

特大眼台风 Winnie(1997)的高分辨率数值模拟^{*}

张庆红

北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

摘 要

台风 Winnie 1997 的眼直径为 370 km, 是有观测以来发现的最大台风眼之一。应用 Penn State/NCAR 高分辨率中尺度模式 MM5, 成功地模拟了 Winnie 的路径、强度、台风眼及其双眼壁结构。由此根据模式输出结果分析了台风眼及内外眼壁附近的流场和热力场特征。发现 Winnie 台风的眼壁及其周围风场都显示了明显的非对称性结构。Winnie 的外眼壁对应一个极大风速环, 也是暖湿环和正涡度环。内眼壁对应一个次极大风速环、暖湿环。上升运动控制整个内眼壁和海平面 2 km 以上的外眼壁区域, 下沉运动则控制眼区和内外眼壁之间。径向入流集中在外眼壁和内外眼壁之间的边界层, 流出则位于外眼壁的对流层中上层。

关键词: Winnie 1997, 台风眼, 双眼壁。

1 引 言

1997 年 8 月 5 日 Winnie 台风生成于 Marshall 群岛(图 1), 在其西移过程中不断加强, 12 日 06:00 UTC 中心风速达到 72 m/s, 出现一个直径为 30 km 的显著台风眼, 14 日后台风逐渐减弱, 出现双眼壁。16 日 04:56 UTC 一个外围的云带开始加强并环绕 Winnie, Winnie 原有的双眼壁迅速消失, 16 日 17:28 UTC 外围云带成为眼壁, 一个直径为 370 km 的特大眼形成。几个小时后, 一个直径为 18 km 的内眼壁恢复^[1-2]。Winnie 特大眼壁套小眼壁的结构一直持续到 18 日 12:00 UTC 在浙江登陆才消失。

显著的台风眼是成熟台风的一个明显标志。根据卫星观测统计, 大西洋上的热带气旋的眼平均为 55—85 km^[3], 一般热带气旋的眼直径小于 55 km 被认为是小眼, 而直径大于 85 km 的热带气旋眼则被称为大眼。至今观测到的热带气旋最小和最大的眼都发生在西北太平洋上, 其中最小眼的台风为 Tip 1979^[4-5], 其眼的直径为 15 km; 而最大眼的台风是 Carmen 1960^[6]和 Winnie 1997^[2], 它们眼的直径均为 370 km。由于 Winnie 1997 台风眼的特殊

性, 使得对其的研究变得尤为重要, 其特大的外眼壁与普通的热带气旋眼壁的结构是否相同? 特大眼壁是否是真正的眼壁或只是对流环?

海洋上观测稀少, 高分辨的数值模式是一个研究台风的有效方法。最早利用三维模式对台风进行成功模拟的是 Anthes 等^[7-8], 尽管他们的模式水平分辨率只有 30 km, 还是可以成功地模拟出热带气旋的不对称性和螺旋雨带。近 20 年, 随着数值模式的发展, 对热带气旋的模拟也取得了很大进展。Kurihara 等^[9]利用水平分辨为 5 km 的嵌套模式成功地模拟出热带气旋的眼部结构; Tripoli^[10]模拟到更加精细的热带气旋雨带结构。Liu 等^[11]利用水平分辨率为 6 km 的中尺度模式 MM5 成功地模拟了 Andrew (1992 年) 飓风的眼、双眼壁及其周围的螺旋雨带。最近利用水平分辨率 1 km 的 MM5, 在没有 Bogus 的前提下, Davis 等^[12]成功地模拟了 Diana 1984 的生成。上述个例仅限于具有普通尺度眼的热带气旋, 已有的对 Winnie 的研究模拟也只局限在其登陆以后^[13-15], 对 Winnie 台风特大眼时段的模拟研究还未见。本文应用水平分辨率为 3 km 的中尺度模式 MM5, 不加 Bogus, 来探索模式是否可

^{*} 初稿时间: 2005 年 3 月 1 日; 修改稿时间: 2005 年 8 月 29 日。

资助课题: 国家科技部 973 项目(2004CB418301), 国家自然科学基金项目(40375017 和 40233036)。

作者简介: 张庆红, 女, 1967 年生, 博士。主要从事中小尺度气象学、大气数值模式与可预报性研究以及灾害性天气机理与预测研究。

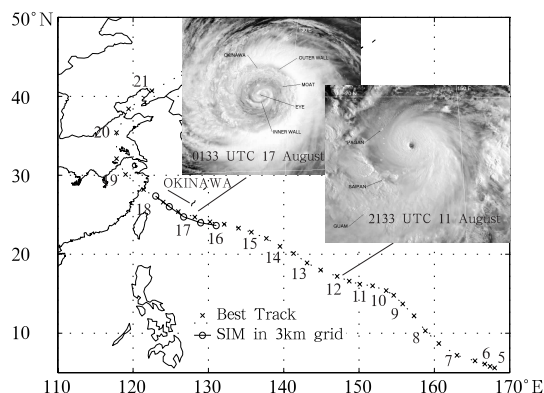


图1 Winnie 台风观测(虚线)和模拟(实线)路径
(时间间隔为 12 h, 数字代表日; 右侧小图为 1997 年
8 月 11 日 21:33 UTC GMS 可见光云图, 中间上侧为
17 日 01:33 UTC GMS 可见光云图)

Fig. 1 Best track (dashed line) and simulated track
(solid line) for Typhoon Winnie

(Track positions are at 12 h interval. The numbers near each
cross indicate the date. Plot on right corner is visible GMS
imagery on 21:33 UTC 11 August 1997. Plot on mid upper
corner is visible GMS imagery at 01:33 UTC 17 August 1997)

以模拟出 Winnie 台风的特大眼, 并研究台风眼及其
双眼壁的动力及热力结构。Winnie 台风的眼部结
构, 特别是直径 370 km 的外眼壁和 18 km 内眼壁
对高分辨率数值模拟是一个挑战。

2 模拟方案

模拟中采用的物理过程方案有: Betts 和 Miller

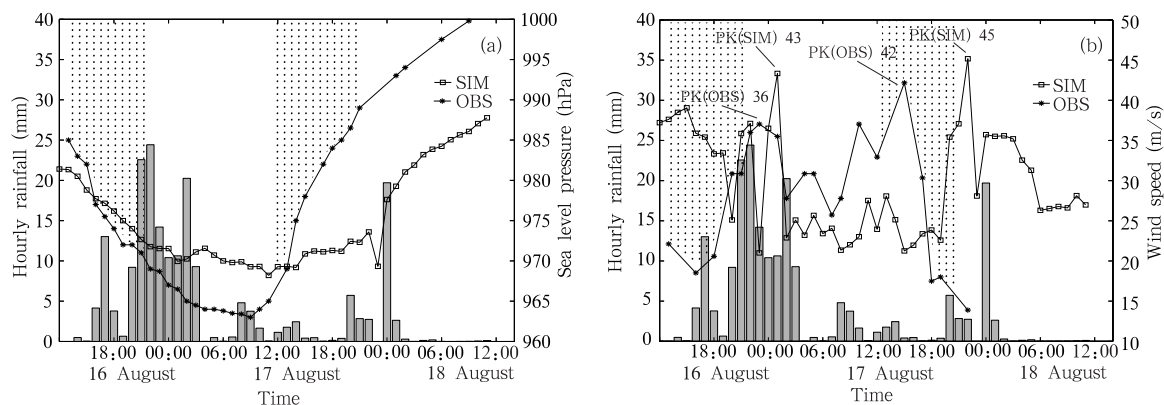


图2 Okinawa 观测和其南 30 km 处 MM5-3 km 模拟的海平面气压(a)、风速(b)和降水对比
(时间自 1997 年 8 月 16 日 12:00 UTC 至 18 日 12:00 UTC; 观测(模拟)的风和气压用圆圈(方块)表示;
观测降水时间段用阴影表示, 模拟降水用直方图表示)

Fig. 2 Sea level pressure (a), wind speed (b) and rainfall comparison at Okinawa between observation at Okinawa and
MM5-3 km grid simulation 30 km south of Okinawa from 12:00 UTC August 16 to 12:00 UTC August 18 1997

(Observed and simulated is shown by solid line with circle and square. Bars represent simulated hourly rainfall.

Shaded areas are for observed rainfall episode)

积云参数化方案^[16], Reisner 显示降水方案^[17] 和 Black-
adar 高分辨率边界层方案^[18]。初估场选用 ECWMF
的 TOGA(Tropical Ocean Global Analysis)分析场, 其
水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。客观分析资料为 GTS
(Global Telecommunication System), 包含高空、地面和
船舶观测等。模拟区域 D01 水平分辨率为 81 km, 格点
数为 112×132 ; 模拟区域 D02 水平分辨率为 27 km,
格点数为 211×241 ; 模拟区域 D03 水平分辨率为 9 km,
格点数为 262×319 ; 模拟区域 D04 水平分辨率为 3 km,
格点数为 418×508 。D01, D02 和 D03 采用双向嵌
套, 积分起始于 1997 年 8 月 15 日 12:00 UTC, 共积
分 99 h, D04 采用单向嵌套, 利用 D03 的 24 h 预报
场为初始场, 起始于 1997 年 8 月 16 日 12:00 UTC,
积分 48 h。本文分析 D04 的模拟结果。

3 模拟结构与分析

图 1 给出了每 12 h 的模拟路径和 JTWC(Joint
Typhoon Warning Center)提供的台风路径, 除了模
拟的路径在位置上偏南和时间上滞后外, 两条路径
基本吻合。值得指出的是初始场台风中心就位于观
测中心以南 30 km。Okinawa 站(26.5°N , 127.8°E)
记录了 Winnie 中心从其南部 150 km 处经过时的每
小时气压和风速, 图 2 比较了 Okinawa 的观测和
MM5-3 km 模拟中其南侧 30 km 处的每小时气压
和风速。

8月16日23:00 UTC,台风的外眼壁首次经过 Okinawa 时,观测到最大风速为 36 m/s,随后观测气压迅速下降至 964 hPa;17日17:00 UTC 当外眼壁第2次经过 Okinawa 时 Doppler 雷达观测到最大风速为 42 m/s,随后气压迅速回升。图 2a,b 中阴影表示降雨时段,也代表外眼壁。两次观测的最大风速均位于外眼壁的内侧。模拟的第1次风速的峰值为 42 m/s,发生在 17日05:00 UTC,此时气压降到 968 hPa;第2次模拟峰值为 45 m/s,发生在 17日22:00 UTC,模拟的最大风速也发生在模拟眼壁的内侧。这种现象在其他热带气旋中也曾观测到^[19]。Winnie 台风与其他台风不同的是气压随时间变化曲线呈“碗”状,而不是“漏斗”状分布。这也说明在 Winnie 的大眼内,气压的水平梯度比外眼壁附近弱,其外眼壁内结构比较松散。应该指出的是模拟的气压和最大风速都比观测晚了 6—12 h,这可能由于模式初值的误差和 spin-up 问题引起的。

除了 Okinawa 站观测的气压和风速以外,卫星观测的 16日13:11 UTC DMSP 图像也给了模拟一个有力的支持。图 3(附页彩图)给出的微波图像中可以看到一个直径为 370 km 的外眼壁(黄色,红色)和一个较弱的直径为 18 km 的内眼壁,内外眼壁之间是一个广阔的相对无云区(图 3a)。考虑到模拟的台风路径比观测路径滞后,用模拟的 $t=14$ h,2 km 高度上的雷达回波和观测做对比(图 3b)。模拟结果也同样呈现一个直径为 370 km 的大眼壁,而内眼壁的直径在 50 km 左右,比观测的大。有趣的是无论是观测还是模拟,眼壁都呈现明显的不对称性。

不对称性也呈现在通过眼区的南北向垂直剖面上,从模拟雷达回波所表示的内外眼壁(图 4)可以看到,外眼壁比内眼壁对流强而且对流区宽。内眼壁对流在北侧比南侧强。垂直于剖面的水平风速也呈现了不对称性,最大风速在北侧为 41.7 m/s,而在南侧为 38.7 m/s。尽管如此,整个对流层可以明显地看到在外眼壁附近存在一个最大风速环,最大风速中心位于外眼壁内侧的 800—900 hPa。有趣的是在内眼壁附近的边界层附近有一个次级最大风速环,最大风速中心位于内眼壁的外侧,极大值在南北分别为 14.5 m/s 和 21.6 m/s。内眼壁附近的大风速圈无法验证,但在对其他热带气旋的观测中,也发现沿半径方向有两个极大风速中心分别对应内外眼壁^[20-21]。

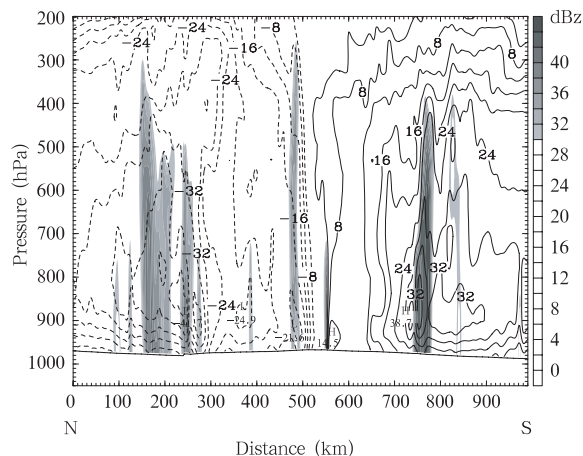


图 4 模拟的 $t=14$ h 南北向垂直剖面上的雷达回波和切向风速

(雷达回波大于 30 dBz 的区域用阴影表示。向东(西)的风速用实(虚)线表示,等值线间隔为 4 m/s。剖面位置见图 3b)
Fig. 4 North-to-south vertical cross section of radar reflectivity and wind velocity normal to the cross section at $t=14$ h (Radar reflectivity greater 30 dBz are shaded. Velocity of wind go into the paper are plotted in solid lines in 4 m/s interval and the dashed lines are same as solid lines, but for wind flow out of the paper. Location of cross section is plotted on Fig. 3b)

为了全面了解 Winnie 台风的动力和热力结构,计算了 $t=14$ h 切向平均雷达回波、切向风、相对湿度、垂直运动速度、相对涡度的垂直分量和位涡(图 5)。外眼壁对流区的宽度是内眼壁对流区的 10 倍。最大平均切向风位于距台风中心 350 km 和海平面上 1 km 高度处,与内眼壁对应的也有一个次极大风速区,位于距台风中心 75 km 处。外眼壁附近的垂直环流明显强于内眼壁,下沉运动控制着内外眼壁之间的 2 km 高度以上的大部分区域,台风眼内部也受下沉气流控制。最大的下沉运动发生在台风眼内的边界层附近。内外眼壁均由上升气流控制,最强的上升气流位于内外眼壁的对流层中层。径向入流发生在外眼壁和内外眼壁之间的边界层,流出则发生在外眼壁以外的对流层中上层。切向平均位温分布显示出径向流入区是明显的位势不稳定区。另外可以发现一个暖湿环位于距台风中心 150—400 km 的整个对流层和另一个暖湿环控制距台风中心 50 km 的对流层中下层。两个暖湿环分别对应内外眼壁。涡度分布图中有一个明显的正涡度环位于切向风速中心的内侧,最大的涡度中心位于台风中心,同样最大位势涡度中心也位于台风中心,并随高度向外倾斜,位势涡度极大值的轴线呈“碗”状分布,类似于 Andrew 1992^[22]。

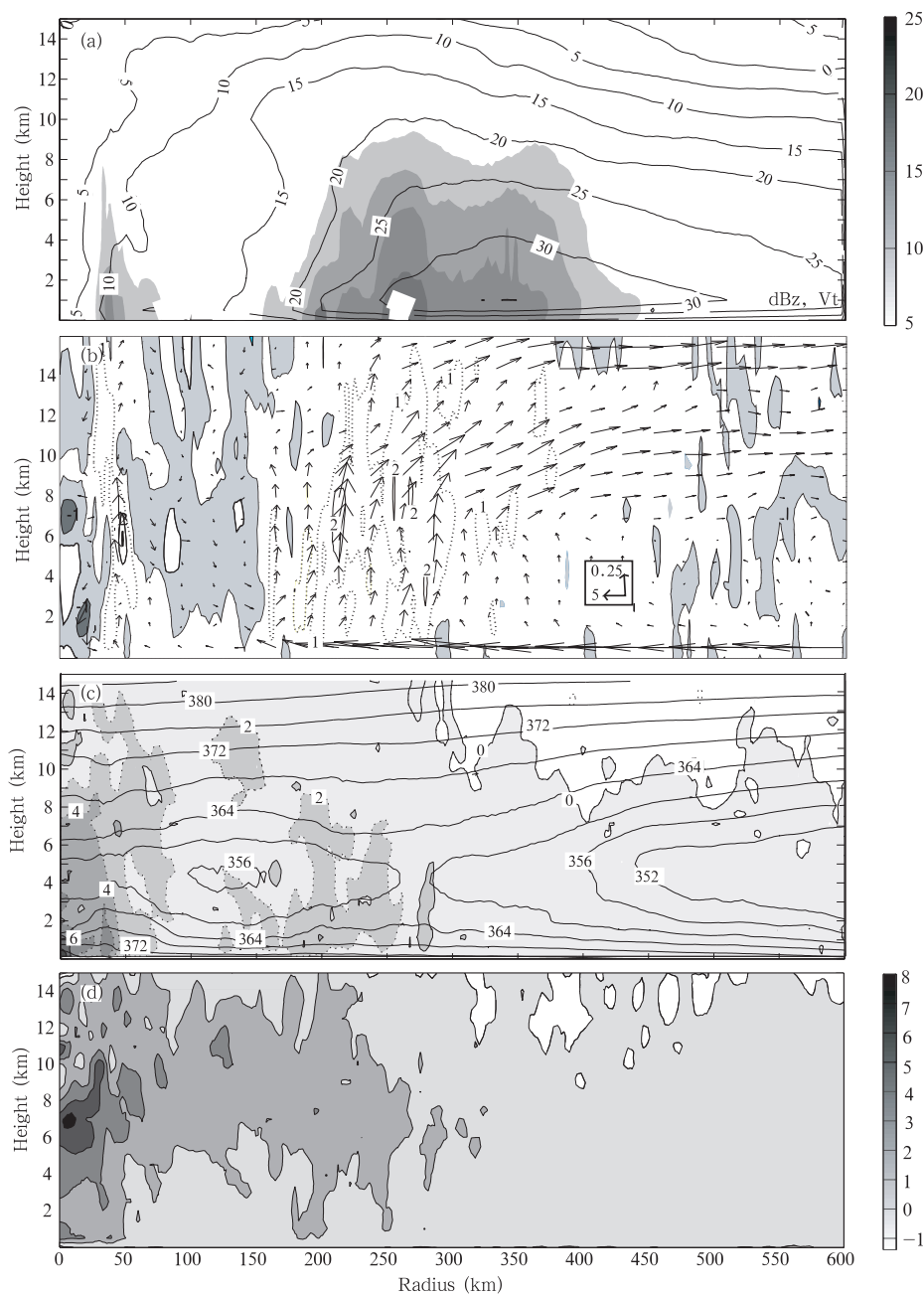


图5 模拟 $t=14$ h 的半径-高度剖面上的切向平均场

(a. 雷达回波(阴影)和切向风(实线, 间隔为 5 m/s); b. 垂直运动与垂直环流风场矢量(垂直运动等值线间隔为 1 cm/s, 灰色阴影为垂直运动大于 -1 cm/s, 小于 0 cm/s 区域; 黑色阴影为垂直运动小于 -1 cm/s 区域; 虚线为垂直运动为 1 cm/s 等值线); c. 相当位温(实线, 间隔为 4 K)和相对涡度的垂直分量(虚线, 间隔为 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 阴影为正涡度区); d. 位势涡度, 间隔为 2 PVU)

Fig. 5 Simulated radius-height cross section of the azimuthal mean fields at $t=14$ h
(a. Radar reflectivity (shaded area) and tangential winds (solid lines) at interval of 5 m/s; b. Vertical velocity at interval of 1 cm/s (gray shaded area are for vertical velocity between 0 cm/s and -1 cm/s; dark shaded area are for those lower than -1 cm/s, dashed lines is for vertical velocity equals to 1 cm/s) and the cross section flow vectors; c. Equivalent potential temperature (solid lines) at interval of 4 K and the relative vertical vorticity component (dashed lines) at intervals $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ with positive values shaded; d. Potential vorticity at 2 PVU interval)

4 结 论

(1) 利用水平分辨率为 3 km 的中尺度模式 MM5, 可以模拟出 Winnie 台风的特大眼以及双眼壁结构。模拟台风的路径与强度和观测有较好的对应。

(2) Winnie 台风的对流区和风场分布都显示了明显的非对称性结构。

(3) Winnie 的外眼壁和普通尺度的台风眼壁类似, 同时也是一个最大风速环、暖湿环和正涡度环。内眼壁对应一个次极大风速环、暖湿环。涡度和位涡的最大值位于台风眼中心。

(4) 上升运动控制整个内眼壁和 2 km 高度以上的外眼壁区域, 下沉运动则控制眼区和内外眼壁之间的广阔区域。径向入流位于外眼壁和内外眼壁之间的边界层, 流出则主要位于外眼壁的对流层中上层。

本文主要研究 Winnie 台风的特大眼结构特征, 但特大眼形成及其维持机制仍然是一个难题, 有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Lander M A. A tropical cyclone with a very large eye. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 137-142
- [2] JTWC. Super Typhoon Winnie. 1997 Annual Tropical Cyclone Report. 1997. 216pp. <http://www.npmoc.navy.mil/jtwc/atcr/1997atcr>
- [3] Weatherford C L. Typhoon structural variability. Colorado State University, Atmospheric Science Paper No. 391, 1984. 77 pp
- [4] JTWC. Typhoon Tip. 1979 Annual Tropical Cyclone Report. 1979. 191pp. <http://www.npmoc.navy.mil/jtwc/atcr/1979atcr>
- [5] Dunnagan G H, Diercks J W. An analysis of super typhoon Tip (October 1979). *Mon Wea Rev*, 1980, 108: 1915-1923
- [6] JTWC. Typhoon Carmen. 1960 Annual Tropical Cyclone Report. 1960. 219 pp. <http://www.npmoc.navy.mil/jtwc/atcr/1960atcr>
- [7] Anthes R A, Rosenthal S L, Trout J W. Preliminary results from an asymmetric model of the tropical cyclone. *Mon Wea Rev*, 1971, 99: 744-758
- [8] Anthes R A. The development of asymmetries in a three dimensional numerical model of tropical cyclone. *Mon Wea Rev*, 1972, 100: 461-476
- [9] Krishnamurti T N, Oosterhof D, Dignon N. Hurricane prediction with a high-resolution global model. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 631-669
- [10] Tripoli G J. An explicit three-dimensional nonhydrostatic numerical simulation of a tropical cyclone. *Meteor Atmos Phys*, 1992, 49: 229-254
- [11] Liu Y, Zhang D L, Yau M K. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 3073-3093
- [12] Davis C A, Bosart L F. Numerical simulations of the genesis of Hurricane Diana (1984). Part I: Control simulation. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 1859-1881
- [13] 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. *气象学报*, 2002, 60(5): 553-559
Zhu Peijun, Chen Min, Tao Zuyu, et al. Numerical simulation of typhoon Winnie (1997) after landfall Part I: Model verification and model clouds. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2002, 60(5): 553-559
- [14] 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. *气象学报*, 2002, 60(5): 560-567
Zhu Peijun, Chen Min, Tao Zuyu, et al. Numerical simulation of typhoon Winnie (1997) after landfall Part II: Structure evolution analysis. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2002, 60(5): 560-568
- [15] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 登陆热带气旋维持的次天气尺度环流特征. *气象学报*, 2004, 62(3): 257-268
Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. The characteristics of sub-synoptic scale circulation of tropical cyclones sustaining over land. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(3): 257-268
- [16] Betts A K, Miller M J. A new convective adjustment scheme. Part: II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data set. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1986, 112: 693-709
- [17] Reisner J, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1998, 124B: 1071-1107
- [18] Zhang D L, Anthes R A. A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitive tests and comparisons with SESAME-79 data. *J Appl Meteor*, 1982, 21: 1594-1609
- [19] Jorgensen D P. Mesoscale and convective scale characteristics of mature hurricanes. Part II: Inner core structure of Hurricane Allen (1980). *J Atmos Sci*, 1984, 41: 1287-1311
- [20] Black M L, Willoughby H E. The concentric eyewall cycle of hurricane Gilbert. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 947-957
- [21] Dodge P R, Burpee W, Marks Jr E D. The kinematic structure of a hurricane with sea level pressure less than 900 mb. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 987-1004
- [22] Chen Y, Yau M K. Spiral bands in a simulation hurricane. Part I: Vortex Rossby wave verification. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2128-2145

HIGH RESOLUTION NUMERICAL SIMULATION OF VERY-LARGE-EYE TYPHOON WINNIE(1997)

Zhang Qinghong

Department of atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract

Typhoon Winnie 1997 was one of the hurricanes that had extremely largest eyewall ever recorded. The diameter of Winnie's eyewall reached 370 km. Using the Penn State University/National Center for Atmospheric Research mesoscale model MM5 with 3 km grid horizontal spacing on the finest nested mesh, Winnie was successfully simulated in terms of track, intensity, eye and concentric eyewalls. The dynamic and thermal structure of concentric eyewalls was studied based on the model output. It was found that the concentric eyewalls was asymmetric both in observation and simulation. Winnie's outer eyewall was associated with a maximum wind ring, a warm moist ring and a high vorticity ring. The inner eyewall was associated with a secondary maximum wind ring and a warm moist ring. Upward motion dominated the whole layer of inner eyewall and the area above 2 km altitude of the outer eyewall. Downward motion was found inside the eye and the moat. Radial inflow happened at the boundary layer of the outer eyewall and the moat, but radial outflow dominate the middle and upper level of the outer eyewall.

Key words: Winnie 1997, Eye of typhoon, Concentric eyewalls.

张庆红：特大眼台风Winnie(1997)的高分辨率数值模拟

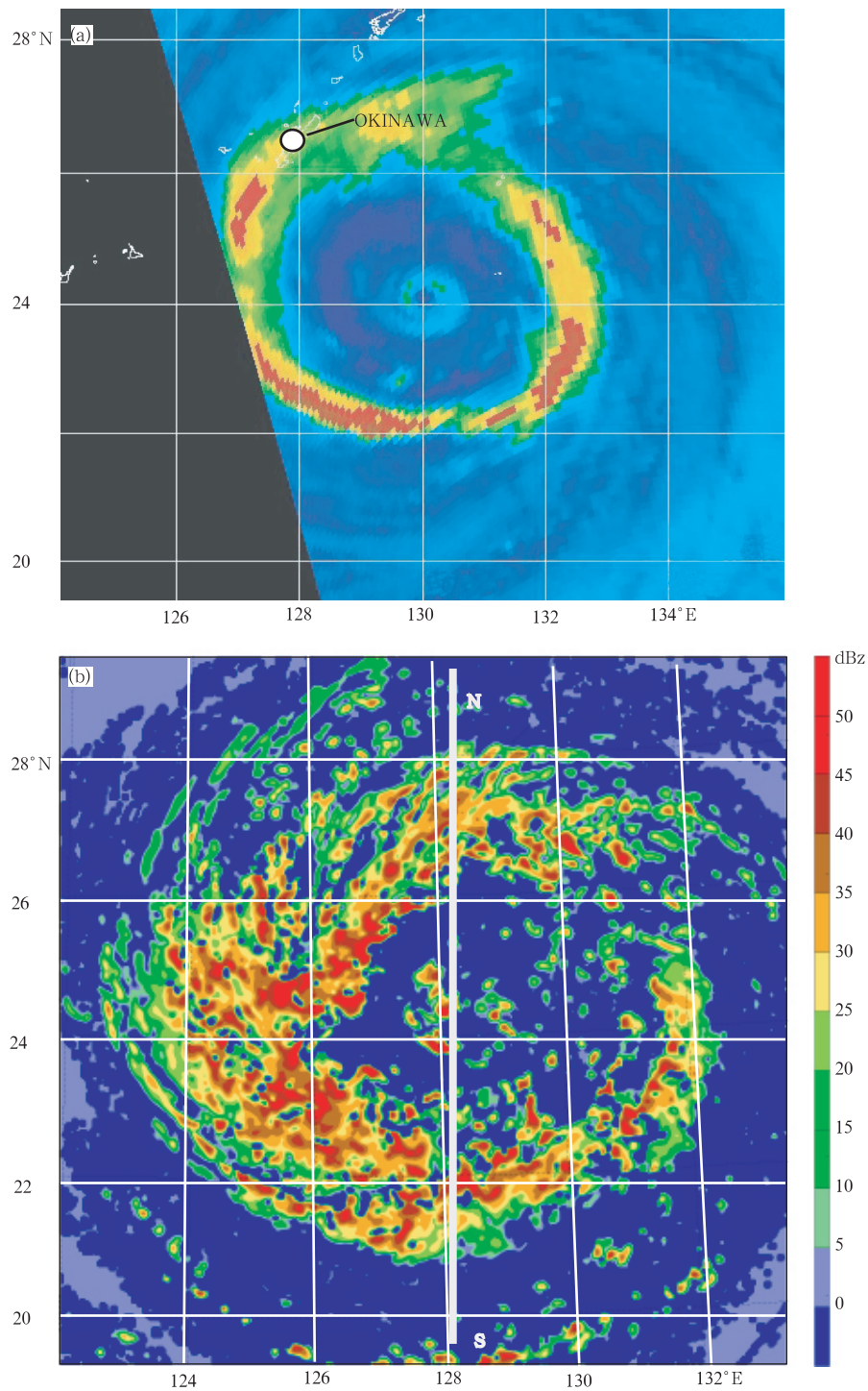


图3 1997年8月16日13:11 UTC 85 GHz 水平极化微波DMSP 图像 (JTWC 1997) (a)和模拟的 $t=14$ h (相当于1997年8月17日02:00 UTC) 2 km 高度的雷达回波 (b) (NS为图4剖面位置)

Fig. 3 horizontally polarized 85 GHz microwave DMSP imagery (after JTWC 1997) at 13:11 UTC 16 August 1997 (a) and simulated radar reflectivity of 2 km altitude at $t=14$ h (at 02:00 UTC 17 August 1997) (b) (NS is the location of the cross section on Fig.4)