

对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析

黄 亿^{1,2} 寿绍文¹ 傅灵艳^{1,2}

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室 210044;
2. 南京信息工程大学)

提 要: 利用中尺度模式 WRF 对台风卡努模拟所输出的高分辨率资料,借助等熵位涡及湿位涡的方法进行诊断分析,揭示台风暴雨过程中的中尺度系统演变特征以及探讨台风暴雨发展与维持的机制。结果表明:等熵面位涡图的分析清楚地揭示了台风低压及周边环境的位涡演变特征。暴雨区落在低层等熵面位涡高值中心的东北侧,或者在高层等熵面位涡高值中心右侧最大位涡梯度处;等位温面向正位涡异常中心收拢,高层的高位涡值下传,高位涡的干冷空气加强了低层的扰动,引起低层暖空气的抬升,这些条件促使对流不稳定能量与潜热能的释放,有利于暴雨增幅;条件性对称不稳定与对流不稳定是此次台风暴雨发展与维持的重要机制,暴雨区内中尺度系统的发展符合倾斜涡度发展理论。

关键词: 台风暴雨 等熵位涡 湿位涡 条件性对称不稳定

A Diagnostic Analysis of PV and MPV on the Heavy Rain Caused by Typhoon Khanun

Huang Yi^{1,2} Shou Shaowen¹ Fu Lingyan^{1,2}

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu Key Laboratory of Meteorology Disaster, 210044;
2. College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology)

Abstract: By using the high resolution output data from mesoscale model WRF successfully simulating typhoon “Khanun”, with the diagnostic method of isentropic potential vorticity (IPV) and moist potential vorticity(MPV), the evolvement characteristic of mesoscale system is analyzed in the course of rainstorm and the mechanism of typhoon rainstorm development and maintenance is discussed. The results show that the study of PV on isentropic surface

基金项目: 国家自然科学基金项目(40405009、4057022、40205008);江苏省气象局科技开发项目(200406),江苏省气象灾害重点实验室项目(KLME050201);国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418301);江苏省自然科学基金项目(BK2005141)

收稿日期: 2008年3月8日; 修定稿日期: 2008年6月1日

reveals PV evolution characteristic of typhoon low pressure and nearby, the rainstorm region lies in the northeast part of high PV center on the lower isentropic surface or lies in the right side of the maximum PV gradient on the upper isentropic surface. It also shows that high PV, including in dry and cold air, spreads downward from the upper layer to intensify the turbulence of lower layers along with the isentropic surface curling to the center of positive PV anomaly, which helps the release of potential instability energy and the amplification of rainstorm. Conditional symmetry instability and convective instability can be considered as significant mechanism of typhoon rainstorm development and maintenance. Meanwhile, the development of mesoscale system in the rainstorm region agrees with slantwise vorticity development theory.

Key Words: typhoon rainstorm isentropic potential vorticity moist potential vorticity conditional symmetry instability

引 言

台风是一种强降雨系统,台风暴雨的范围和强度都很大。登陆台风一般有两个暴雨区,首先是台风眼壁暴雨,另一个在台风内外螺旋雨带和切变区中。有时还有第三个暴雨区,出现在台风外围伸向北方的倒槽区,当台风与中纬度槽结合时,暴雨区可以出现在相距台风甚远的槽前,这是中低纬度环流相互作用的产物。暴雨的形成必须具备一定的动力学和热力学条件,而位涡与湿位涡是反映大气动力、热力和水汽作用的综合物理量,与暴雨的产生条件相吻合,能更全面、有效地描述暴雨的发生发展。国外对位涡在降水机理、锋面分析和气旋产生方面的研究,取得了显著的成果, Hoskins^[1]指出不计非绝热加热和摩擦效应下的位涡与湿位涡守恒以及湿位涡为负时可能产生的对称不稳定,还论证了对流层上部或平流层的位涡扰动下传,可以引起对流层下部及地面的气旋的发展;还指出当高层有正位涡扰动移动到对流层低层或地面的斜压区上空时,可引起低层温度扰动。高层低层的位涡和温度扰动,以及它们诱发的环流共同作用的结果,便造成了低涡或气旋的发生和发展。Davis^[2]等提出了一个精确的动力学意义的 PV 锋生概念,将高

层对流层锋视为等熵面上的 PV 梯度加强的过程,这个概念在高层锋动力学上提供了新的观点,并且可能使相关的现象清楚地显示出来。Jonh Molinari^[3]等分析了热带风暴 Danny 与一个高层对流正的 PV 异常间的相互作用,提出了叠加原理。即认为小尺度的正的高层 PV 异常与低层热带气旋中心相叠加可使得热带气旋加强。在国内^[4-10],位涡主要用于暴雨和强对流天气系统的诊断。吴国雄等^[11],在导出湿位涡方程的基础上,提出倾斜涡度发展理论,为位涡及湿位涡在暴雨研究中提供了更深的理论依据。位涡及湿位涡理论模型可以揭示产生暴雨的物理机制,但若详细地揭示台风暴雨中发生的各种动力学和热力学过程和结构,则需要台风暴雨数值模拟的支持,因而本文利用模式 WRF 对 0515 号卡努台风引起江苏地区暴雨过程进行模拟研究,在模拟降水与实况降水基本一致的情况下,利用模式输出的高分辨率的结果,借助等熵位涡及湿位涡的方法进行诊断分析,以揭示暴雨过程的中尺度系统的演变特征。

1 暴雨个例与模拟方案

2005 年第 15 号台风卡努其中心于(世界时,下同)9 月 11 日 07 时在浙江台州沿海

登陆,登陆后继续向西北方向移动,11 日 15 时减弱为强热带风暴,11 日 19 时进入江苏境内,然后向偏北方向移动,并于 12 日 00 时开始转向东北方向移动,13 日 00 时减弱为低压。受其影响,江苏境内从 9 月 11 日起出现大风、降水天气。其中,11 日 00 时至 12 日 00 时江苏全省沿江和苏南地区 12 个站出现暴雨,3 个站出现大暴雨;12 日 00 时至 13 日 00 时苏北地区 19 个站出现暴雨,1 个站出现大暴雨(暴雨中心在射阳),见图 1。暴雨时段主要集中在 11 日 18 时至 12 日 00 时和 12 日 00—06 时两个时段。通过对环流形势的分析(图略),江苏省位于台风倒槽顶部,受其影响以及台风自身的气旋性涡旋的

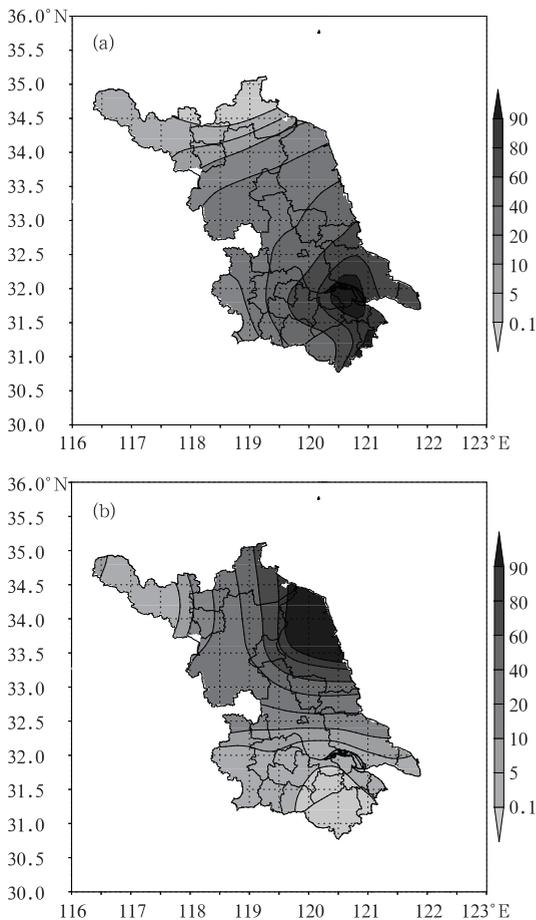


图 1 2005 年 9 月 11 日 00 时至 9 月 12 日 00 时雨量(a)和 9 月 12 日 00 时至 9 月 13 日 00 时雨量(b)(单位:mm)

作用,从而造成了此次区域性暴雨过程,降水集中在强热带风暴前进方向的偏右方。

本文采用 NCAR 开发的非静力中尺度模式(WRF),对 2005 年 9 月 11 时 00 时至 2005 年 9 月 13 日 00 时进行了 48 小时的数值模拟,利用 NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 一日四次的全球再分析资料作为模式初始场以及边界条件,采用了双重网格嵌套,水平分辨率分别为 36km 和 12km,积分步长分别为 30s 和 10s。模式垂直为不等距 31 层,顶层气压为 50hPa。粗网格微物理过程采用 WSM 3-class 简单冰方案、YSU 边界层方案以及 Grell 积云对流参数化方案;细网格微物理过程采用了新的 Thompson 方案、MYJ 边界层方案以及 Betts-Miller-Janjic 积云对流参数化方案。从图 2 中给出的模拟台风路径可以看到,它和实况相当接近。

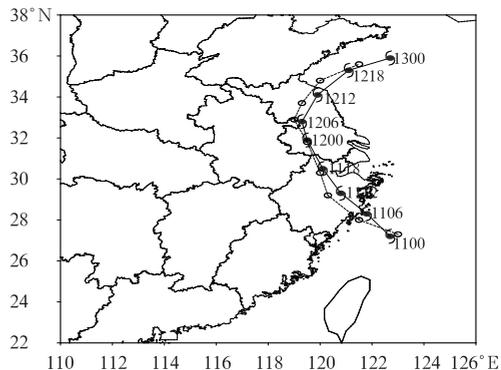


图 2 台风卡努模拟和实况路径对比
实线为台风年鉴的路径,虚线为模拟路径

同时,图 3 给出了暴雨中心 6 小时累计降水量时间变化的模拟与实况对比,可知总的降水强度趋势是基本一致的,图 4(a)、(b)所给出的 9 月 11—12 日和 12—13 日 24 小时模拟降水分布与图 1 中的实况降水分布也比较接近,模式输出的数据具有可靠性,并可以作为进一步分析的基础,而利用高分辨率的资料能较为细致地分析台风暴雨中的中尺度系统的演变特征。

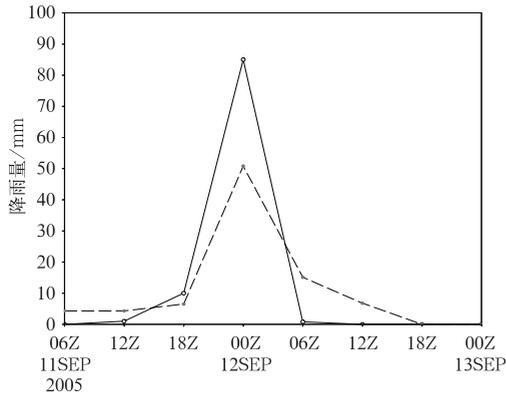


图 3 暴雨中心(南通)模拟与实况 6 小时累计降水量随时间演变
实线为实况降水量,虚线为模拟降水量(单位:mm)

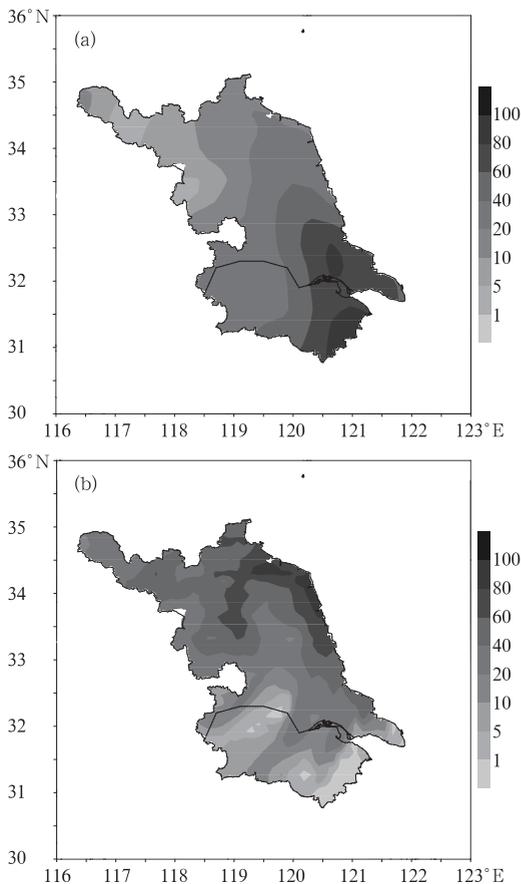


图 4 2005 年 9 月 11 日 00 时至 9 月 12 日 00 时模拟降水(a)和 12 日 00 时至 13 日 00 时模拟降水(b)(单位:mm)

2 干湿位涡的理论与诊断分析

2.1 基本理论

位涡概念最早由 Rossby(1940)提出,他指出在正压模式下,绝对涡度 ζ_a 与气柱厚度 H 的比为一常数,即

$$\zeta_a/H = \text{常数}$$

ζ_a/H 既是“位涡”概念最简单的表达形式。

1942 年, Ertel 提出了广义位涡 q 的概念,

$$q = \alpha \zeta_a \cdot \theta$$

其中 θ 为位温, α 为比容, ζ_a 为绝对涡度矢量。又称为 Ertel 位涡,它是绝对涡度矢量与位温涡度矢量的点积,因而是一个既包含热力因子又包含动力因子的物理量。位涡在绝热、无摩擦的干空气中具有严格的守恒性(即 $dq/dt=0$)。

在考虑降水特别是暴雨的生成机制时,必须考虑水汽的作用,从而出现了湿位涡的概念。以相当位温 θ_e 代替位温 θ ,则可得湿位涡的表达式:

$$q_m = \alpha \zeta_a \cdot \theta_e$$

如果不计非绝热加热和摩擦效应,湿位涡同样具有守恒性。湿位涡这一物理量不仅表征了大气动力、热力属性,而且考虑了水汽的作用,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。在无摩擦、湿绝热大气中,系统涡度的发展由大气层结稳定度、斜压性和风的垂直切变等因素所决定。在湿位涡守恒制约下,由于湿等熵面的倾斜,大气水平风垂直切变或湿斜压性增加,能够导致垂直涡度的显著性发展^[11]。

寿绍文等^[12]总结了在等熵面上的位涡思想主要包括以下要点:(1)用涡度观点,我

们通常将大气结构看成是由移动性的高空槽、脊叠加在地面气旋、反气旋之上所组成。而用位涡思想则将大气结构看成是由高空位涡异常和低层位温异常相叠加而组成;(2)围绕高空正、负位涡异常区分别有气旋性和反气旋性环流出现;而近地面层的正、负温度异常区也分别有气旋性和反气旋性环流相对应。上下层位涡和温度异常所诱生的风场之和便构成了总风场;(3)在绝热、无摩擦假定下等熵面上位涡平流引起位涡的局地变化;(4)位涡和温度异常所诱生的风场改变了等熵位涡的分布;(5)等熵位涡的分布又与新的诱生的风场相联系。位涡和温度异常与诱生的风场的连续相互作用,造成“自我发展”(self development)过程,这种过程将延续到高低层异常区的轴线在同一垂线上为止。

在实际计算中, p 坐标系下,并假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多,干位涡 PV 和湿位涡 MPV 的表达式为:

$$PV \approx -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$$

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

其中 ζ 为垂直涡度, f 为科氏参数,其余符号均为气象常用符号,湿位涡的计算采用了饱和湿空气的判据。

2.2 位涡分析

在绝热、无摩擦运动中位涡是一个保守量,因此可以通过追踪位涡异常区来追踪大气扰动的演变情况,等熵面上的位涡变化可由沿等熵面的位涡平流来确定。在绝热过程中,空气质点是沿着等熵面移动的,分析等熵面上的位涡与水平流场分布特征,分析它们与中尺度系统演变以及暴雨过程的联系,可以揭示暴雨的落区和强度与位涡之间的关

系。

本文选取了 310K 和 335K 两个等熵面,分别对应 850~700hPa 和 300~200hPa 高度,代表了大气低层与高层的分布情况。台风于 11 日 19 时进入江苏地区,从 6 小时地面累计降水量图(图略)可知,暴雨集中在 11 日 18 时至 12 日 00 时和 12 日 00—06 时,分别在苏南与苏北地区有一个暴雨中心,并且位置基本与 24 小时降水量图暴雨中心位置一致。从图 5(a)、(b)、(c) 上看出,310K 等熵面上强热带风暴环流的低压中心基本与位涡高值中心吻合,风向与等值线分布平行,文献[5]提出台风低压高位涡区的等值线分布与风向大致平行,这就使得台风低压北上速度缓慢,是引起它的外围暴雨集中在一定范围内的重要原因,与暴雨强度高,范围集中是息息相关的。位涡的高值中心有一个逐渐增强然后减弱的过程,由一个强的高值中心分裂成几个相对较小的中心,并随时间向北移动,即沿等熵面上有向北的位涡平流。暴雨中心位于高值位涡中心的右上侧,而不是在其内。苏南暴雨中心的位涡强度先由 0.9PVU 增强至 1.8PVU 而后减弱至 0.8PVU;同时苏北的暴雨中心的位涡从 0.5PVU 逐步增强至 1.8PVU,而后随着台风低压朝东北方向移动入海,位涡强度也随之削减。

从图 5(e)、(d)、(f) 上,335K 等熵面上风向基本与高位涡区等值线平行,北上的位涡平流与南下的高位涡结合造成了高值位涡中心的逐渐增强,控制的范围也逐渐扩大,同时图上存在着高低位涡中心相间分布的特点,而暴雨中心恰好出现在高值中心右侧的高低位涡之间等值线密集区之中,即暴雨出现在位涡梯度大值区。

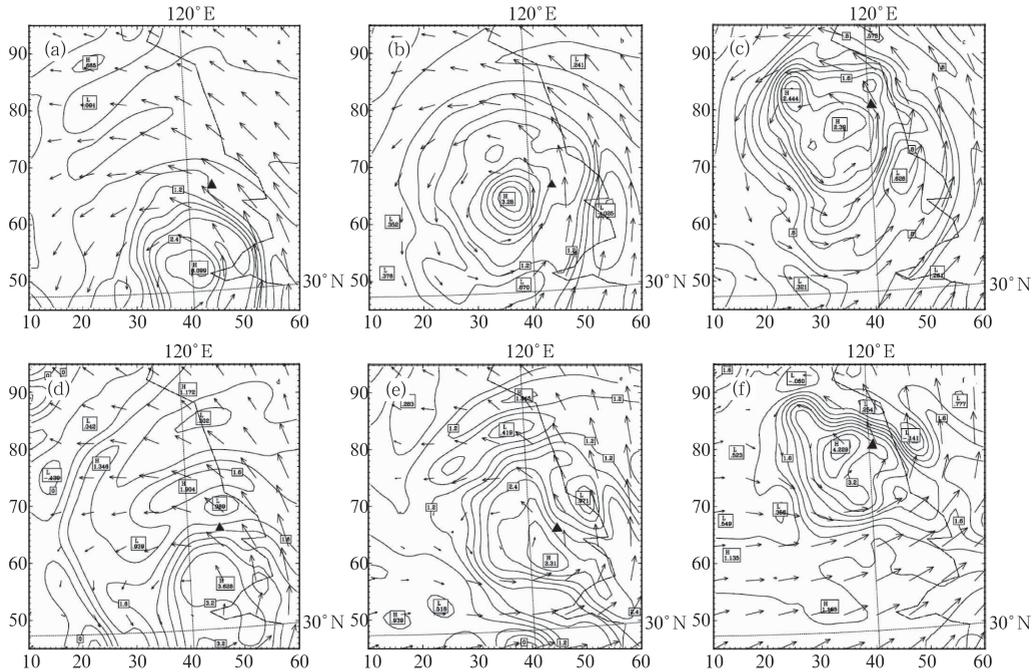


图 5 模拟的 310K(a,b,c)和 355K(d,e,f)等熵面上的位涡分布与流场分布
(a,d) 11 日 18 时, (b,e) 12 日 00 时, (c,f) 12 日 06 时; 三角形▲为 6h 暴雨中心位置;
等值线为位涡 单位: $\text{PVU}(10^{-6}\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$, 箭头为风场 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

为了更细致地分析位涡的垂直分布及其传播,揭示高空冷空气的活动状况和地面中尺度气旋的发展,做穿越暴雨中心附近经线 120.5°E 位涡与位温的垂直剖面图以及三维风场剖面图。从图 6 中可以清楚地发现,对流层上部和平流层下部(200hPa 以上)为呈波状分布的位涡高值区,这些与平流层和对流层顶的静力稳定度很大相关。另一位涡高值区集中在 $400\sim 600\text{hPa}$ 之间,而且不断向低层扩展,并与低层的低压位涡高值区联接成一片广阔的位涡高值区,形成了一个高位涡柱,这与很多文献中的分析一致。从位温的垂直剖面能看出,在强热带风暴低压附近中高层等位温线略显下凹,中低层略显上凸,向正位涡高值中心收拢,形成了高层暖心和低层冷心的结构,低层冷心逐渐增强并且向高层慢慢延伸,这可能与低压环流区降水的蒸发冷却以及高空冷空气的侵入有关。从三维风场的垂直剖面发现风场基本是以偏南

风为主,因为位于强热带风暴环流的右侧,强的风的垂直切变出现在位涡高值区附近,同时也伴随着强热带风暴低压附近中低层的气旋性环流和高层的反气旋性环流,有利于低层辐合高层辐散,使得暴雨区的上升运动得以维持与加强,从而造成了暴雨的增幅。从图 6(a)、(b)中看到暴雨区上空高层两位涡高值区连接起来,并向下延伸加强低层的涡旋发展,低层气流有着强烈的气旋性切变与辐合上升,为暴雨的维持与增幅提供了十分有利的条件;从图 6(b)、(c)中同样可以发现相类似的情况。结合其它时次(图略),可以看到这次暴雨过程中位涡高值区一直向北移动,与强热带风暴低压环流移动方向保持一致,并且不断地与北方南下的冷涡合并增强下传至中低层加强那里的涡旋发展,最后随着强热带风暴的继续北上与减弱,暴雨过程结束。

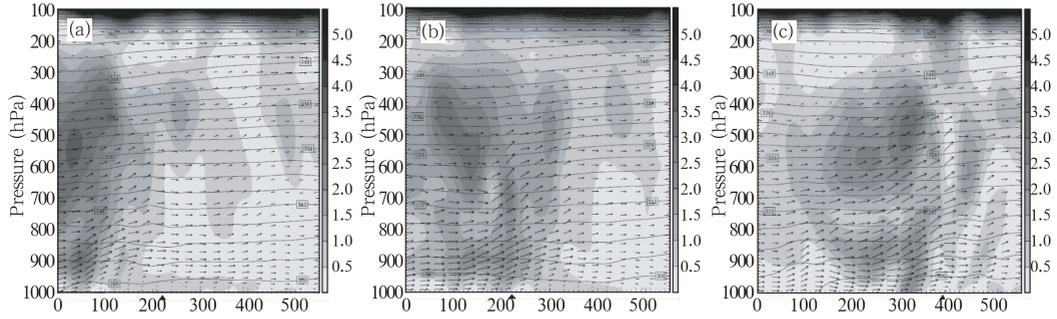


图 6 沿 120.5°E,30.5~35.5°N 经向垂直剖面图

(a)模拟 11 日 18 时, (b) 模拟 12 日 00 时, (c) 模拟 12 日 06 时; 三角形▲为 6h 暴雨中心位置; 实线为位温 单位:K; 箭头为三维风场 单位: $m \cdot s^{-1}$; 阴影部分为位涡 单位:PVU

可见,高层的位涡高值下传,高低层位涡高值连接加强使得暴雨区一直受到高位位涡区的控制,高位涡的干冷空气加强了低层的扰动,降低了低层的稳定性,迫使中下层暖空气的抬升,促使对流不稳定能量与潜热能的释放,造成了暴雨的增幅。

2.3 湿位涡的分析与条件性对称不稳定

考虑到水汽的影响作用以及其影响的层次一般在对流层中低层,由此分析 850hPa 等压上的湿位涡的分布特征,研究湿位涡对暴雨过程的指示性,揭示低层大气暖湿气流的活动特征。

从图 7(a)、(b)可以看出,在 850hPa 苏南地区基本全在湿位涡的负值区控制下,其

低值中心可达 $-1.4PVU$,而暴雨中心位置在湿位涡低值中心的右上侧,湿位涡梯度较密集的区域,这一点与图 5 中分析的位涡特征很相似。从图 7(c)中发现湿位涡低值区经过 12h 的向北移动后,强度明显减弱,分裂成几个中心值为 $-1.1PVU$ 、 $-0.9PVU$ 的低值中心,苏北的暴雨中心位于其前进方向右侧湿位涡相对密集处附近,此时苏南的暴雨中心位置则被一湿位涡高值中心取代。可以看出暴雨区域湿位涡场由负值区控制,沿海的湿位涡负值区为暴雨输送了充足的水汽,结合图 6 分析所得出的结论,表明大气处在对流不稳定状态,一旦有高层冷空气的侵入,触发和加强低层的扰动,触发其不稳定能量的释放,从而造成该区域的暴雨。

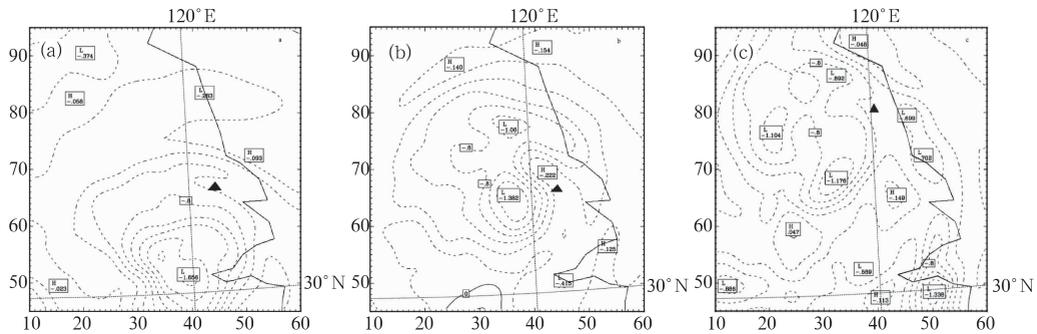


图 7 850hPa 等压面上湿位涡的分布

(a)模拟 11 日 18 时, (b) 模拟 12 日 00 时, (c) 模拟 12 日 06 时; 三角形▲为 6h 暴雨中心位置 单位:1PVU

对流不稳定是一种潜在的不稳定,其蕴涵的不稳定能量同样是一种潜在的能量,只有产生了抬升作用,形成了强大的上升气流,这时不稳定能量得到了释放,转换成加强上升气流的动能,从而爆发对流为暴雨产生提供有利条件。对称不稳定,特别是条件性对称不稳定(CSI)是倾斜对流发生发展的机制之一,而倾斜对流又与暴雨、强对流天气相联系,有时大气是对流稳定的,似乎不存在发生对流的可能,但是用条件性对称不稳定的判据分析,实际大气为条件对称不稳定的,具有条件对称不稳定能量,因此可以用来判断发生对流的可能,可以说对 CSI 的判定能更好地揭示暴雨等对流性天气。湿位涡常用来分析 CSI,当 $MPV < 0$ 时则有可能发生条件性对称不稳定。分析了 850hPa 对流不稳定度的分布特征(图略),江苏地区基本呈现弱的对流不稳定状态,有利于出现条件性对称不稳定。从图 8(a)中可以看出,600hPa 以上为对流稳定区,在暴雨发生初期(模拟 11 日 18 时),暴雨中心位置上 900hPa 以下低空,等 θ_e 线比较平缓,而且下暖上冷,表现出对流不稳定状态;900~600hPa 出现一个陡峭的等 θ_e 线密集区,几乎与等压面垂直,说明此时低层的对流稳定度较小,为了保持湿位涡守恒,使得低层的气旋性涡度增强,促使低

层中尺度低涡和气旋的产生与发展,为产生暴雨提供了极为有利的条件,这与吴国雄提出的“倾斜涡度发展”理论一致。同时暴雨区上空有 θ_e 冷舌自上而下入侵,表明高层干冷空气沿陡峭等 θ_e 线的下滑到低层高温高湿对流不稳定区,有利于对流发展。而这时的等 M 线相比等 θ_e 线要平缓得多,由条件性对称不稳定的判据可知,等 θ_e 线的斜率愈大于等 M 线斜率时,愈有利于产生条件性对称不稳定,而这时暴雨区的低层上空正好符合条件性对称不稳定。从图 8(b)分析,6h 过后等 θ_e 线密集区迅速的移动到苏北的暴雨中心位置,同样产生了对流不稳定和条件性对称不稳定,为该地区暴雨的产生提供有利条件;而此前苏南地区的暴雨中心位置上空已表现出大气中性层结和弱的对流不稳定,而此时的等 M 线斜率完全大于等 θ_e 线的斜率,大气处于条件性对称稳定中。由图 8(c)看出,苏北的暴雨中心位置上空等 M 线斜率基本平行等 θ_e 线的斜率,已呈现出条件性对称稳定趋势,暴雨区北侧低层出现自下而上的暖舌,暴雨逐渐消退。此次台风暴雨过程中既有倾斜对流,又有垂直对流发生,因此条件性对称不稳定与对流不稳定为这次台风暴雨发生与维持的主要机制。

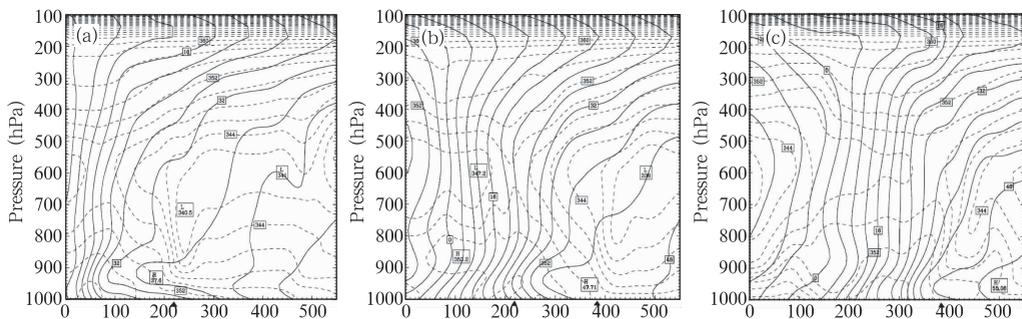


图 8 绝对动量 M 与相当位温 θ_e 的经向垂直剖面图

(a)模拟 11 日 18 时, (b)模拟 12 日 00 时, (c)模拟 12 日 06 时;实线为等 M 线,单位: $m \cdot s^{-1}$;

虚线为等 θ_e 线 单位:K;其它说明同图 6

3 结论

利用非静力中尺度模式 WRF 对 0515 号台风的成功模拟所输出的高分辨率资料,借助等熵位涡、湿位涡等诊断量对登陆台风造成江苏地区暴雨的过程进行细致的诊断分析,同时探讨了导致此次台风暴雨发展与维持的机制,得出如下几点结论:

(1) 此次暴雨是由台风外围倒槽与自身的气旋性涡旋共同作用引发,对等熵面位涡图的分析揭示了台风低压及周边环境的位涡演变特征,暴雨区一般是落在低层等熵面位涡高值中心的右上侧,或者是在高层等熵面位涡高值中心右侧最大位涡梯度处。

(2) 对暴雨区发展的剖面图分析,发现在暴雨区上空高层的高位涡值下传,高低层位涡高值连接加强使得暴雨区一直受到高位涡区的控制,高位涡的干冷空气加强了低层的扰动,等位温面向正位涡异常中心收拢,降低了低层的稳定度,迫使中低层暖空气的抬升,促使对流不稳定能量与潜热能的释放,造成了暴雨的增幅。

(3) 从湿位涡分析出发,深入剖析台风暴雨发展与维持过程中的大气稳定度,结果显示条件性对称不稳定与对流不稳定是导致这次台风暴雨发展与维持的机制,中尺度低涡和气旋的发生和发展符合“倾斜涡度发展”理论。

致谢:本文中尺度数值模拟的结果是在江苏省气象灾害重点实验室 SGI 大型机上运行得出。

参考文献

- [1] Hoskins B J, McIntyre M. E, Robertson A. W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Quart. J. R. Meteor. Soc, 111:877-946.
- [2] Davis H. C, Rossa A. M. 1998. PV frontogenesis and upper-tropospheric fronts[J]. Mon Wea Rev, 126: 1528-1539.
- [3] John Molinari Steven Skubis, David Vollaro, et al. 1998. Potential vorticity analysis of tropical cyclone intensification[J]. J. Atmos. Sci, 55: 2632-2644.
- [4] 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(6): 560-568.
- [5] 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[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 111-120.
- [6] 王建中, 马淑芬, 丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 19-27.
- [7] 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): 622-670.
- [8] 靖春悦, 寿绍文, 贺哲, 等. 台风海棠造成河南暴雨过程的位涡分析[J]. 气象, 2007, 33(4): 58-64.
- [9] 徐晶, 王东生, 杨克明. 2003年7月4-7日淮河流域特大暴雨等熵面位涡分析[J]. 气象, 2004, 30(1): 33-37.
- [10] 尤红, 曹中和. 2004年云南秋季强降水位涡诊断分析[J]. 气象, 2006, 30(1): 95-101.
- [11] 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.
- [12] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 276-285.