布图(单位: 1PVU)

(a) 21 日 18 时 (b) 21 日 23 时 (c) 22 日 00 时

Fig. 3 700 hPa MPV distribution (Unit: 1PVU). (a) 18 BST 21 July (b) 23 BST 21 July (c) 00 BST 22 July

从这两次暴雨过程伴随的湿位涡的逐时演变看, 暴雨区对应着负湿位涡区, MPV 负值位于雨量中心稍偏东的位置, MPV 极值中心随系统迅速向偏东方向移动。并且, 其绝对值的大小随系统的强度变化而变化, 在暴雨增强阶段对应着负湿位涡的增大, 最大负值出现在暴雨强盛之前, 其超前的时间因不同的暴雨过程而不同, 在暴雨的强盛期, 湿位涡的负值已不是最大, 随暴雨的减弱, 湿位涡负值迅速减弱, 并转为正值。这一事实也说明位势不稳定是造成暴雨的

重要原因。负值 MPV 密集区与降水带有很好的对应关系,从而启示人们在预报暴雨的发展时可以追踪 MPV 负值中心强弱的变化。

3.2 湿正压项(MPV1)与湿斜压项(MPV2)对湿位涡 MPV 的贡献

由公式(4)可见湿位涡的大小由 MPV1 和 MPV2 两项决定,MPV1 反映了湿位涡的正压涡度项,MPV2 反映了湿位涡的斜压涡度项。按公式(5)、(6)分别计算这两项后发现,MPV1 比 MPV2 大一个量级,其分布与 MPV 几乎相似,只是数值略小,因此,与 MPV2 相比,MPV1 为主要项,MPV1 的变化与暴雨有着更为密切的关系。

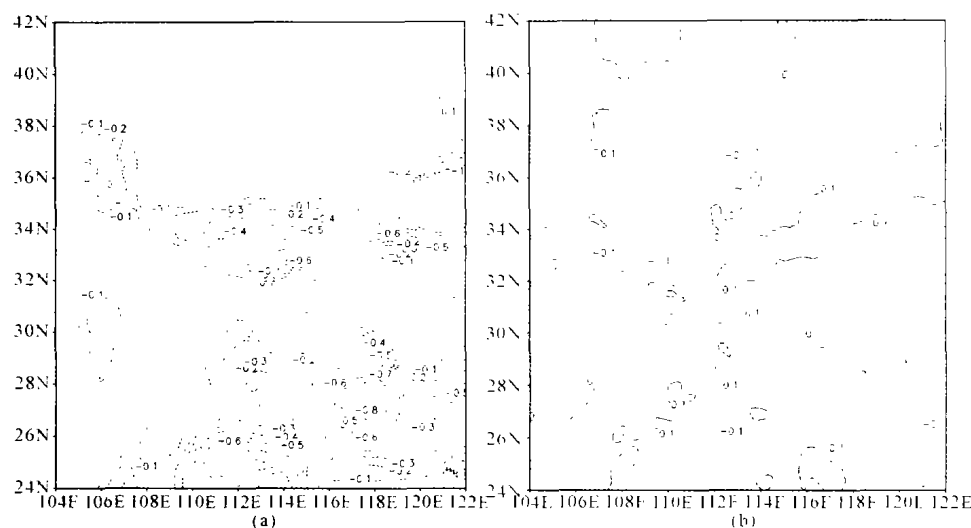


图 4 21 日 23 时 700 hPa 湿位涡分布图(单位:1PVU)

(a)正压项 (b)斜压项

Fig. 4 700 hPa MPV distribution in 23 BST 21 July, 1998 (Unit:1PVU). (a) barotropic term (b) baroclinic term

图 4 分别给出了 21 日 23 时湿位涡最强时 700 hPa 上 MPV1(图 4a)和 MPV2(图 4b)分布,首先分析湿位涡的正压涡度项 MPV1,通过分析发现,MPV1 的负值中心位于低涡附近。从图 4a 可见,长江流域低涡切变线的范围内基本为 MPV1 的负值区,而且,湿位涡的分布是不均匀的,对应低涡和切变线所在的区域是湿位涡的负值的极大值区。

其次分析湿位涡的斜压涡度项 MPV2(图 4b),同 MPV1 相比,MPV2 是一个小项,雨带主要位于 MPV2 正负值中心之间的低值区。进一步分析原因发现,此区风的垂直切变很小,所以导致了 MPV2 的数值较小。

3.3 湿位涡(MPV)垂直结构

为揭示湿位涡的空间结构,图 5 给出了湿位涡纬向垂直剖面图,图 5 的最明显特征是,湿位涡在垂直方向呈明显的柱状结构,(三角标注处为暴雨区),其水平最大范围为几百公里,具有中尺度的特征。从低层到高层 MPV 均为负值,且存在两个极值中心分别在 750 hPa 和 350 hPa 左右,进一步分析 MPV 的表达式(4)、(5)、(6)可知,MPV 的大小不仅与 θ_e 的水平和垂直分布有关,还与风场的垂直切变有关,以上计算还表明 MPV 的大小主要由 MPV1 即(5)式决定,也即由涡度的分布和层结稳定度决定,从沿切变线方向的假相当位温 θ_e 的垂直剖面图上可看出(参见图 6),低涡及其以东地区,对流层低层(600~700 hPa 以下)为位势不稳定

区,500 hPa 至 300 hPa 间为中性层结区,300 hPa 以上为稳定层结区。而从涡度场看(图略)低层涡度为正,高层涡度为负,因此由(5)式可知高低层湿位涡均为负值,而 500 hPa 至 300 hPa 为中性层结区,故湿位涡也相对较小。

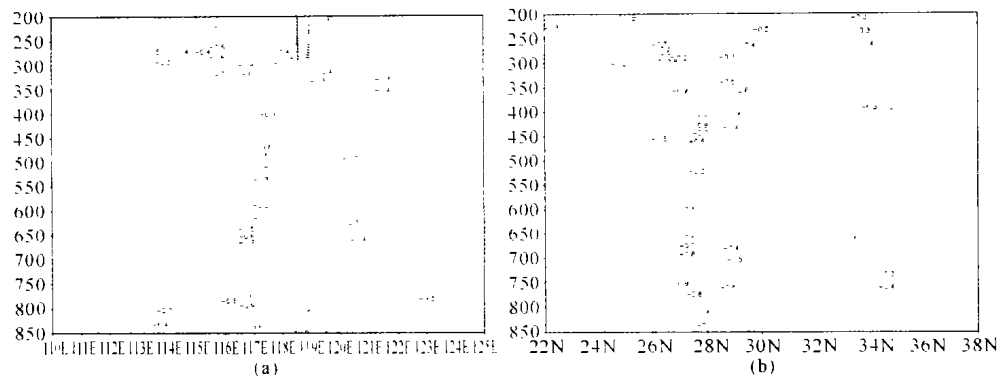


图 5 21 日 23 时 MPV 垂直剖面图(单位:1PVU)

(a)沿 27.25°N (b)沿 117°E

Fig. 5 The vertical section of MPV in 23BST 21 July, 1998 (Unit:1PVU). (a)along 27.25°N (b)along 117°E

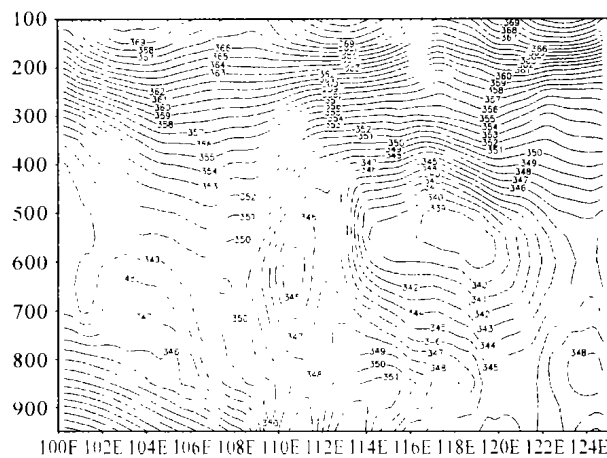


图 6 21 日 18 时沿 30°N 假相当位温垂直剖面图

Fig. 6 The vertical section along 30°N in 18 BST 21 July, 1998

为分析湿位涡垂直结构的成因,本文又做了一试验,即在模式中不考虑对流凝结加热后对这次暴雨过程进行模拟,用模拟结果诊断出的 MPV 见图 7,与图 5 比较可以发现,湿位涡的上下两个负值中心明显减弱,从而可知,对流凝结加热对湿位涡的垂直结构有着重要的影响。这是因为对流凝结潜热释放造成整层大气增暖,从而在地面生成低压,或使原有低压进一步加强。这样就造成了大气低层辐合和高层辐散加强,在科氏力等的作用下进一步造成在大气低层有正涡度、高层有负涡度发展,这样就造成湿位涡负值的增加。由于湿位涡与暴雨有着很好的对应关系,不难想象凝结潜热对暴雨的发展有着不能忽视的重要作用。

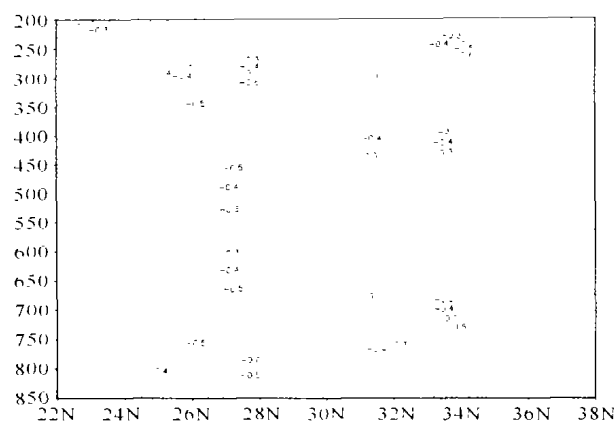


图 7 不考虑对凝结加热时湿位涡的垂直分布

Fig. 7 The vertical distribution of MPV ignoring coagulation heat

4 结 论

(1) 湿位涡的演变与暴雨发展有很好的对应关系,在暴雨的增强阶段,湿位涡负值增大,但湿位涡负值的最大值出现在暴雨强盛前数小时,这一超前量对暴雨的预报具有启示意义。从而可知,位势不稳定是造成暴雨的重要原因。

(2) 湿位涡的中心位置一般在暴雨的东部,并跟随雨团东移。

(3) 与雨团相对应的湿位涡区,在垂直方向上呈水平尺度为几百公里的中尺度柱状结构,上下存在明显的两个负值中心,中层为相对小值区,这主要由于中层为对流中性层结决定。

(4) 对湿位涡的正压项(MPV1)和斜压项(MPV2)的分析发现,MPV1 比 MPV2 大一个量级,是主要项。

参 考 文 献

- 1 Rossby C G. Planetary Flow Patterns In the atmosphere, Q. J. R. M. S. 1940, **66**(supple): 68~87
- 2 王永生,杨大升. 暴雨和低层流场的位涡. 大气科学, 1984, **8**(4): 411~417
- 3 盛华. "81. 7"大暴雨位涡与相当位涡诊断分析. 高原气象, 1984, **3**(4): 10~17
- 4 陆尔,丁一汇. 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, **5**(3): 266~274
- 5 吴国雄. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, **53**(4): 387~405
- 6 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 1~225
- 7 宇如聪. 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对 1993 年中国汛期降水的实时预报试验. 大气科学, 1994, **18**(3): 184~191
- 8 姜勇强. 中尺度暴雨模式 MRM1 简介及预报效果检验. 解放军理工大学学报, 2002, **3**(2): 1~5
- 9 姜勇强. 1998 年 7 月 21 日武汉特大暴雨的数值模拟. 气象科学, 2002, **22**(1): 52~59
- 10 Ertel H. Ein neuer hydrodynamischer wirbelsatz. Met. Z., 1912, **59**: 277~281
- 11 郑维忠. 梅雨锋暴雨两个例的中尺度数值模拟研究(II)——中尺度对流系统. 气象科学, 1999, **19**(2): 111~121

A STUDY OF TEMPORAL AND SPATIAL MESOSCALE CHARACTERISTICS OF MOISTURE POTENTIAL VORTICITY IN HEAVY RAIN

An Jie Zhang Lifeng

(Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

Abstract In this paper, the fine grids model of 21 layers and η coordinate is used to simulate a continuing heavy rain in the Wuhan region in July 19—22, 1998. The results of model output have used to diagnose moisture potential vorticity for showing its mesoscale characteristics on temporal and spatial. The results show that the development of heavy rain is closely related to moisture potential vorticity's negative numbers.

Key words Heavy rain Moisture potential vorticity Meso—scale Temporal and special characteristics η model