

三个登陆浙江热带气旋数值试验及 暴雨过程的湿位涡分析

薛根元¹, 张建海², 陈红梅²

(1 浙江省气象局, 浙江 杭州 310002; 2 绍兴市气象局, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 首先利用非静力平衡中尺度数值模式 MM5(V3)对 2004 年 3 个登陆浙江热带气旋的登陆过程进行了数值模拟试验, 通过对路径、降水的对比验证表明, MM5 模式对热带气旋的模拟是比较成功的。然后在模拟效果较好的基础上, 利用高分辨的模拟结果, 对台风暴雨过程的湿位涡进行了诊断分析, 结果表明: 3 场台风暴雨的形成机制有显著差异, Rananim 强降水是由其本身环流造成的, 至于 Mindulle 和 Haima 的降水冷空气的侵入起到了重要作用。暴雨都发生在 θ_e 陡立密集区附近, 对流层低层湿位涡负值中心与暴雨落区存在较好的对应关系, 而其中中心数值绝对值随时间的变化量与 1h 降水存在正相关关系, 说明湿位涡负值中心可以作为降水时空分布的重要指标, 为台风暴雨预报提供一种思路。

关键词: 登陆热带气旋; 数值模拟; 台风暴雨; 湿位涡

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2006)3 - 0042 - 09

1 引言

登陆我国热带气旋及其引发的暴雨洪涝一直是人们关注的焦点。实践和研究表明, 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相关。但由于暴雨天气过程的形成机制比较复杂, 用单一的物理量如涡度、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。位涡(PV)是一种综合表示大气动力属性和热力属性的物理量, 同暴雨的产生需要具备一定的动力学和热力学条件的特征相吻合, 它能有效地描述出暴雨系统的一些特点而备受关注。吴国雄^[1~2]对湿斜压过程中涡旋垂直涡度的发展做了较深入的研究, 指出当 θ_e 面陡立时, 湿等熵面的倾斜能引起垂直涡度的增长, 从而导致暴雨发生。寿绍文^[3~4]、赵宇^[5]依据位涡理论分别对 1991 年江淮特大暴雨和变性台风暴雨进行了诊断研究, 成功地解释了一些重要的现象和事实。

对位涡的研究与分析, 有助于增进对暴雨的发生发展及其演变的认识和了解, 但由于中尺度探空资料的缺乏, 这方面的研究多局限于大尺度, 对造成暴雨的中尺度位涡场的细致结构的研究还不多。本文利用中尺度数值模式 MM5(V3), 对 2004 年 3 个登陆浙江的热带气旋进行数值模拟, 在模拟较为成功的基础上, 利用模式输出的高时空分辨资料, 借助于位涡分析方法, 进行台风暴雨过程中位涡场结构及其演变分析, 以便更深入

收稿日期: 2005-10-11

作者简介: 薛根元 (1961-), 男, 高级工程师, 主要从事天气分析、预报和气候变化研究。

地揭示台风暴雨的动力学和热力学机制,给暴雨落区和强度的短期预报提供有益的参考。

2 天气实况和数值试验简介

2.1 天气实况概述

2004 年是热带气旋登陆浙江最多的年份,7 月、8 月和 9 月接连有 3 个热带气旋 Mindulle (0407)、Rananim (0414) 和 Haima (0421) 登陆浙江。由于热带气旋登陆时的强度(见表 1)存在显著差异,由此所造成的影响也不尽相同,Mindulle 和 Haima 的登陆总体上是利大于弊,很大程度上缓解了浙江持续高温少雨所导致的旱情。而 Rananim 则造成浙江 164 人死亡,24 人失踪,受灾人口达 1299 万人,直接经济损失 181.28 亿元^[6]。

表 1 热带气旋登陆时的基本情况

热带气旋	登陆时间	经度	纬度	中心气压 (hPa)	最大风速 (m/s)	等 级
Mindulle	3 日 9 时 30 分	120.0	27.7	985	25	强热带风暴
Rananim	12 日 20 时	121.6	28.3	950	45	台 风
Haima	13 日 12 时	120.8	27.9	998	18	热带风暴

对登陆浙江 3 个热带气旋所引发的暴雨过程进行对比分析,发现在雨量及其时空分布上具有各自特点。从雨量看,Rananim 是 1956 年以来登陆我国大陆强度最强的台风,其雨量创浙江历史实测最高记录,过程(11 日 08 时~14 日 08 时)最大雨量为乐清矾头达 916mm;Haima 在强度虽然不及 Mindulle,但降水则有所反超。从暴雨分布看,Mindulle 降水分布与其移动路径比较一致,降水主要出现在浙江沿海一带,而 Rananim 和 Haima 的降水在其移动路径两侧呈非对称分布,热带气旋登陆点北侧的降水明显大于南侧,特别是 Haima 在其南侧几乎没有降水,而北侧的降水距登陆点较远,雨量中心出现在宁波,距其登陆点约 150km。另外,Mindulle 和 Haima 的降水几乎都出现在热带气旋登陆前,而 Rananim 降水主要集中在登陆前后 6h 之内。

2.2 试验方案设计

采用 NCEP 一日四次水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球分析场为模式的第一猜测场,在模式初始化过程中使用了常规探空、船舶和地面观测资料,最终形成模式的初始场,没有采用任何 Bogus 方案。设计双向反馈两重嵌套网格,粗、细网格格距分别为 45km 和 15km,使用 10min 地形数据。模式中心点为 (28°N , 115°E),格点数都为 121×121 ,垂直方向取 23 层 σ 坐标,模式顶为 100hPa。分别采用 Betts-Miller 和 Grell 对流参数化方案,采用 Blackadar 行星边界层参数化方案、Reisner 软雹方案和云辐射方案,侧边界分别为张弛和时变边界,时间积分步长分别为 90s 和 30s,积分时间为 48h,基本涵盖了热带气旋登陆前后的全过程,为求得模拟状态的逼真,在模拟过程中采用了客观分析资料全程四维同化。

3 模拟结果分析

为节省篇幅,本文主要从热带气旋路径和降水量及分布两个方面对模拟结果与实况进行对比验证。

3.1 热带气旋移动路径模拟结果

图 1 为中央气象台定位的 3 个热带气旋实况路径和模拟路径,图中实线为实况路径,虚线为模拟路径,不难看出模拟路径和实况路径是基本吻合,最大偏差也在 1 个经距或 1 个纬距之内,说明对热带气旋的数值模拟是比较成功的,但模拟和实况路径之间还是存在一定的差异,主要表现为: Mindulle 模拟路径在前期较实况偏东,模拟路径登陆没有浙江,而是紧擦浙江沿海北上,模拟后期路径的东北转向也没有实况显著,预报存在一定误差。Rananim 在登陆前 12h 模拟路径较实况偏南,登陆后 36h 模拟路径则较实况偏北,模拟登陆点也比实况略偏南偏晚,登陆后实况和模拟都有一个明显的西折过程,但实况出现时间明显早于模拟,实况 12 日 20 时在浙江温岭登陆后立即就出现西折,而模拟西折过程等到台风中心移至浙江中部时才出现。就 Haima 而言,在整个模拟期间,模拟路径始终位于实况路径西侧,模拟登陆时间比实况略有提前。

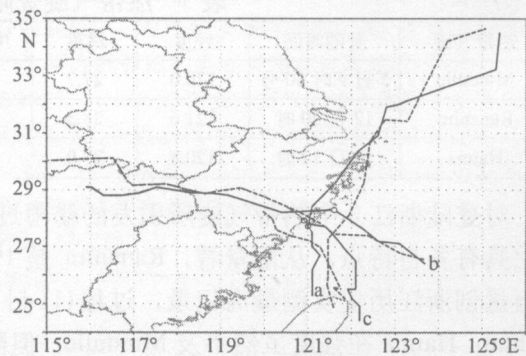


图 1 热带气旋实况路径和模拟路径
(a. Mindulle, b. Rananim, c. Haima)

3.2 降水模拟结果

粗细网格的降水模拟结果非常类似,只不过细网格模拟的降水分布中具有更详细的中- β 尺度的雨团信息。为避免累赘,这里仅给出细网格降水与实况降水的对比。从图 2 所给出的 Mindulle (其他两个热带气旋降水对比图略) 36h 模拟降水与实况降水对比可见,暴雨区的走向和范围与实况非常一致,都是呈南北走向,陆上降水主要出现在 120°E 以东的沿海地区,苏南和浙江沿海这两个雨量中心的落区都被很好地模拟出来,不过浙江沿海一带雨量中心预报降水比实况要小一些,两者存在约 50mm 的偏差,这主要是由于 Mindulle 模拟路径比实况偏东造成的。模拟安徽和江西交界处的雨量中心实况没有出现,但江西中部两个次雨量中心在模拟图上有较好反映,而且范围和强度也比较接近。模拟预报图中右下角的强降雨中心由于缺少海上实况雨量资料,预报准确性难以检验。

对比 Rananim 和 Haima 降水模拟图和实况图可以发现, Rananim 雨量中心位置及雨量分布都与实况大致接近,最大降水中心位置都位于登陆点的北侧,南北雨量呈不对称分布,但中心强度存在一定偏差,模拟得到的雨量中心值为实况值的 $2/3$ 左右,两者相差约 100mm。Haima 雨量南北非对称分布的特点较 Rananim 更为显著,降水几乎完全集

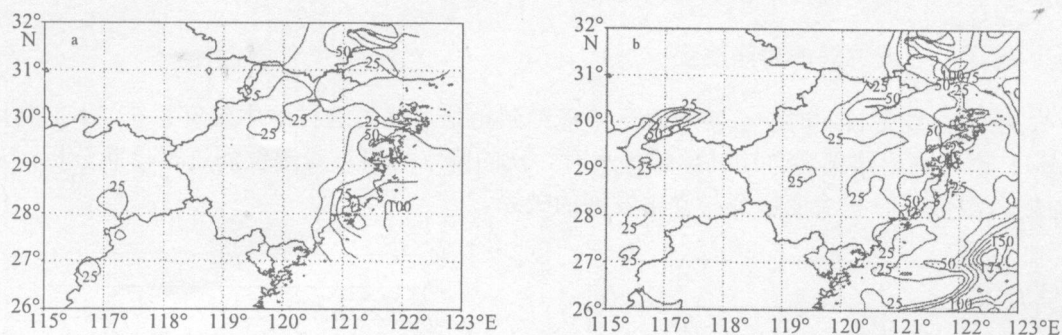


图 2 7 月 2 日 20 时~4 日 08 时降水模拟值与实况值对比

(a. 实况, b. 细网格模拟, 间隔 25mm)

中在北侧, 由于模拟登陆点较实况偏南, 其雨量中心也较实况偏南约 0.5 个纬距, 但中心值比较接近, 模拟和实况都约为 150mm 左右。有意思的是 Ranim 模拟降水分布中, β 中尺度雨团的特征非常明显, 雨区中存在多个尺度在 100~200km 之间的强降水中心, 显示出台风降水的螺旋状结构, 而实况由于地面气象站分布不均匀及空间分辨率不高的原因其 β 中尺度特点不如模拟降水分布明显。

通过对模拟移动路径、降水与实况之间的对比表明, MM5 (V3) 对 3 个热带气旋的登陆过程的模拟是成功的, 模拟输出结果可以作为进一步深入分析热带气旋陆地上维持机制和降水成因的基础。

4 暴雨过程的湿位涡诊断分析

在考虑降水特别是暴雨生成机制必须考虑水汽的作用, 为克服干位涡的局限性, 从而引入湿位涡 (MPV)。在 p 坐标系中, 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, 湿位涡的守恒方程简化为:

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y}$$

$$\text{其中: } MPV1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p},$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y}$$

$MPV1$ 为湿位涡的垂直分量, 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, 其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量和相当位温的垂直梯度的乘积。因为绝对涡度是正值, 当大气对流不稳定时, $MPV1 < 0$, 若大气为对流稳定时, $MPV1 > 0$ 。 $MPV2$ 是湿位涡的水平分量, 它的数值由风的垂直切变和相当位温的水平梯度决定, 表征大气的湿斜压性。湿位涡的单位是: PVU ($1PVU = 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$)。

4.1 暴雨中心湿位涡的时间演变

由于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,本文利用 MM5 模式输出结果和自动气象站每小时一次的降水资料,对湿位涡进行诊断分析,从而揭示湿位涡时间演变特征与暴雨发展的关系。

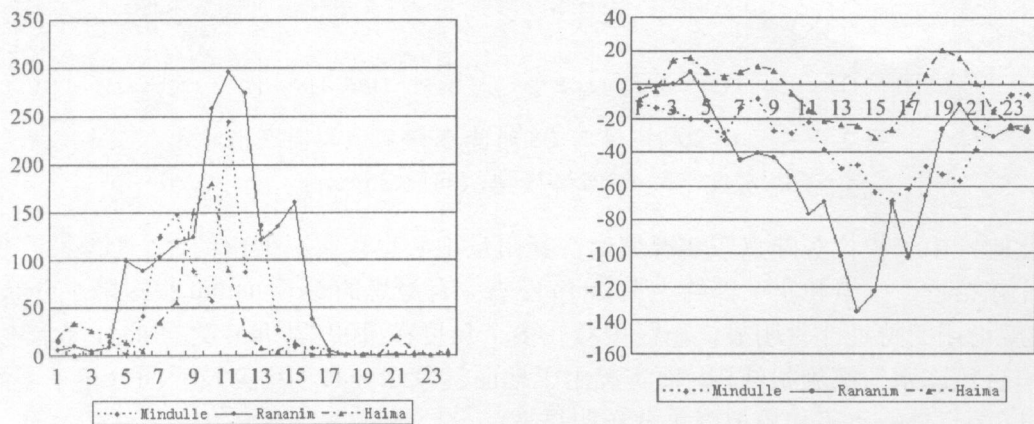


图3 暴雨中心 1h 降水与对流层低层湿位涡的时间演变

(左图为雨量, 单位: 0.1mm; 右图为湿位涡, 单位: 0.01PVU, 时间轴为浙江降水较明显时段, 共 24h)

图3分别给出了热带气旋影响下24h雨量中心每1h降水强度与雨区对应的对流层低层湿位涡的时间演变,湿位涡所取的层次因3个热带气旋强度不同而有所差别,Mindulle取750hPa,Rananim取700hPa,Haima取800hPa。从图3中可以清楚看出3次暴雨过程自动气象站1h降水量的分布是个波状形式,存在一个波峰,暴雨中心对流层低层湿位涡在整个暴雨时段基本为负值,其分布也呈波状形式,存在一个波谷。但由于3场暴雨受不同强度的热带气旋强度影响,降水强度与湿位涡大小有所不同,总体上它们与登陆热带气旋的强度成正比,Haima登陆时强度最弱,在暴雨过程中湿位涡 >0 的时间多于其他两个热带气旋。

从暴雨中心降水强度与低层湿位涡的对应关系来看,其基本特征为:当湿位涡负值的绝对值随时间增大时,降水强度迅速增大,而当湿位涡负值的绝对值随时间减小时,降水强度显著减小,表明湿位涡负值绝对值的时间变化与降水强度呈正相关关系。拿Rananim来说,它是三场暴雨中最强的一次暴雨过程,12日21时以前,湿位涡的绝对值随着暴雨的增强而增大,特别是在台风登陆前后1h呈爆发性增长,12日19时为-0.55PVU,12日21时已达-1.51PVU,绝对值达到最大,此后暴雨中心降水强度逐渐减弱,而湿位涡负值的绝对值也开始减小。这一现象说明对流不稳定是造成暴雨的重要原因,湿位涡绝对值的时间变化与降水强度较好的对应关系表明,湿位涡对未来降水强度的预报具有重要的指导意义。

4.2 等压面上湿位涡的分布

图 4 给出了热带气旋登陆时等压面上湿位涡和降水分布,等压面层次取法与前面一致, Mindulle、Rananim 和 Haima 分别取 750、700 和 800hPa,为清晰起见,图中只给出了湿位涡负值。从图 4 可以看出,3 次暴雨过程都发生在对流层中低层湿位涡负值区内,热带气旋登陆时 750、700 和 800hPa 浙江及其附近地区都为湿位涡负值区控制, $MPV < 0$ 的区域,上升运动会在一定时间尺度内得以维持,持续一定强度的上升运动为暴雨提供了有利的动力条件,使得大气层结处于对流性不稳定状态。负值中心位置伴随热带气旋西移(北移)而向西(向北)移动,并且其绝对值的大小随热带气旋强度的减弱而减小。

从热带气旋登陆时湿位涡水平分布与降水落区看,暴雨的落区与湿位涡的负值中心对应的相当好,暴雨区都是在湿位涡负值中心附近略偏西北方向的地区,湿位涡沿热带气旋登陆点的非对称分布也与降水的非对称分布相对应,以 Rananim 为例,12 日 20 时,

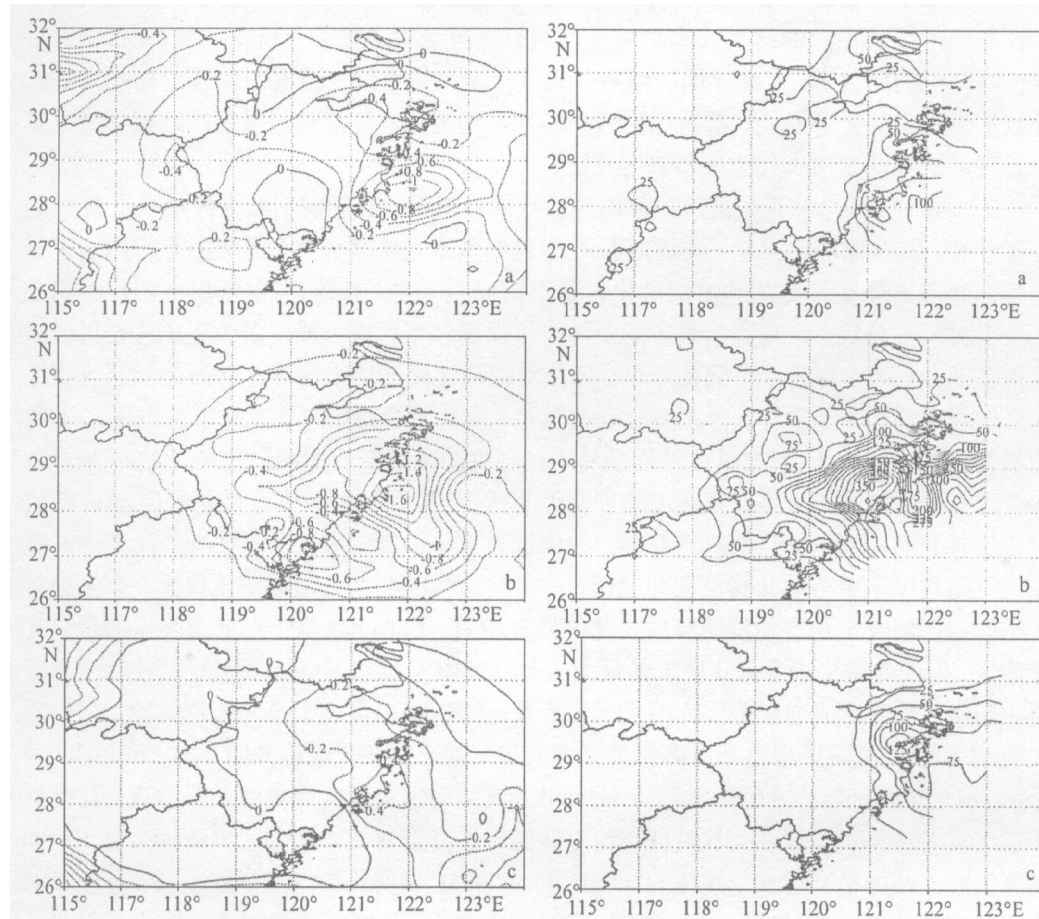


图 4 热带气旋登陆时等压面上湿位涡和过程雨量分布

a. Mindulle, b. Rananim, c. Haima 左图为湿位涡, 间隔 0.2PVU, 右图为过程雨量, 间隔 25mm)

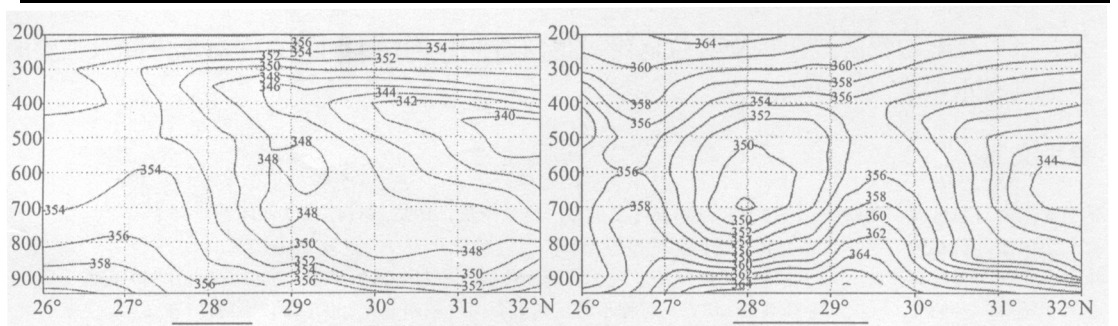
在台风登陆点的东北侧有一个中心强度为-1.5PVU 的负值中心,与过程暴雨中心相吻合,台风登陆点南侧湿位涡绝对值明显小于北侧,正好对应于南侧降水小于北侧。Haima 降水过程的湿位涡分布也与 Rananim 类似,但在其登陆点南侧湿位涡为正值区,南北两侧非对称性更加显著,这与降水几乎全部出现在北侧的结果相吻合。由于缺乏海上雨量资料, Mindulle 登陆时湿位涡分布和降水分布的关系难以分析。另一方面,虽然与过程暴雨中心相对应的湿位涡负值中心都位于对流层低层,但由于热带气旋强度的不同,与暴雨中心相对应的湿位涡层次存在一些差别, Rananim 由于强度最强对应的层次最高(在 700hPa),而 Haima 由于强度最弱对应最低的层次,这是因为强度较强的热带气旋有利于对流向更高的层次发展。

4.3 经向剖面上的相当位温分布

因为低层湿位涡负值中心通常是上升运动的激发区,为了进一步说明湿位涡负值中心在暴雨落区确定中的意义,本文对湿位涡的空间结构进行了分析。文献[1]指出,在湿位涡守恒的制约下,由于 θ_e 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涡度发展。

图 5 给出了 3 个热带气旋产生暴雨最强时刻沿暴雨中心经向剖面上的相当位温 θ_e 的垂直分布,其共同的特点是:在近地面 θ_e 等值线基本呈水平分布,等熵面与等压面近似平行,暴雨出现在 θ_e 陡峭和密集区中,暴雨区 θ_e 等值线在对流层中低层上凸,表明大气处于对流不稳定,这是因为当等熵面与等压面近似平行时,湿位涡的正压项是湿位涡的主要部分,为了保持湿位涡的守恒,低层对流稳定度的减小会导致对流层低层气旋性涡度的显著增长,非常有利于上升运动的发展,有利于暴雨的产生,暴雨就出现在 θ_e 线陡峭密集区内。由于 3 次暴雨过程是受不同强度的热带气旋影响产生的,故 θ_e 倾斜方向、密集程度以及对流不稳定区的伸展高度有所不同。Mindulle θ_e 线倾斜方向及 θ_e 低值中心位置表明,7 月 2 日 20 时风暴中心北侧已有系统性的深厚冷空气影响,而南侧的暖湿气流随着风暴中心的北移而向北输送,在冷暖空气的交汇处形成斜压锋区,产生湿斜压不稳定,触发不稳定能量的释放,使得暴雨增幅。Rananim 由于有低空强盛的暖湿气流输送, θ_e 线的密集程度为 3 个风暴最大,且其倾斜方向与 Mindulle 正好相反,随高度向北倾斜,表明造成浙江范围内的 Rananim 暴雨过程是由台风本身环流造成的。分析图 5c 发现 Haima 暴雨过程也是由南侧暖湿气流和北侧冷空气交汇造成的,与 Mindulle 和 Rananim 的 θ_e 线向某一方面倾斜不同, Haima 的 θ_e 陡峭密集区内等值线几乎垂直,其北侧冷空气较 Mindulle 为浅薄。从对流不稳定区的伸展高度看, Mindulle、Rananim 和 Haima θ_e 等值线上凸的最高层次依次为 600、450 和 800hPa,表明热带气旋强度越强,湿空气对流活动能到达的高度越高。由此看来,暴雨强度与 θ_e 等值线的密集程度、对流不稳定区的伸展高度密切相关。

上面分析 3 个热带气旋不同的降水机制,接下来再利用 θ_e 垂直剖面图对 Rananim 和



Haima降水沿登陆点呈明显的非对称分布的现象作一探讨。分析表明虽然 Rananim 和 Haima 降水都具有特点,但产生这种现象的原因有所不同。由图 5b 可以看到,Rananim 登陆点南北两侧的对流不稳定区($\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$)的伸展高度存在显著差异,北侧 450hPa 以下的 θ_e 等值线上凸,暖湿不稳定空气伸展高度较高,更有利于不稳定能量的储存和释放,有利于对流云向更高发展。而南侧对流不稳定区较低,等 θ_e 线在 600hPa 就出现明显的下凹,通过分析可以认为这是南侧降水不如北侧的原因。而 Haima 登陆点南北两侧对流不稳定区的伸展高度几乎相当,恰恰是弱冷空气的侵入在北侧雨量异常增量中起主要作用。

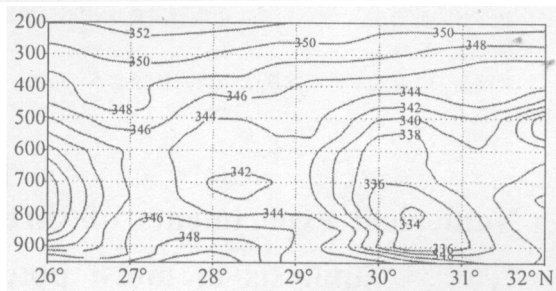


图 5 沿暴雨中心经向剖面上的 θ_e 分布

(单位: K, a. Mindulle, 7月2日20时; b. Rananim, 8月12日20时; c. Haima, 9月13日06时, 图中下横线为暴雨区跨度)

5 小结

本文利用 MM5 数值模式对 3 个热带气旋的登陆过程进行了 48h 数值模拟,并从热带气旋移动路径、降水强度和暴雨分布两个方面与实况进行了比较验证,结果表明,MM5 模式对热带气旋的模拟是比较成功的,这为以后开展台风天气预报提供了参考。

在模拟效果较好的基础上,利用高时空分辨率的模式输出对台风暴雨过程的湿位涡进行了诊断分析,得到并发现:三场台风暴雨的对流层中低层都为对流不稳定区,暴雨区附近 θ_e 面陡立密集, θ_e 面陡立密集区附近易导致湿斜压涡度发展,有利于降水加剧。但从 θ_e 倾斜方向看,三场台风暴雨的形成机制有所不同,Rananim 暴雨过程是由台风自身环流造成的,而在 Mindulle 和 Haima 降水中,北方冷空气的渗入发挥了重要作用。

从暴雨落区看,对流层中低层湿位涡负值区与其有较好的对应关系,暴雨中心位于湿位涡负值中心附近的略偏西北方向。由于登陆热带气旋的强度各不相同,使得与暴雨区对应的湿位涡层次以及对流不稳定区的伸展高度存在一些差异,热带气旋强度越强,对应的层次就高一些,相反强度越弱,对应的层次就低一些。

从降水强度看,湿位涡负值中心数值的绝对值随时间的变化量与 1h 降水存在正相

关关系,暴雨增幅阶段出现在湿位涡绝对值随时间急剧增大时期,它对未来降水强度的预报具有重要意义。

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. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展[J]. 大气科学, 1997, 21(3):273~281.
- [3] 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.
- [4] 李耀辉,寿绍文. 一次江淮暴雨的MPV及对称不稳定研究[J]. 气象科学, 2000, 20(2):171~178.
- [5] 赵宇,吴增茂,刘诗军,等. 由变性台风环流引发的山东特大暴雨天气的位涡场分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(1):33~43.
- [6] 刘英金. 中国气象事业发展战略研究辅导读本. 北京:气象出版社, 2005, 20.

Numerical experiments of three landfall tropical cyclons and analysis of moist potential vorticity during their heavy rain processes

XUE Gen-yuan¹, ZHANG Jian-hai², CHEN Hong-mei²

(1 Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310002, China; 2 Meteorological Bureau of Shaoxing city, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Numerical experiments were conducted on three landfall tropical cyclones (TCs) by use of PSU/NCAR nonhydrostatic mesoscale model (MM5). Verified against observations, the tracks and detailed mesoscale precipitation distributions were well reproduced. Using simulated information, the moist potential vorticity (MPV) was analyzed. The results show that there was marked distinction in the heavy rain cause of three TCs. The strong precipitation of Rananim was affected by typhoon itself and as to the others, the spreading into of cold air played an important role. The rainstorm occurred in the stiff and dense section of moist isentropes, the corresponding relation between the negative center of MPV and heavy rain area was better, and the absolute value variation of MPV had positive correlation to the intensity of one hour precipitation. It provided more valuable information for short range weather forecasting, the typhoon torrential rain especially.

Key words: landfall tropical cyclone; numerical simulation; heavy rain; MPV