

文章编号:1004-9045(2007)02-0103-06

台风“云娜”的热动力结构模拟试验研究

程 锐^{1,2}, 叶成志³, 许爱华⁴, 尹珊建⁵

(1.中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京 100029; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039;
3.湖南省气象台, 长沙 410007; 4.江西省气象台, 南昌 330046; 5.二炮装备研究院第 5 研究所, 北京 100085)

摘 要:对 2004 年 8 月登陆我国的台风“云娜”的热动力结构及其演变进行了数值模拟。试验从大尺度环境场、台风中尺度动力和热力场三维结构、台风云雨特征等多角度, 对模拟结果与实际观测进行了对比。结果表明, 模式不仅较准确地再现了台风登陆前 24 h 移动和演变的全过程, 在移向、移速和登陆时间、地点上与实况十分接近, 而且对台风系统中尺度结构、云雨特征的模拟与分析场及卫星观测也有较好的一致性。采用的模拟工具是新开发的双重嵌套 AREM 模式, 该模式是静力模式, 但对台风仍有较强的模拟能力。此外, 本试验无任何人为台风模型的嵌入是其中的一个特点, 从而增加了试验的可信度。

关键词:AREM 模式; 台风“云娜”; 数值模拟; 热动力结构

中图分类号:P435 **文献标识码:**A

1 引言

20 世纪八九十年代, 人们开始使用完全三维模式模拟台风非对称结构, 并逐渐走向深入。Liu 和 Zhang 等人对 Andrew 台风进行的一系列研究较具代表性。他们使用 MM5 模式(Meso-scale Model 5)并采用实时 NCEP 资料及 6 km 格距对 Andrew 台风的发展演变、结构特征以及多尺度相互作用进行了合理和准确的模拟, 并在此基础上揭示了该台风的热动力特征和细致结构, 指出只要模式具有精细的网格距、合理的物理过程并能在初始场中正确反映台风涡旋, 那么从热带天气尺度初始条件(海面温度 SST、低层水汽场和流场)出发, 是可以成功模拟台风的^[1,2]。

我国学者在台风结构、强度、运动及其引发的暴雨等研究方面均取得了许多成果^[3-5]。近年来, 利用完全三维模式对台风的模拟研究比较多, 其中 CHAN 等人也使用 MM5 模式对登陆过程中与台风对流结构变化相关的物理过程进行了探讨, 他们发现水汽供应是对流结构变化的决定性因素, 而感热通量似乎影响不大^[6]; 王鹏云等用 MM5 模拟研究了 9608 号台风在登陆前后 36 h 内的路径、中尺度热动力结构以及云和降水物理结构及其变化^[7]; 朱佩君等用 MM5 对 1997 年 11 号台风 Winnie 在登陆后演变为温带气旋的过程进行了 48 h 模拟, 并讨论了该台风在登陆后变性阶段和重新加强阶段的环流、动力和热力结构特征以

及演变过程^[8,9]; 此外, 闫敬华尝试使用“非 Bogus 方案”来进行台风预报, 并取得预期效果^[10]。

上述研究大多采用了非静力模式, 但采用静力模式能刻画台风的哪些特征? 这是本文需要回答的问题。AREM 模式是我国自行设计的, 在地形处理及水汽输送等方面有一定特点, 它根据东亚特殊地理环境和气候特征建立, 在我国和周边一些国家已经被广泛应用, 成为东亚季风区暴雨等灾害性天气模拟和预报的有力工具^[11-19]。但是, 使用该模式进行台风细致结构、热动力特征以及发展演变的模拟研究非常少见。该文将对 AREM 模拟台风的能力进行验证。另外, 台风“云娜”有许多鲜明特征, 如降水强度特强、影响范围广等。对其结构和特征进行深入细致的分析, 对提高台风预报准确率具有重要意义。

2 试验设计

采用 AREM 粗细网格嵌套技术, 分别对台风大尺度背景场和台风风暴尺度场进行模拟。粗(37 km)、细(12 km)网格模拟结果分别用于分析台风的大、中尺度特征。两个模式都以 2004 年 8 月 11 日 1200UTC NCEP 分析资料起报, 无任何人为台风模型的嵌入, 初始时间为登陆前 24 h。物理过程包括对台风发展有显著影响的显式云微物理过程、非局地边界层参数化过程及改进的 Betts 对流参数化等。试验海温取周平均值。具体描述见表 1。

收稿日期: 2007-05-10; 定稿日期: 2007-06-28

基金课题: 国家“973”项目我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究第四课题(课题编号 2004CB418304)

作者简介: 程锐, 男, 1975 年生, 工程师, 在读博士, 主要从事台风模拟和中尺度海气耦合模拟工作。Email: c4rui@mail.iap.ac.cn

表 1 模拟试验设计及模式参数选择

	区域范围	网格点数	水平格距	积分时步	积分时间	初始条件	物理过程
粗网格	纬向: 85°~150°E 经向: 5°~60°N 垂直方向: 地面至 10 hPa	131×221×32	37 km	225 s	2004 年 8 月 11 日 1200UTC 至 12 日 1200UTC	NCEP(1°×1°) 分析资料, 不嵌入人造台风方案	非局地边界层参数化, 显式云微物理过程参数化, 改进的 Betts 对流调整, 周平均海温并保持不变
细网格	纬向: 111°~131°E 经向: 16°~36°N 垂直方向: 地面至 10 hPa	121×241×32	12 km	90 s	2004 年 8 月 11 日 1200UTC 至 12 日 1200UTC	NCEP(1°×1°) 分析资料, 不嵌入人造台风方案	非局地边界层参数化, 显式云微物理过程参数化, 改进的 Betts 对流调整, 周平均海温并保持不变

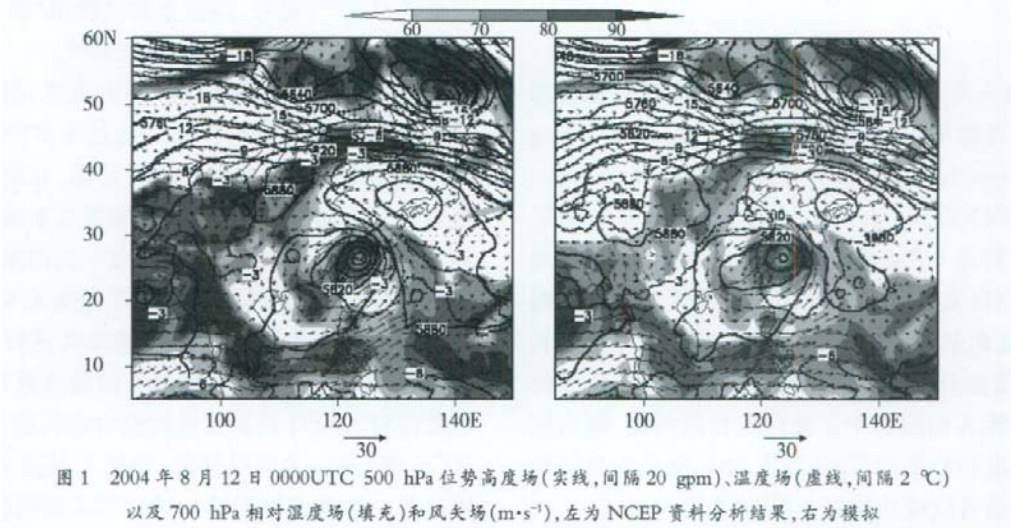
针对试验结果, 将采用台风原始报文、NCEP 分析资料、卫星资料等对模拟的信度进行验证。

3 模式验证

3.1 大尺度天气背景场的模拟

通过比较模拟的位势高度、温度、风场及湿度场与 NCEP 分析场的结构特征可以发现, 模式很好地刻画了

台风发展演变的天气背景特征, 模拟的副热带高压位置和强度、中纬锋面系统位置与强度以及低层流场的分布和结构与分析场十分接近, 模拟的水汽分布和结构与分析场比较接近, 但其强度稍弱(图 1)。正是由于模式对引导气流场和湿度场等台风环境作出了较好的再现, 因此它能对台风的路径及移动速度给出较好的模拟(见 3.3 节)。



3.2 云场的模拟

由 TBB 图像的时间演变可以发现, 积分起始阶段台风眼还不是特别清楚, 在登陆前 8 h(即 2004 年 8 月 12 日 0400UTC), 台风眼变得清晰和明显; 整个登陆过程中都能看到比较明显的螺旋云带和云墙结构, 云墙之中不断有中小尺度对流云团的生消发展, 但其强度分布是不对称的。通过分析 12 km 模式模拟的总云水 $0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等值面的俯视图可以发现, 模拟的云体特征与 TBB 有较好的对应关系(图 2)。模拟和 TBB 图像都反映出台风眼区无回波、对流发展旺盛的云墙以及螺旋云带的组织化分布。另外, 模拟和实况云图都存在云体对流活动强度分布的不对称性质(台风中心之右偏强而之左偏弱)。但是, 模拟的台风眼区偏大, 其原因在 3.4 节讨论。

3.3 台风路径和移动

从实测和模拟的台风路径对比图(图 3a)中可以发现, 模式很好地刻画了台风的移动路径。台风移动过程中, 模拟位置的最大偏移量在 100 km 以内(11 日 2100UTC 至 12 日 1203UTC 与实际路径偏差最大), 而模拟给出的登陆时间、地点, 几乎与实况重合, 因此模式对台风的路径模拟是比较成功的。另外, 从台风移动速度的演变(图 3b)可以看出, 模拟较成功地再现了台风移动速度的强弱变化规律: 台风在登陆前 24 h 内, 共经历了 3 次移动速度的调整期, 其移动呈现比较有规律的时快时慢现象。模拟的移动速率最小约 $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 最大约为 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 都比较接近实况。但速度变化振幅, 模拟大于实况。

3.4 模拟性能和存在的问题

通过上述模拟与分析及观测资料的比较验证, 不难发现: 以 NCEP 分析资料作为初值, 在不考虑引入

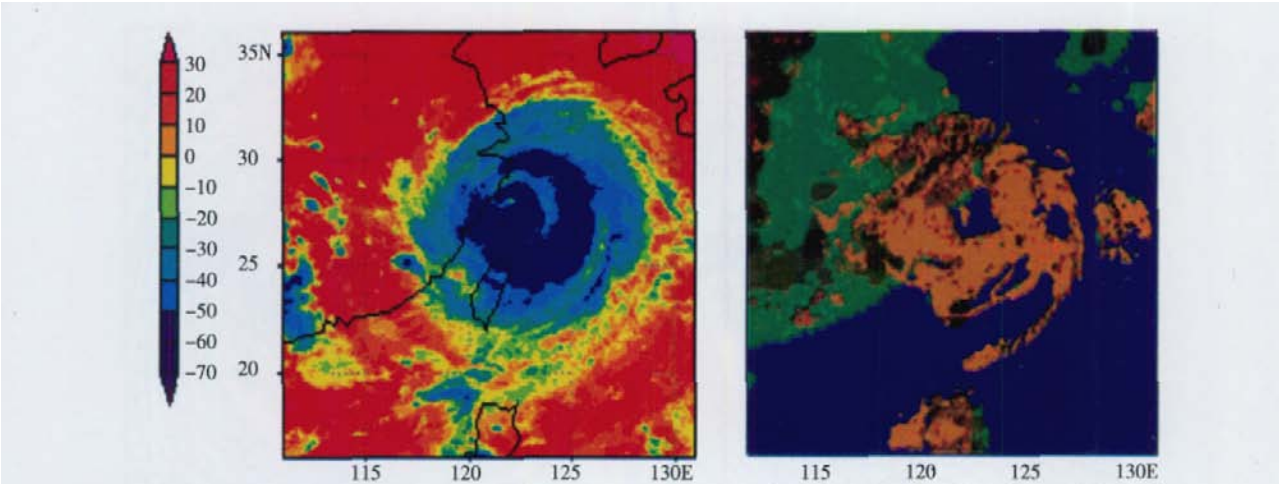


图 2 2004 年 8 月 12 日 0800UTC TBB 分布(左:°C)和模拟的水物质含量为 $0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等物质面三维俯视图(右)

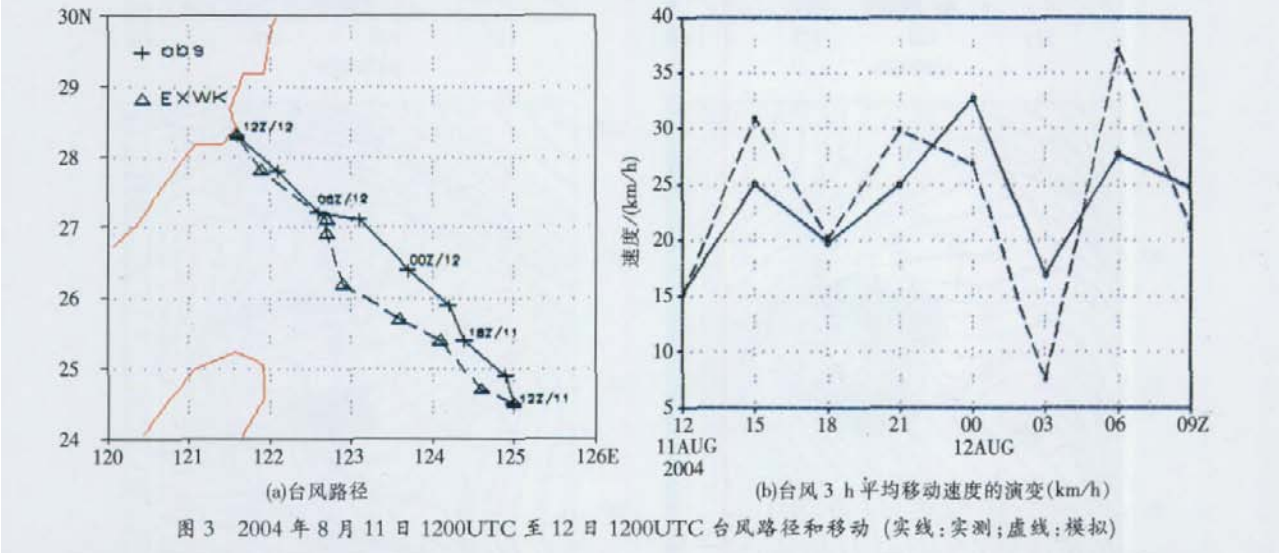


图 3 2004 年 8 月 11 日 1200UTC 至 12 日 1200UTC 台风路径和移动 (实线:实测;虚线:模拟)

Bogus 资料的情况下,AREM 可以较好地刻画台风‘云娜’的热动力特征,其对大尺度天气形势-引导气流的较好模拟,是台风路径和移动准确刻画的前提。另外,它对台风云场特征的描述能力也比较好。模拟的台风强度偏弱,这可能是模式初值的影响。当然,由于模式采用静力平衡的动力框架,而且模拟的格距还不够精细(12 km),这也可能会影响台风强度的模拟效果;另

外,模式分辨率不够高也可能造成台风眼区偏大。因此,如果具备更精确的初值,进一步提高分辨率,将会得到台风结构和演变特征更好的刻画。

4 台风的垂直结构分析

4.1 假相当位温

图 4 为假相当位温的垂直剖面图。由图可见,

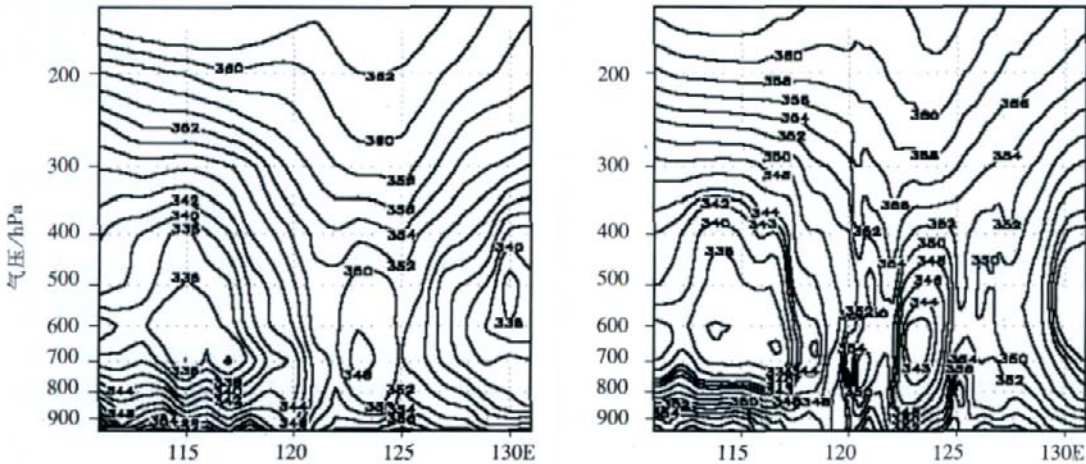


图 4 2004 年 8 月 12 日 0000UTC 过台风中心所作的假相当位温纬向垂直剖面图
(左为 NCEP 分析结果,右为模式模拟结果)

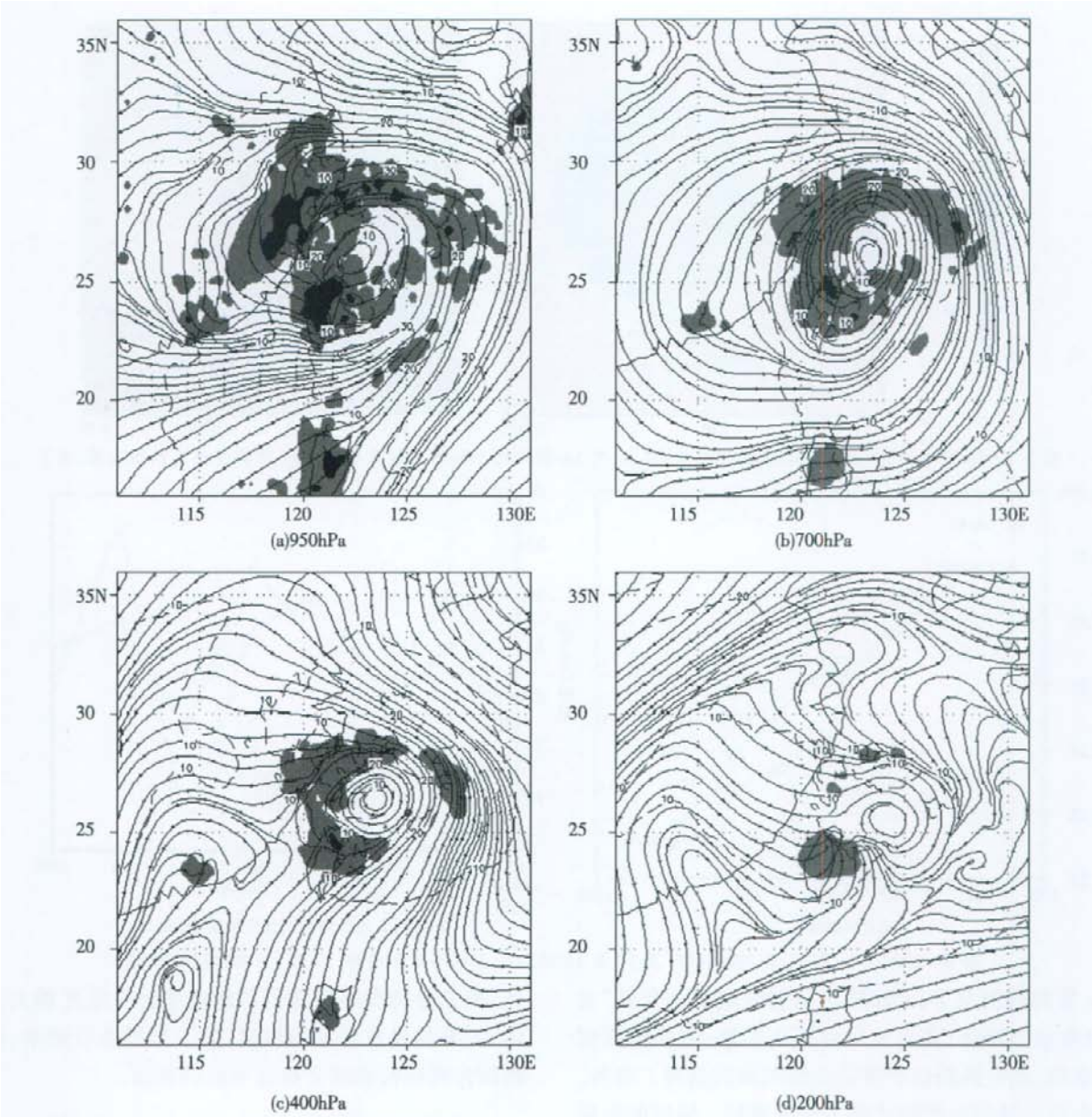


图 5 2004 年 8 月 12 日 0000 UTC 各层流场、等风速线(虚线,间隔 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和模拟的雷达反射率(填色, dBz, 深色阴影表示在 20 dBz 以上)

NCEP 分析和模拟都清楚地反映出台风的暖心结构。相对较低的分布出现在台风眼区 700 hPa 附近,这是由于台风眼区下沉气流在增暖同时会明显变干所致。在边界层中,由于海气和陆气相互作用而导致的洋面和陆面感热和潜热的向上输送,使得该层大气出现了相对较高的分布。虽然模式模拟的暖心结构范围比卫星或雷达观测偏大,但通过比较发现(图略),初始时刻 NCEP 资料分析的暖心范围就偏大。如果以此为标尺,则模式结果较好地保持了台风的暖心特征,但暖心温度偏低。

从台风 3-D 结构分析(图略)可以看出台风眼、云墙和螺旋云带的三维立体分布特征。对照假相当位温的垂直剖面图,并结合高、低空流场特征(图 5)可以发现,低层海洋上空高温高湿的气团由于辐合旋转而进

入台风中心,再通过台风中心旋转上升运动而到较高层次大气,然后辐散流出。除了云墙附近存在高 Q_e 的结构之外,在台风周围螺旋云系中,也存在对流发展很强的云柱,它们也是高 Q_e 的分布区。

4.2 水物质场和垂直速度场

图 6 给出经过台风中心的水物质和垂直速度径向剖面,可以明显看出台风中心以微弱下沉气流为主或是无铅直气流,并是晴空分布。而在云墙区,出现明显铅直上升运动,云雨分布明显。一般来说,垂直上升运动强盛的地方,云水、雨水物质分布较多,而在下沉气流区,主要对应雨水物质分布。这说明凝结潜热释放(雨水蒸发冷却)对上升(下沉)气流具有较强的诱发和加强作用。水物质和垂直运动在南北和东西方向都存在着较大的不对称特征,在垂直方向具有多中心结构。

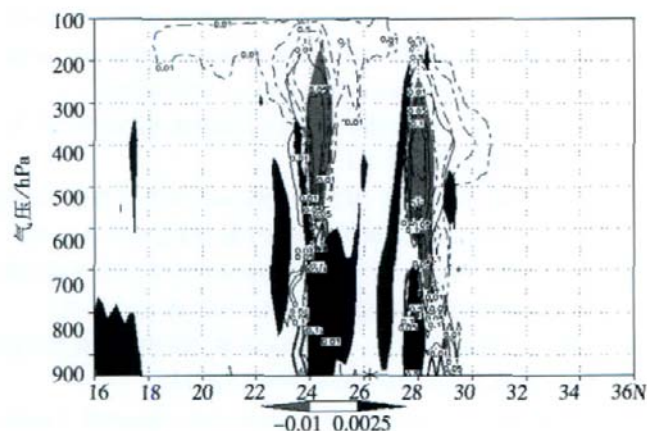


图6 2004年8月12日0000UTC过台风中心水物质比含量和垂直速度的经向剖面图(虚线:云水混合比;实线:雨水混合比,单位 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;填色,垂直速度,浅色为上升运动区,单位 $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$; *表示台风中心位置)

4.3 水平流场三维结构

由上文中的图5可看出,在各个层次,最大风速与强雷达反射率有较好的对应关系,低层雷达反射率比较强,这种对应关系更好。在950 hPa,流场的特征

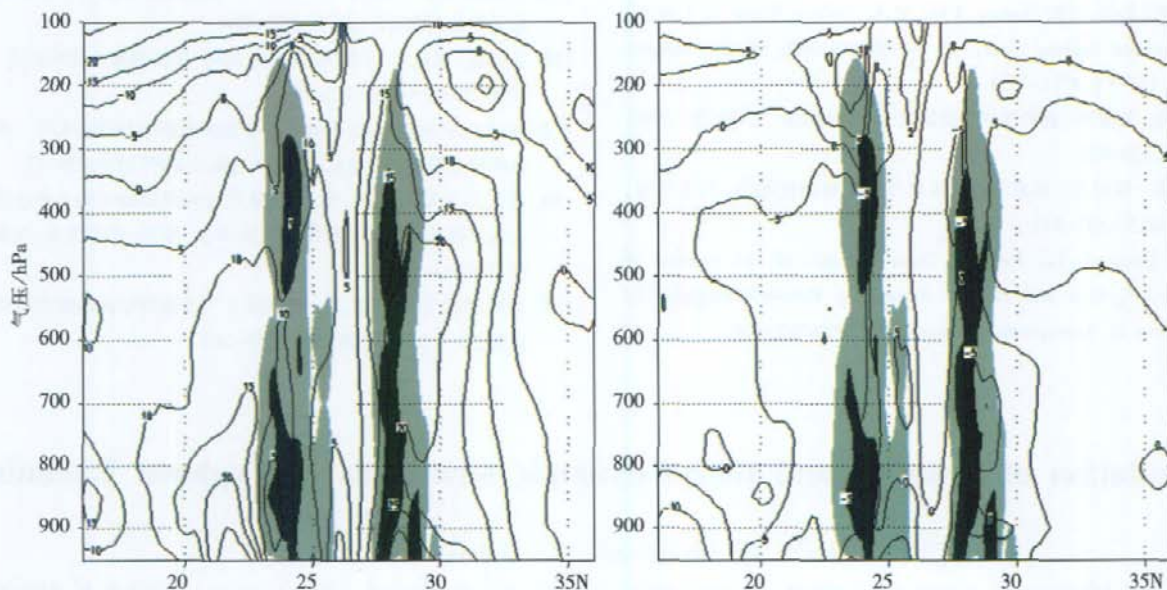


图7 2004年8月12日0000UTC切向速度(左)、径向速度(右)(实线,间隔 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和模拟的雷达反射率(填色,dBz,深色阴影表示在10 dBz以上)过台风中心的经向剖面图

台风的径向气流在对流层中低层主要以向眼区的入流为主,眼区径向风场很微弱。对照同时刻垂直速度可以发现,径向速度在眼区的减小,与云墙区域强烈的上升运动发展是一致的,即垂直速度的强上升区是和径向速度的大值区对应的。径向速度的垂直分布也呈现出南北不对称性,眼区以南的流入层可以达到400 hPa,在300 hPa以上为流出层。对照水物质分布,可以看到此时200 hPa以上有大片层状云存在,且水平分布比较均匀,并向外伸展开去(见图6);而北部入流较弱,并在云墙以外,500 hPa就开始出现辐散

是向着云墙的气旋性流入气流。700 hPa,眼区附近流线气旋性地向外流出;而在眼区以外,流线则气旋性地向内流入,两者在云墙附近产生强烈辐合。400 hPa,在距离中心大约3~4个径向距离的区域,流场开始气旋性地向外流出。而到了200 hPa,气流从眼区首先气旋性地向外流出,然后分为2支,一支继续气旋性地辐散流出,而另一支则是反气旋性地流出。从图中等风速线的分布看出,在台风所在区域,风速最大是在眼壁附近,台风外围风速小,这符合角动量守恒原理。

4.4 径向和切向风场

图7给出了2004年8月12日0000UTC切向速度、径向速度和模拟的雷达反射率过台风中心的经向剖面图。从图中可见,眼区切向风速很小,基本在 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,云墙处切向风场南北分布并不对称,北部的最大风圈强,而南部的最大风圈强度较弱。在对流层中高层,南北云墙区中都有一个切向风速相对小但回波强度较强的区域,此区域垂直速度强,水物质强度大(见图6)。

出流。径向气流在低层流入而在中高层流出的这种垂直结构,容易把行星边界层中高温高湿的空气输送到云墙中,从而为台风的发展提供充足的能量来源。

5 总结与讨论

(1)AREM使用NCEP分析资料作为初值场,不经过人造台风处理,仍然对台风“云娜”的热动力结构进行了较好的模拟。其对大尺度天气形势-引导气流场的较好模拟,是准确模拟台风路径的前提。另外,它对台风云雨特征、环流特征、热力结构的描述,也具备较

好能力。

(2)台风‘云娜’在登陆前 24 h, 其路径主要受大型流场气压梯度力的影响, 而台风内力作用很小。因此, 只要模式对大尺度形势有较好的刻画, 就能对该类台风路径有较好的模拟。

虽然模式的细网格格距达到 12 km, 但对于台风细致结构的刻画还不够精细, 可能会使模拟的台风眼区偏大, 云墙区域距台风中心偏远。另外, 静力平衡模式对于台风强度的模拟能力问题, 将通过引入 Bogus 资料后分析台风强度有无较大改变从而得到更准确的试验结果。这两点有待今后进一步改进和完善。

本文完稿过程中, 得到了周晓平老师的大力帮助和热情指导, 在此致谢!

参考文献:

- [1] LIU Yubao, ZHANG Dalin, YAU M K. A Multiscale Numerical Study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit Simulation and Verification[J]. Monthly Weather Review, 1997, 125(12):3073-3093.
- [2] ZHANG Dalin, LIU Yubao, YAU M K. Surface Winds at Landfall of Hurricane Andrew (1992)- A Reply[J]. Monthly Weather Review, 1999, 127(7): 1711-1721.
- [3] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究 10 年进展[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 420-432.
- [4] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 541-549.
- [5] Chen Lianshou, Luo Huibang, Duan Yihong et al. An overview of Tropical Cyclone and Tropical Meteorology Research Progress [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(3):505-514.
- [6] CHEN JOHNNY C L, LIANG Xudong. Convective Asymmetries Associated with Tropical Cyclone Landfall. Part I: f-Plane Simulations[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(13): 1560-1576.
- [7] 王鹏云, 刘春涛. 1996 年第 8 号台风中尺度结构的数值研究[J]. 气象学报, 1998, 56(3): 295-311.
- [8] 朱佩君, 陈敏, 陶祖钰, 等. 登陆台风 Winnie(1997) 的数值模拟研究 I: 结果检验和云系的模拟[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 553-559.
- [9] 朱佩君, 陈敏, 陶祖钰, 等. 登陆台风 Winnie(1997) 的数值模拟研究 II: 结构演变特征分析[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 561-567.
- [10] 闫敬华, 丁伟钰, 徐建平. ‘非 bogus’初值’热带气旋数值预报及其性能[J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 513-522.
- [11] Yu Rucong. The Design of the Limited Area Numerical Weather Prediction Model with Steep Mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (In English), 1989, 13(2):145-158.
- [12] Yu Rucong. A Two - Step Shape - Preserving Advection Scheme[J]. Adv Atmos Sci, 1994, 11(4):479-490.
- [13] Yu Rucong. Application of a Shape - Preserving Advection Scheme to the Moisture Equation in an E - grid Regional Forecast Model [J]. Adv Atmos Sci, 1995, 12(1):13-19.
- [14] 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[J]. 大气科学, 1994, 18 (3): 284-292.
- [15] 宇如聪. LASG-REM 对 1994 年中国汛期降水的实时预报试验[J]. 大气科学, 1994, 18 (增刊): 801-809.
- [16] 宇如聪, 徐幼平. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟[J]. 气象学报, 2004, 62(6): 715-724.
- [17] 蔡则怡, 宇如聪. LASG- η 坐标有限区域数值预报模式对一次登陆台风特大暴雨的数值试验[J]. 大气科学, 1997, 21(4):459-471.
- [18] 程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. AREM 地表通量参数化的一种改进方法及其预报试验[C]//武汉区域气象中心. 暴雨·灾害. 北京: 气象出版社, 2004(1).
- [19] 李鲲, 徐幼平, 宇如聪, 等. 梅雨锋上三类暴雨特征的数值模拟比较研究[J]. 大气科学, 2005(2): 236-248.

Simulation of dynamic and thermodynamic structures of Typhoon Rananim

CHENG Rui^{1,2}, YE Cheng-zhi³, XU Ai-hua⁴, YIN Shan-jian⁵

(1.State key laboratory of numerical simulation for atmospheric sciences and geophysical fluid dynamics, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; 3.Hunan provincial meteorological bureau, Changsha 410007; 4.Jiangxi provincial meteorological bureau, Nanchang 330046; 5.The 5th Institute of Equipment Academy of the 2nd Artillery, Beijing 100085)

Abstract: Simulation of dynamic and thermodynamic structures of Typhoon Rananim was performed using Advanced Regional Eta-coordinate Model (AREM). Two mesh domains with the grid size of 37 km and 12 km were designed to simulate the synoptic scale environment and the storm-scale structure respectively. A Betts-Miller cumulus parameterization scheme and an explicit microphysics scheme were used simultaneously in addition to the non-local PBL parameterization. The model was initialized at 1200 UTC on Aug 11th, 2004 with NCEP Analyses. No Bogus data was incorporated. As verified against different observations and analyses, AREM simulated Typhoon Rananim well mainly about the background pattern, 3-D thermodynamic and dynamic structures and cloud features. Without Bogus initialization, the model reproduced the evolution of typhoon reasonably from large-scale initial conditions, especially her translation and the landing.

Key words: AREM; Typhoon Rananim; Numerical simulation; Dynamic and thermodynamic structures of Typhoon