

0505 号台风的数值模拟和中尺度结构分析

朱 健^{1, 2}, 张建海², 陈红梅²

(1. 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871; 2. 绍兴市气象局, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 采用 MM5 中尺度数值模式, 以 NCEP 再分析资料作为初始场和侧边界, 对 0505 号台风“海棠”登陆过程进行数值模拟, 结果表明模式能很好的模拟出台风路径和暴雨落区, 并利用模式输出的高分辨率结果对台风“海棠”的中尺度结构演变特征进行了初步分析。

关键词: 台风; MM5; 中尺度结构; 暴雨; 数值模拟

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2007) 1 - 0081 - 09

1 引言

2005 年 7 月 18 ~ 21 日, 受 0505 号台风“海棠”影响, 浙江和福建北部出现了大范围的暴雨和特大暴雨天气过程。台风“海棠”在关岛东北洋面上生成后向偏西方向移动, 台风在台湾登陆后穿过台湾岛向西北方向移动, 于 19 日 17 时 10 分在福建省连江县黄岐镇再次登陆, 登陆时近中心最大风力达 12 级, 随后台风继续向西北方向移动, 并逐渐减弱。近年来中尺度数值模式 MM5 被广泛应用于台风降水和路径的数值研究, 并取得了很好的效果, 但是由于台风中尺度结构的复杂性, 对其动力不对称结构、热力性质演变等还可以作进一步研究。江敦春等^[1]用 MM4 数值模式对几个台风进行了数值模拟, 模拟雨量与实况基本一致。袁金南^[2]等对 1992 年两个台风进行了数值模拟, 认为台风的非对称结构跟台风异常路径有一定联系。王鹏云^[3]等对一次台风进行了中尺度结构的数值研究, 结果表明 MM5 模式能够很好的模拟出台风的动力不对称性结构。Reeder^[4]等认为研究台风结构特征必需要高分辨率资料, 因此本文中采用 MM5 中尺度数值模式, 以 NCEP 再分析资料作为初始场和侧边界, 对 0505 号台风登陆过程进行数值模拟, 并利用模式输出的高时空分辨率结果对台风的中尺度结构进行了初步分析。

2 资料和模拟方案

本文采用的中尺度数值模式是基于 MM5 V3.6 版本, 选择非静力方案, 中心位置取为 120.63°E, 30°N, 使用两重嵌套网格, 外域水平网格为 121×121 个格点, 格距为 45km, 内域水平网格为 121×121 个格点, 格距为 15km, 垂直分层为 23 层, 模式顶为 100hPa, 时间步长为 90s。侧边界条件采用时变松弛边界条件, 行星边界层参数类型为 MRF 行星

边界层模式, 积云对流参数为 BM 方案。

模式使用的资料为 NCEP 的 6h 一次再分析资料, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 初始时间选为 7 月 18 日 20 时, 积分 72h, 每 3h 输出一次模拟结果。

3 数值模拟结果

3.1 台风路径模拟

从图 1 上看模拟的台风路径与实况基本接近, 但是模拟的登陆地点比实况略偏北, 登陆时的中心气压也比实况偏低。台风登陆前在台湾海峡从偏西行转为北行以及登陆后从北行转为偏西行的趋势与实况是一致的。

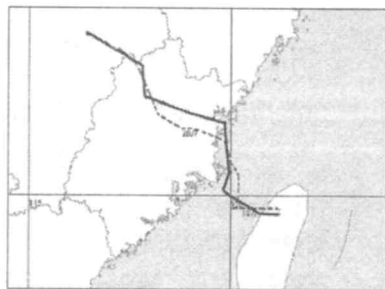


图 1 实况与模拟的台风路径
(实线: 模拟、虚线: 实况)

3.2 500hPa 高度场

图 2a、b 分别是模式积分 24h 以后输出的 500hPa 高度场和同时次的 NCEP 再分析资料 500hPa 高度场。对比发现, 位于福建沿海的低压位置与实况吻合, 模拟的低压中心值比 NCEP 再分析资料略偏低, 模式模拟的 500hPa 高度场与 NCEP 再分析资料基本一致。经过模式模拟后, 在台湾地区等值线出现细微扭曲, 这是台湾岛上山脉地形因素加入到模式中引起的。

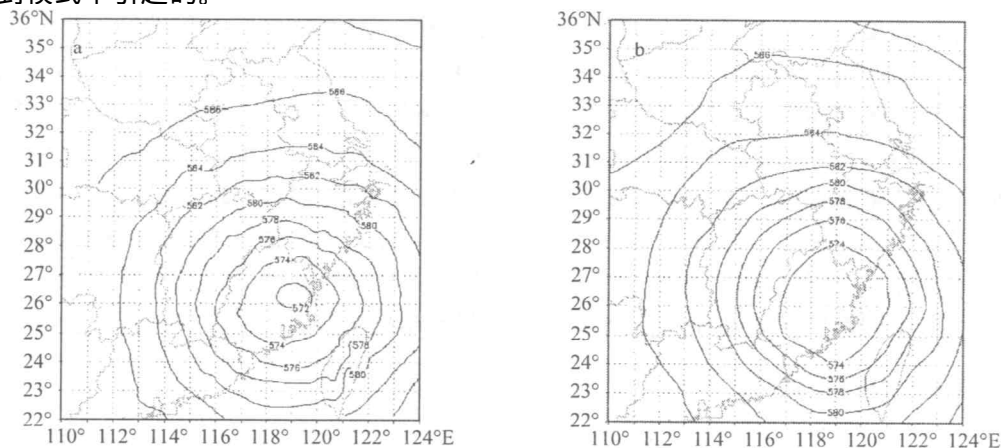


图 2 19 日 20 时 500hPa 高度场

a. 模式输出、b. NCEP 再分析资料

3.3 地面降水

图 3a、b 分别是模式模拟的 20 日 08 时 24h 雨量和实况雨量。对比发现, 模式对乐清和三门两个降水中心模拟得非常好, 模拟和实况在这两个站附近的降水量都是大值中心, 但是模拟的降水极值比实况偏小。另外在安吉站有一个区域的降水量中心, 模式也

非常准确地模拟出来。在降水量较小的衢州、杭州、绍兴、金华等地模式模拟的降水量则与实况接近。

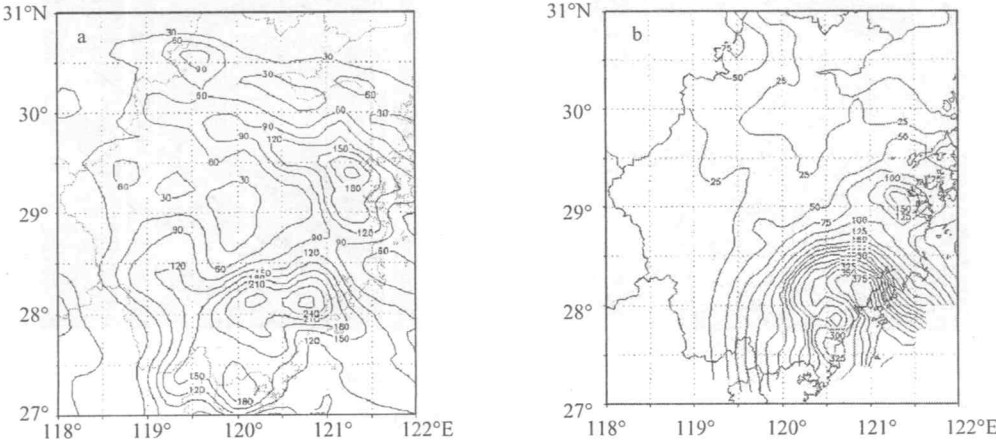


图 3 20 日 08 时 24h 雨量 (单位: mm)
a. 模拟输出 b. 实况雨量

再来看模式积分 48h 后对降水的模拟(见图 4a、b),从实况雨量图上看,除了在浙江东部沿海仍然有较强的降水外,从浙江北部到安徽中南部一线出现一个雨带,在 20 日 20 时的 FY2C 卫星云图(见图 5b)上可以看出这个地区正好处在台风的螺旋雨带中,并且这个螺旋雨带在几个小时内仍然维持,这是台风登陆后在台湾东部激发的低压云团产生的,是造成降水的主要原因。模式同样模拟出了这个雨带,但是在浙江北部雨量模拟偏大,安徽南部雨量模拟偏小,并且实况位于江西中部的一块降水落区模拟结果也偏小偏东。模式基本能模拟出暴雨落区,并对台风雨带的走向把握得比较好。

由此可见,模式对强降水中心的位置模拟得很好,但降水极值偏小。模式对降水量中等的地区模拟与实况比较接近,降水区范围略偏大,另外模式还模拟出了台风雨带的走向,总的来说模式对降水的模拟是成功的。

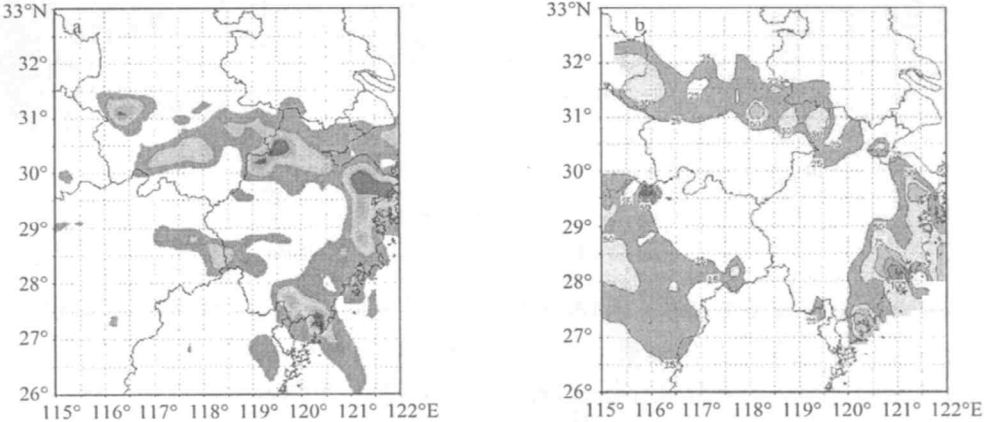


图 4 21 日 08 时 24h 雨量 (单位: mm)
a. 模拟输出、b. 实况雨量

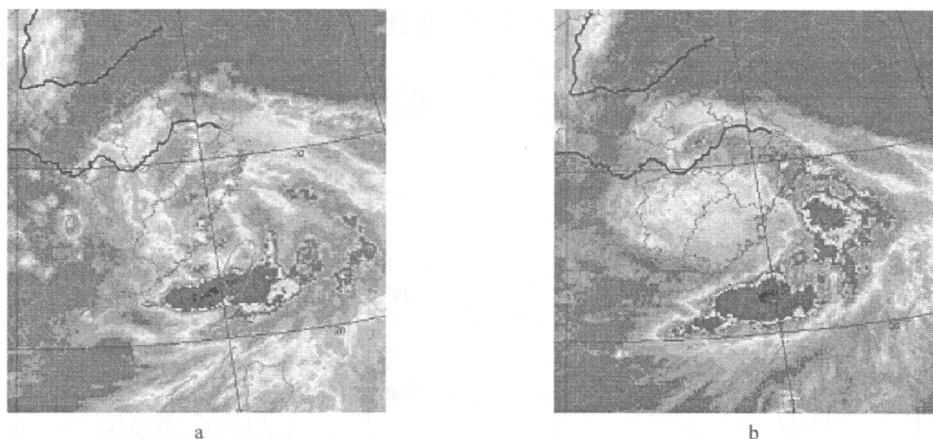


图 5 20 时 FY2C 卫星云图

a. 19 日 20 时、b. 20 日 20 时

4 台风的中尺度结构

4.1 流场特征

图 6 分别是台风登陆时 850hPa、500hPa、200hPa 三个等压面上的流场图，从图上可以看出，从低层一直到 200hPa 高层都存在气旋式结构，所不同的是低层呈气旋式流入，中层辐合辐散不明显，而高层呈气旋式流出。这说明台风低层是辐合的，高层是辐散的。

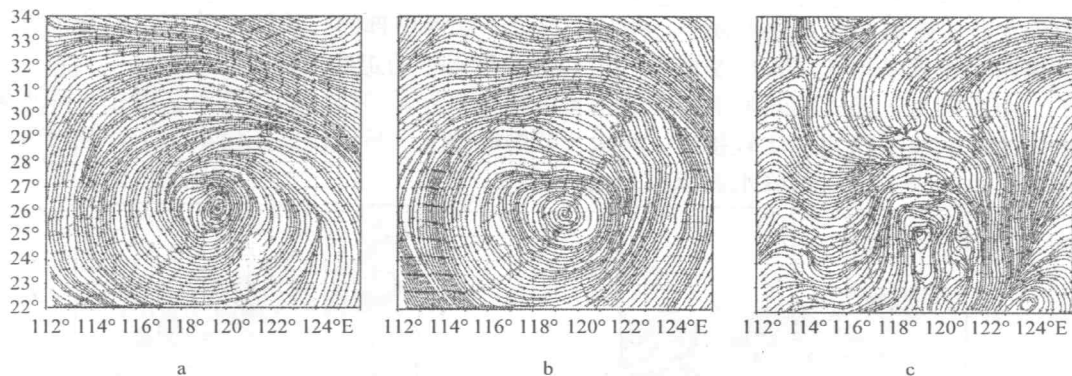


图 6 19 日 17 时流场图

a. 850hPa、b. 500hPa、c. 200hPa

图 7 分别是台风登陆时刻 850hPa 和 500hPa 等压面上以风矢量表示的风场图，可以看出台风中心东北象限的风速最大，西南象限的风速最小，呈非对称分布，陈联寿^[5]进行数值试验表明，这种台风往往有偏西运动的特征，王鹏云^[3]也证实了这一点，这与本次台风登陆后向偏西方向运动的特征较为一致。

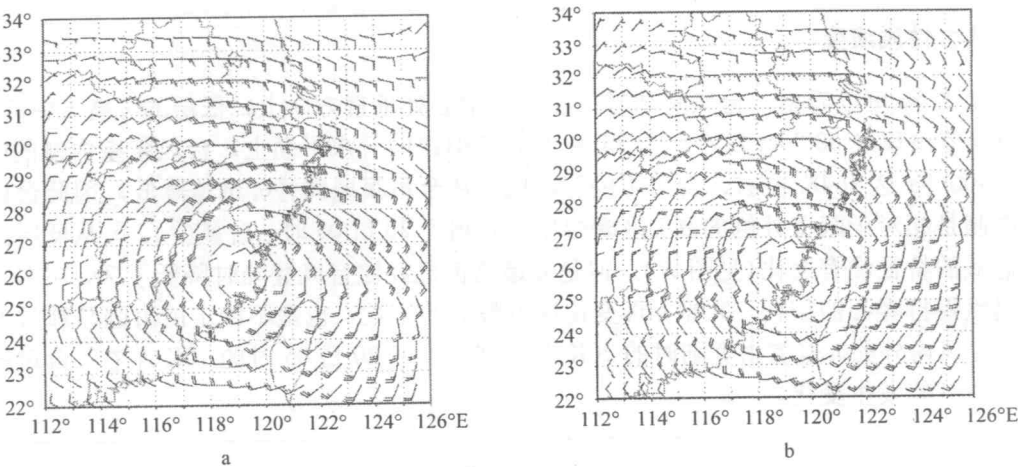


图 7 19 日 17 时风场图
a. 850hPa、b. 500hPa

4.2 垂直运动演变

为了研究台风云系中的垂直运动,利用模式输出的高分辨率结果,制作垂直速度剖面图。在台风登陆时刻,台风眼附近为弱的下沉气流,而台风周围云系中从地面到 300hPa 高度都存在着强烈的上升运动(见图 8a),且台风北边气流上升速度比南边强,范围也较南边大,最大上升速度出现在 500hPa ~ 700hPa 之间。到了 20 日 05 时,台风眼已经移动到福建中部,强度减弱,从图 8b 上看上升运动仅延伸到 500hPa 左右,强度也大大减弱,并且东边的上升运动要比西边强。可见台风云系中的垂直运动也是呈不对称分布的,这是台风在其东侧激发出低压系统的动力机制,配合来自热带的充沛水汽,是造成浙东南持续强降水的重要原因。

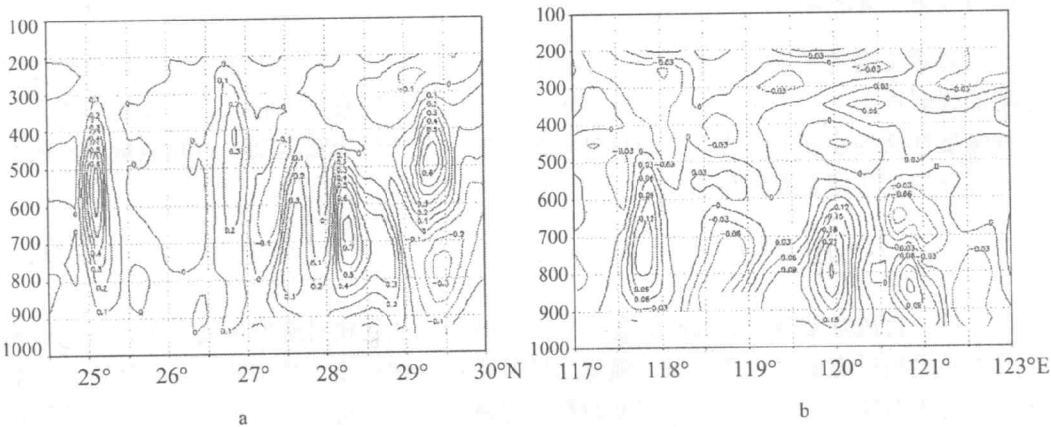


图 8 垂直速度剖面图 (单位: m/s)
a. 19 日 17 时沿 120°E、b. 20 日 05 时沿 27°N

4.3 热力性质演变

由图 9a 可以看出, 台风登陆时, 在台风中心处垂直方向上, 低层的 θ_e 高于中高层, θ_e 最低值出现在 500hPa 左右, 为 352K 左右。但在同一水平面上, 台风眼壁内侧的 θ_e 最高, 900hPa 达 364K 左右, 台风眼的 θ_e 略低, 从台风眼壁向外 θ_e 迅速降低, 因此台风眼壁内侧是相对于眼壁外侧的高 θ_e 区暖湿中心。到了 20 日 05 时, 台风中心 θ_e 从低层向高层递减的特征没有变化(见图 9b), 但是 θ_e 最高值已经比台风登陆时降低了 7K 左右。台风仍然保持暖心的结构, 眼壁是 θ_e 变化梯度最大的区域, 也是不稳定能力强烈释放的区域, 台风内外的 θ_e 差值由登陆时的 20K 左右减小到了 20 日 05 时的 10K 左右, 台风的热力性质开始发生变化。

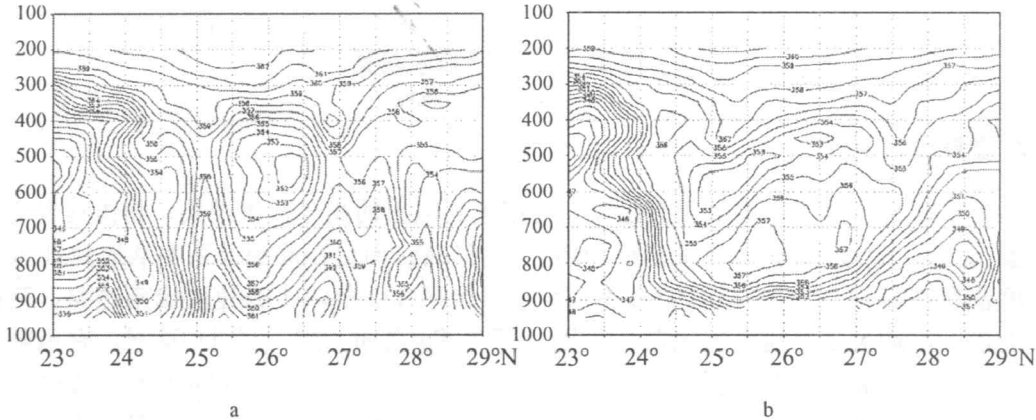


图 9 θ_e 垂直剖面图 (单位: K)

a. 19 日 17 时沿 120°E、b. 20 日 05 时沿 118°E

4.4 相对螺旋度演变

相对螺旋度定义为风速和涡度点积的体积分(1 式), 它反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度^[6-7]。台风是一种具有较强螺旋性的天气系统, 它的发生发展本质上是一种螺旋性结构建立的过程, 当螺旋性达最大时, 系统呈无辐运动, 因此能量消耗被抑制, 台风的生命期也得到延长。

$$H = \iiint_V \vec{v} \cdot \nabla \wedge \vec{v} d\tau \tag{1}$$

分析了台风登陆前、登陆时、登陆后三个时刻的低层相对螺旋度场发现, 台风云系对应着低层相对螺旋度正值区域, 强降水则发生在正螺旋度大值中心附近。随着台风登陆后强度逐渐减弱, 低层相对螺旋度的数值也越来越小。同时低层相对螺旋度正值区对应高层相对螺旋度负值区, 这种配置有利于螺旋结构的维持^[8-9], 是触发暴雨的动力机制(见图 10)。

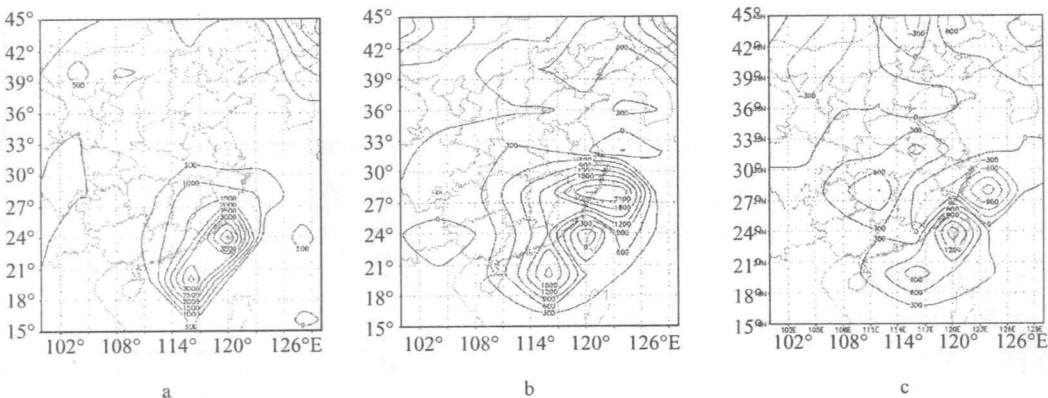


图 10 低层相对螺旋度 (单位: $10^{-1}\text{m}^2/\text{s}^2$)
a. 18 日 20 时、b. 19 日 20 时、c. 20 日 20 时

4.5 云水和雨水粒子混合比

台风的云系结构复杂，一个成熟的台风在无云的台风眼外有一个涡旋云区，再往外数百公里为螺旋云区，其中有数条由许多对流云团组成的螺旋状云带^[10]。图 11a 是模式模拟台风登陆后不久的 550hPa 云水混合比(由于 550hPa 高度云水混合比达最大值,所以这里选用 550hPa 上的云水混合比)，云水是云系中的液态水粒子，借助模式输出的高分辨率云水混合比图像可以清楚地看出台风眼的无云区和台风外围的螺旋云带。图 11b 是同一时刻沿 28°N 云水混合比的垂直剖面图，由图可见 119°E 附近为无云的台风眼，向东西两边伸展的是深厚的台风云系，由于云水较轻，所以大值中心位于 550hPa 附近，云系向上伸展到 400hPa 附近（再向上则为温度较低的固态冰水和雪水粒子^[10]，图略），向下伸展到 900hPa 附近，而能够降落到地面的雨水粒子因为较重、温度较高，主要分布在 700hPa 以下的层次内(见图 12)。

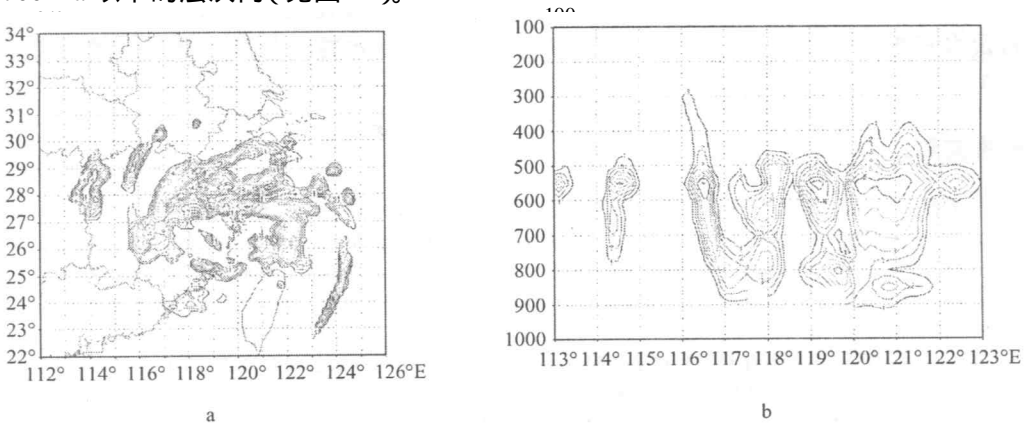


图 11 19 日 20 时模拟云水混合比 (单位: 10g/kg)
a. 500hPa 水平分布、b. 沿 28°N 垂直分布

由图 12 可以看出,台风眼附近基本没有雨水粒子,雨水粒子主要分布在台风周围的螺旋云带中,且位于海上的东半边明显多于位于陆上的西半边,台风的水汽含量呈不对称分布,从卫星云图(见图 5b)上可以发现,水汽充沛的区域正好对应台风在台湾东侧激发出的热带低压,这个低压云系随着台风的旋转向西北运动,扫过浙东南、浙北、安徽南部一线,在沿途造成大量降水。

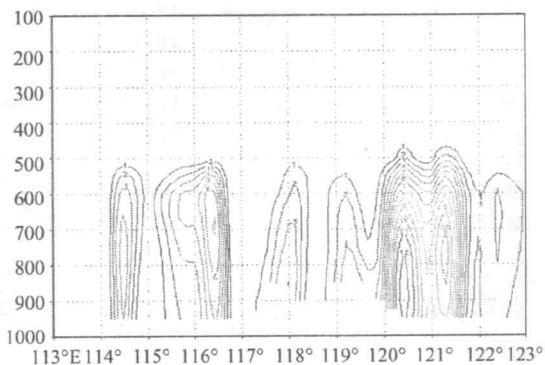


图 12 19 日 20 时模拟雨水粒子混合比
垂直剖面图 (单位: 10g/kg)

5 结论

(1) MM5 中尺度数值模式能很好的模拟出台风影响时的高度场特征,模拟的台风路径与实况基本一致。模式能模拟出强降水中心的位置,但降水极值偏小,对降水量中等的地区模拟与实况较接近,降水区范围略偏大,并且能模拟出台风螺旋雨带的走向。

(2) 台风低层流场呈气旋式流入,高层呈气旋式流出。台风登陆后的偏西行路线与其水平非对称分布的风场特征有关。台风登陆后上升运动明显减弱,台风云系中的上升运动呈东北强、西南弱的非对称形态与其东侧激发出的低压云团密切相关。

(3) 台风具有暖湿的中心,但是台风的不稳定能量在低层眼壁内侧最为集中,而不是在台风中心。台风登陆后不稳定能量在眼壁处强烈释放。

(4) 台风云系对应相对螺旋度正值区域,强降水发生在正螺旋度大值中心附近。高低空正负相对螺旋度配置有利于螺旋结构的维持,是触发暴雨的动力机制。

(5) 模式输出的云水混合比图像揭示出台风周围存在的螺旋云带,台风螺旋云带中的云水和雨水也呈非对称分布,集中在台风东侧的雨水粒子与浙东南持续的强降水密切相关。

参考文献:

- [1] 江敦春, 党人庆, 朱志宏. 台风暴雨中尺度系统与结构的数值研究[J]. 热带气象学报, 1997,13 (2):168 ~ 172.
- [2] 袁金南, 王国民. 关于台风非对称结构与台风路径的数值分析[J]. 热带气象学报, 1997,13 (3):208 ~ 216.
- [3] 王鹏云, 刘春涛. 1996 年第 8 号台风中尺度结构的数值研[J] 究. 气象学报, 1996,56 (3):296 ~ 311.
- [4] Reeder M J, Smith R K, Load S J. The detection of flow asymmetries in the tropical cyclone motion. J. Atmos. Sci., 1989,46 :975 ~ 990.
- [5] 陈联寿, 罗哲贤. 非对称结构与台风移动的若干联系. 台风科学业务试验和天气动力学理论的研究(第二分册) [M]. 北京:气象出版社, 1996,371 ~ 374.
- [6] Lilly DK. The structure and propotation of rotation convective storm. Part2: Helicity and storm [J]. J AtmosSci, 1986,43 (2):126 ~ 140.
- [7] 陈 华, 谈哲敏. 热带气旋的螺旋度特性[J]. 热带气象学报, 1999,15 (1):83 ~ 85.
- [8] 郑传新. 0103 号和 0104 号台风暴雨过程的螺旋度和位涡分析[J]. 广西气象, 2002,23 (2):6 ~ 8.
- [9] 吴启树, 沈桐立, 沈新勇. “碧利斯”台风暴雨物理量场诊断分析[J]. 海洋预报, 2005,22 (2):59 ~ 66.

- [10] 朱佩君, 陈 敏, 陶祖钰,等. 台风云系的数值模拟 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002,38(3):358 ~ 363.
- [11] 张金善, 钟 中, 黄 瑾. 中尺度大气模式 MM5 简介 [J]. 海洋预报, 2005,22(1):31 ~ 41.
- [12] 钟 中, 张金善, 黄 瑾. MM5 模式在热带气旋模拟中的应用 [J]. 海洋预报, 2004,21 (4):10 ~ 15.
- [13] 凌铁军, 张蕴斐, 杨学联. 中尺度数值预报模式(MM5) 在海面风场预报中的应用 [J]. 海洋预报, 2004,21 (4):1 ~ 9.
- [14] 林云萍. “莫拉克”强热带风暴暴雨分析 [J]. 海洋预报, 2005,22(2):54 ~ 58.

Numerical simulation and MESO-Scale analysis of typhoon haitang

ZHU Jian^{1, 2}, ZHANG Jian-hai², CHEN Hong-mei²

(1. Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871 China ; 2. Shaoxing Meteorological Office, Zhejiang Shaoxing 312000 China)

Abstract :The MM5 meso-scale numerical model is used to simulate the progress of Haitang's landing. The NCEP reanalysis data is used as the original field and the side value in this simulation. The result shows that this model is able to simulate the typhoon path and rainstorm very well. Then, the high-precision output data of simulation is used to analyse the evolvement of typhoon's meso-scale.

Keywords :typhoon ; MM5 ; meso-scale ; rainstorm ; numerical simulation