

MM5 模式在热带气旋模拟中的应用

钟 中¹, 张金善², 黄 瑾³

(1. 解放军理工大学气象学院军事气象海洋系; 江苏 南京 211101; 2. 南京水利科学研究院; 江苏 南京 210029; 3. 南京工程学院基础部, 江苏 南京 211167)

摘 要: 本文利用 3 重嵌套的中尺度非静力模式 MM5 系统, 对热带气旋 Winnie (1997) 在我国登陆前后路径和强度演变进行了数值模拟。模拟结果表明, 通过合理地选择 Bogus 的初始强度和模式启动时间, 能较准确地模拟热带气旋登陆前后移动路径和强度演变, 所选个例路径模拟误差仅为 54.5km。

关键词: MM5; 热带气旋; 路径; 强度

中图分类号: P732.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239 (2004)04-0010-06

1 引言

我国是世界上受热带气旋 (TC) 影响最严重的国家之一, TC 登陆十分频繁, 平均每年登陆 7~8 个, 是世界上 TC 登陆最多、受害最重的国家。登陆 TC 除带来洪涝灾害外, 还带来严重的风灾和风暴潮灾害, 但有时也能为受旱地区带来丰沛的降水, 从而有利于缓解旱情。

TC 的数值模拟研究已开展数十年, 由于计算机资源和人们对 TC 认识的限制, 早期的 TC 数值预报模式中初始 TC 多采用轴对称模型, 数值模式中强对流过程及其相应的微物理过程都是利用大尺度运动的参数化形式表示的, 即采用所谓的隐式对流方案, 模式水平分辨率也比较低^[1-5]。二十世纪九十年代以来, 在高分辨率的三维非对称 TC 模拟中, 显式对流方案得到越来越普遍的使用, 使得 TC 的结构也得到了进一步揭示, 相应的研究工作大大提高了对 TC 内核结构特点和增强、维持机理的认识^[6-9]。美国宾夕法尼亚大学国家天气研究中心 (PSU/NCAR) 从二十世纪 80 年代共同开发的第五代中尺度模式 MM5 是目前国际上应用最广泛的中尺度模式^[10], 也已被用于 TC 的模拟研究和预报业务中^[7-8]。国外在 TC 路径、强度模拟和预报方面近年虽取得了实质性进展, 但研究的重点都是发生在大西洋的 TC。我国在 TC 数值预报业务模式方面虽开展了相关研究工作, 但由于受到资料和技术方法方面的限制, 业务预报水平和国际先进水平之间还有一定的差距。

TC 路径和强度的预报是 TC 预报中最值得关注的内容。相对而言, TC 路径的研究

收稿日期: 2004-08-13; 修订日期: 2004-08-23

基金资助: 科技部社会公益研究专项资金项目 (2000DIB20096) 和国家自然科学基金重点项目 (40333026) 资助。

作者简介: 钟 中 (1962-), 男, 教授, 主要从事海洋气象和区域气候模拟研究, 已在不同刊物上发表 30 余篇论文。

比较成熟,但其强度和结构变化目前还是从环境影响和强对流系统作用以及海气交换等方面进行研究^[11]。由于资料缺乏,TC 强度变化机理仍然是需要研究的科学问题。作为 MM5 模式应用个例,本节利用 3 重嵌套的中尺度模式 MM5,以 1997 年发生在西太平洋并在我国登陆造成很大经济损失的 Winnie 为例,对其登陆前后的路径和强度进行了数值模拟。

2 热带气旋 Winnie (1997) 过程概况

1997 年 Winnie 8 月 8 日生成于西太平洋 11.2°N, 158.9°E, 是全年影响我国最强的登陆 TC, 它在源地生成后稳定地向西北方向移动, 强度也不断加强, 至 10 日加强成热带风暴, 并于 11 日发展成台风。该 TC 自始至终移向移速稳定少变, 而强度加强迅速, 从中心风速 33m/s 很快发展成 60m/s 的特强台风, 为全年最强 TC 之一, 维持台风强度达 9 天之多, 直到 18 日夜间登陆浙江温岭时中心风速仍有 40m/s, 中心气压 960hPa。登陆后穿过浙皖两省进入山东后分裂成两部分, 主中心消失在鲁南, 而在鲁中又新生成一个副中心移向东北, 穿过渤海湾后又在辽宁营口二次登陆, 强度一直维持在风暴级, 最后准静止在黑龙江省境内。受其影响, 我国东部南起福建北至黑龙江, 共有 13 个省(市)普降大雨, 尤其是浙江、上海、江苏、山东和辽宁出现大暴雨和特大暴雨并伴有 8~11 级大风, 阵风达 12 级, 给所经之处造成很大经济损失。TC 登陆前浙江嵊泗曾出现 31m/s 最大风速, 阵风 41m/s, 为该年 TC 影响的极值^[12]。

3 模拟方案

模拟工作采用 MM5 第 3 版, 模式系统采用 Mercator 投影, 水平方向取 3 重嵌套网格, 3 个网格区域分别称之为 D1、D2 和 D3 (见图 1), 相应的网格距分别为 45km、15km 和 5km, 为简单起见, 3 重网格都固定不动, 水平方向网格点数分别取为 61×61、91×91 和 121×121, 在投影平面上对应的区域范围分别是 2700×2700 km²、1350×1350 km² 和 600×600 km²。模式在垂直方向分成不等距的 25 层。粗网格区域 (D1) 模式时间积分步长取为 120s, 其他网格区域按 1/3 规律递减, 为减少计算量和提高模拟效率, 细网格区域 (D3) 从模式运行 12h 后开始启动。

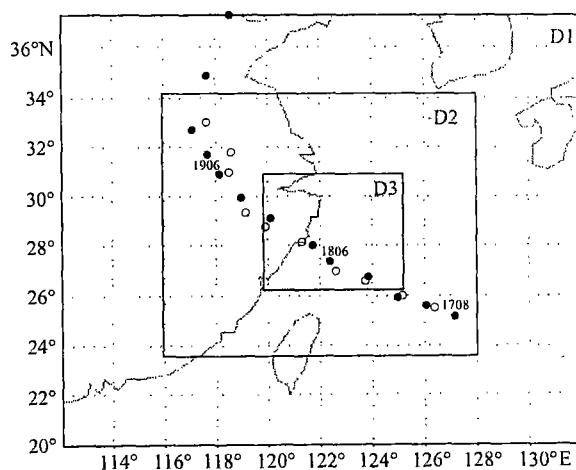


图 1 3 重嵌套模式区域位置和每隔 6h TC 中心位置

(●: 实况位置; ○: 模拟位置)

在模式物理过程计算方案选取方面,根据张大林^[13]的研究报告,当模式网格距介于 20-50km 时,模式水循环物理过程计算应同时使用合理的隐式对流和显式云物理方案。因此,粗网格(D1)区域和中间网格(D2)区域与水循环相关的物理过程选用 Grell 的积云对流参数化方案和 ReisnerI 型显式云物理过程方案,细网格 D3 区域选用计算较复杂的 ReisnerII 型混合云物理方案并不再考虑积云对流参数化过程。另外,三种网格都同时用参数化方式考虑了浅对流的作用,并且在边界层计算方面都同时采用了 Blakadar 的高分辨边界层方案。在陆地上还利用 OSU 的陆面过程模式考虑了陆地水文过程的作用,辐射方案则统一采用 CCM2 的计算方案,每隔 20min 更新辐射传输计算结果。

模式积分从 1997 年 8 月 17 日 06 时(世界时,下同)开始至 19 日 18 时结束,对 Winnie(1997)登陆前后进行了 60h 模拟(其中 D3 区域模式积分从 17 日 18 时至 19 日 18 时,共 48h)。模拟过程中 D1 区域侧边界条件是利用 NCEP/NCAR 的再分析资料插值获得的,每 6h 更换一次,相应积分时段的海温强迫场取自于最优插值的海温资料(OISST),也是每 6h 更换一次。模式初始场采用 NCEP/NCAR 的大尺度场迭加 Bogus 模型方式获得,初始时刻 TC 中心位置根据中国中央气象台定位资料确定(25.2°N, 127.1°E)。考虑到 Winnie 是一个典型的强台风,并为了保证模式启动后 Bogus 能和大尺度场协调且维持其强度,初始引入的 BogusTC 在强度上做了人为放大。初始最大风半径(RMW)处风速取为 50m/s,比 TC 定位资料给出的估计风速大 10m/s。相应的中心气压约为 940hPa,比估计值低 20hPa。试验表明,初始 BogusTC 强度适当放大有利于模式启动初始阶段调整过程中 TC 强度的维持,并在初始阶段模拟出和实况接近的路径。通过选择不同模式启动时间和相应 BogusTC 位置的模拟试验发现,模式从 1997 年 8 月 17 日 06 时启动模拟效果是最好的,因此,该文只对从该时刻启动的模拟结果进行分析。

4 Winnie(1997)路径和强度模拟结果分析

本节主要分析模拟的 Winnie(1997)在 D2 和 D3 区域移动路径和强度演变特征。在图 1 中除给出模式 3 重套网格区域范围外,还比较了从模式启动每隔 6h 模拟的 TC 中心位置和通过卫星云图定位的 TC 中心位置(由于模拟时段内 TC 中心都位于 D2 区域,所以模拟 TC 中心位置均根据 D2 区域模式海平面气压最低值对应网格点位置确定),两者的误差如表 1 所示。由图 1 和表 1 可以看出,模式模拟的 TC 路径和实况相比不论在 TC 位置还是在移向移速方面都是非常令人满意的。模拟的 60h 中心位置平均误差为 54.5km,远小于通常的 TC 业务模式 48h 预报误差^[14]。另一个模拟比较成功之处是 TC 登陆地点模拟,由图 1 可见,模拟 TC 登陆点和实际登陆点也是比较一致的。但模拟的登陆时间比实际提前了约 1 个小时左右。

表 1 模拟 TC 位置 and 实际位置误差 (km)

Hour	6h	12h	18h	24h	30h	36h	42h	48h	54h	60h	mean
Error	35.6	14.5	9.2	69.8	47.8	44.6	76.7	85.1	95.6	66.2	54.5

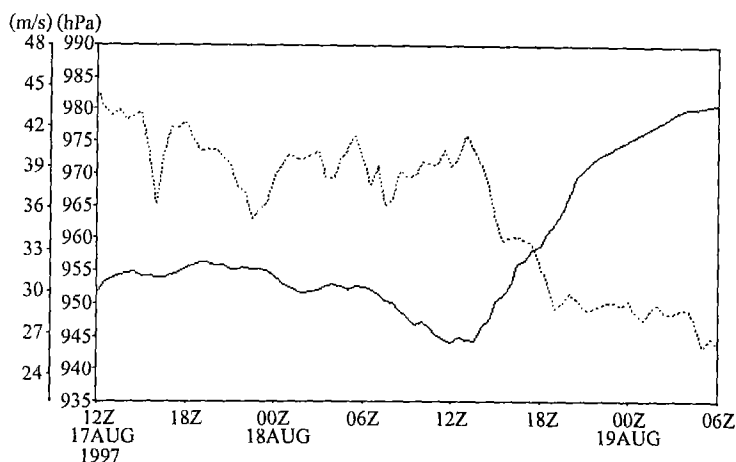


图 2 模拟的 TC 中心附近最低气压 (实线) 和最大风速 (点线) 随时间的演变

图 2 是模拟 TC 中心附近最低气压和最大风速随时间的演变。由图可见, 两者的变化趋势基本上是反位相的, 但最低气压的变化比较平稳, 而最大风速的变化性则比较大。并且 TC 登陆前 1h, 模拟最大风速还出现了明显增大现象, 以至于登陆时最大风速超过了 40m/s, 观测结果也表明 TC 登陆浙江温岭时中心附近风速仍有 40m/s。浙江嵊泗阵风曾达 41m/s。TC 登陆后, 中心附近模拟最大风速迅速减小, 6h 后减小到 29 m/s 左右, 比热带气旋年鉴(1997)给出的风速估计值 (35 m/s) 偏低, 但 12h 后, 模拟的登陆 TC 中心最大风速和年鉴几乎一致 (28m/s)。TC 登陆后模拟的中心最低气压虽然也出现迅速升高现象, 但登陆时最低气压 (944hPa) 较年鉴给出的气压值 (960hPa) 明显偏低, 模拟的 TC 强度偏强有可能是模拟过程中没有考虑海-气相互作用造成的, 因为已有的研究表明, TC 引起的海表冷却有削弱其强度的作用^[15-16]。

图 3 是位于登陆点以北 30km 左右的洪家站 (58665) 模拟和观测的气压和风速随时间的演变 (其中 TC 登陆时由于断电风速缺测)。可见, TC 登陆前后洪家站模拟的气压随时间演变特征和观测基本一致 (见图 3a), “漏斗”型分布非常清楚。模拟和观测的最低气压分别为 956hPa 和 963hPa, 模拟气压较观测值低 7hPa 左右。模拟气压最低值出现在 18 日 12 时 (世界时), 超前观测气压最低值出现时间 1h 左右。相应的 TC 登陆前后洪家站风速随时间演变特征也和观测比较接近 (见图 3b), 模拟的最大风速约为 26m/s 左右, 估计比观测风速要大。但图 3b 中模拟风速是瞬时值, 而观测风速是半小时平均值, 所以模拟的最大风速和观测最大风速也是比较接近的。在风速演变特征图上也可以看出模拟的 TC 登陆时间要超前实际登陆时间。

从上述台风模拟路径、气压和风速演变等和实况的对比分析可见, MM5 模式具备了模拟热带风暴登陆前后路径和强度变化特征的能力。

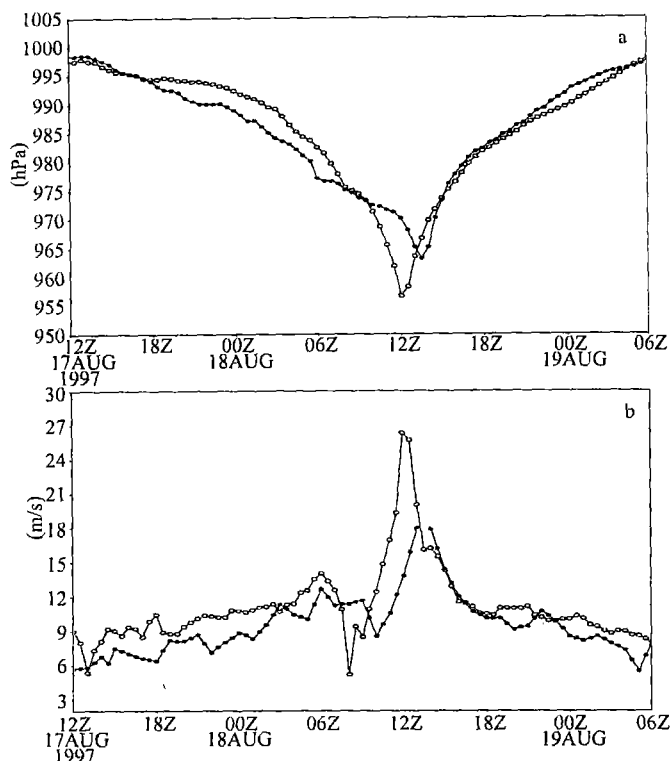


图 3 洪家站(58665)海平面气压(a)和风速(b)随时间的演变(○: 模拟; ●: 观测)

5 结语

本文利用 3 重嵌套的 MM5 模式, 模拟了发生在西太平洋并在我国沿海登陆且造成重大经济损失的热带气旋 Winnie(1997) 登陆前后的路径和强度演变。模拟结果表明, 通过合理地选择 BogusTC 的初始强度和模式启动时间, 能较准确地模拟 TC 登陆前后移动路径, 本文个例在模拟时段内, 间隔 6h 的 TC 模拟中心位置 and 实际中心位置平均误差为 54.5km, 路径模拟误差远小于业务预报误差。TC 登陆点附近气压和风速演变特征也得到较准确的刻画, 模拟结果准确地描述了 TC 强度在登陆前后的演变过程。

本文模拟工作所获得的模拟结果还可为登陆 TC 消亡机理以及 TC 在海洋上强度演变和相应的水份循环特征研究提供甚高分辨率模拟资料, 模拟的海面风场还可以用于驱动海洋流、浪模式, 提高海洋流、浪和风暴增水的模拟准确率。

参考文献:

- [1] Kasahara A. A numerical experiment on the development of tropical cyclone. *J. Meteor.*, 1961, 18: 259~282.
- [2] Ooyama K V. Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26: 3~40.
- [3] Sunqvist H. Numerical simulation of the development of tropical cyclones with ten-level model. Part I. *Tellus*, 1970, 22: 359~390.

- [4] Ooyama K V. Conceptual evolution of the theory and modeling of the tropical cyclone. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, 60: 369~379.
- [5] Molinari J and M Dudeck. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, 120: 326~344.
- [6] Tripoli G J. An explicit three-dimensional nonhydrostatic numerical simulation of a tropical cyclone. *Meteor. Atmos. Sci.*, 1992, 49: 229~254.
- [7] Liu Y B, D-L Zhang and M K Yau. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, 125: 3073~3093.
- [8] Liu Y B, D-L Zhang and M K Yau. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and inner-core structure. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, 127: 2597~2616.
- [9] Zhang D-L, Y B Liu and M K Yau. Surface winds at landfall of Hurricane Andrew (1992) — A reply. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, 127: 1711~1721.
- [10] 钟 中, 张金善, 黄 瑾. 中尺度大气模式 MM5 简介 (即将发表于海洋预报 2005 年第 1 期).
- [11] 陈联寿. 国际热带气象研究的现状和发展. 新世纪气象科技创新与大气科学发展——热带气旋和季风, 北京: 气象出版社, 2003, 3~7.
- [12] 中国气象局. 热带气旋年鉴 (1997). 北京: 气象出版社, 1998, 105.
- [13] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. *大气科学*, 1998, 22: 548~561.
- [14] 顾建峰, 蒋贤安, 殷鹤宝, 徐一鸣. 东海热带气旋路径预报模式业务运行结果及改进模式. *热带气象学报*. 2000, 16: 54~61.
- [15] Bender M A, I Ginis and Y Kurihara. Numerical simulation of tropical cyclone - ocean interaction with a high-resolution coupled model. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 23245~23263.
- [16] Hodur R The Naval Research Laboratory's coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system (COAMPS). *Mon. Wea. Rev.*, 1997, 125: 1414~1430.

AN APPLICATION OF MESO-SCALE MODEL MM5 ON TROPICAL CYCLONE SIMULATION

ZHONG Zhong¹, ZHANG Jin-shan², HUANG Jin³

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029 China; 3. Department of Basic Courses, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167 China)

Abstract: The dynamic frame and the model physical processes, associated with the parameterization scheme and the general flow, of PSU/NCAR fifth-generation MM5 are introduced in this paper. In this paper, as a case study, the numerical simulation of meso-scale model MM5 on tropical cyclone Winnie (1997) is conducted with a triply-nested model before and after its landfall stage. The simulated track and intensity is compared with observed one. The results show that the track could be simulated well with a suitable Bogus initial intensity and the mean error of track is about 54.5km. The model could also reproduce the evolution intensity basically.

Key words: MM5; tropical cyclone; track; intensity