

对南海热带气旋近海加强机理个例模拟研究^{*}

陈 光 华

(中国科学院研究生院, 北京, 100039; 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100080)

裘 国 庆

(中国国家气象中心, 北京, 100081)

摘 要

利用具有完备物理过程的中尺度模式 MM5 对发生于南海的 0214 号热带气旋(TC)“黄蜂”进行高分辨率的数值模拟, 以此来研究热带气旋在近海发展为强热带风暴过程中结构变化对强度的作用, 并对近海加强的内部动力机理做一些探讨。模拟结果发现在加强阶段, 气旋环流中存在类似于涡旋 Rossby 波性质的波动在西北侧对流激发下绕中心逆时针传播, 波动与眼墙区对流带相耦合, 使得眼区趋于闭合; 中尺度涡旋系统的轴对称化过程, 通过与对称环流系统非线性相互作用, 向气旋环流提供能量, 其自身也得到维持与发展。这些结构的变化对 TC 近海加强和登陆后迅速减弱都产生了重要的影响。

关键词: 热带气旋, 加强, 涡旋 Rossby 波, 轴对称化。

1 引 言

过去的 30 a, 由于多种探测手段的应用与动力模式的不断发展, TC 路径的预报得到了明显的提高。相比之下, 对 TC 强度及其变化研究却进展缓慢, 因此业务中的强度预报还是主要建立在统计的基础之上。除了海洋缺乏观测、模式分辨率不足以及初始场存在误差等因素以外, 对控制强度变化的物理过程了解不够则是根本的原因。

强度的变化受到诸多复杂物理过程的影响, 这些物理过程包括了内核区结构, TC 和海洋、大气环境之间多尺度的相互作用, 以及边界层动力和热力因子影响等。研究进一步指出^[1~3], 产生 TC 非对称性的中尺度过程对其结构与强度的变化至关重要。中尺度过程主要包含有对流耦合的涡旋—Rossby 波(VRWs)、内外圈螺旋雨带、嵌于 TC 环流内的中尺度涡旋。外部的环境气流也是通过这些眼墙的中尺度过程影响到 TC 的结构与强度变化。

国内外诸多研究^[4~6]对热带气旋中存在的 VRWs 进行了研究探讨, 主要是通过观测事实分析以

及简单物理模型的手段, 揭示了在无外源强迫下位涡(PV)的演变规律以及 PV 对热带气旋结构以及强度变化的影响。但在包含湿物理过程和外部强迫作用时, TC 强度的变化与 VRWs 的激发与传播是否存在一定联系, 这方面的工作还很少, 需要进一步用模式证实理想模式的结果。

线性理论认为, 在轴对称化过程中, 扰动向基流转化过程中是不断衰减的。例如: 在初始圆形涡旋上叠加沿方位角方向 2 波或 3 波的大振幅扰动, 结果扰动被带状基流吸收, 并使 TC 环流轴对称化的趋势^[7]。但近来根据非线性理论的研究^[8], 通过一定程度非线性相互作用, 可以使得基本气流加强的同时, 扰动涡旋的强度也得到维持和发展, 轴对称环流与中尺度扰动经历相互演变过程, 并导致了 TC 的增强。本文利用实例来考察中尺度扰动在 TC 强度演变过程中的作用。

2 模拟结果与天气分析

模式设计为三重双向嵌套网格, 为了捕捉 TC

* 初稿时间: 2004 年 6 月 30 日; 修改稿时间: 2004 年 10 月 12 日。

资助课题: 国家自然科学基金重点项目(40231005)。

作者简介: 陈光华, 1978. 12 月生, 在读博士。E-mail: cgh@mail. iap. ac. cn

内核区结构的细微变化,将最内层网格分辨率提高到 4 km,且网格中心区域伴随 TC 眼区一起移动。资料来源于中国国家气象中心 T213 全球谱模式再分析资料与实时的站点和探空资料,模拟时间从 2002 年 8 月 18 日 12 时(世界时,下同)到 20 日 00

时。将模拟的强度、路径、降水等与实况对比,证实了这次模拟的过程较为准确地反映了 0214 号热带气旋从近海加强到登陆阶段的结构与强度演变过程,这为进一步的分析诊断提供了较高的可信度。图 1 给出了路径和强度的对比。

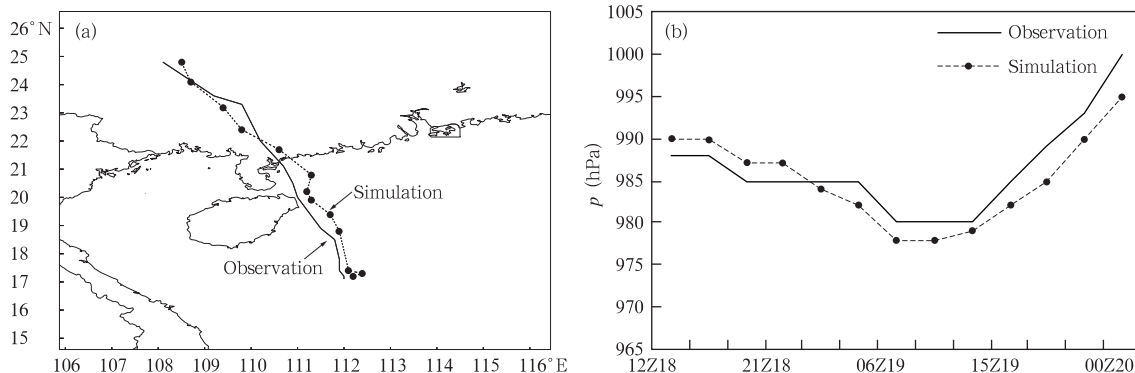


图 1 2002 年 8 月 18 日 12 时~20 日 00 时(世界时)TC 路径(a)和海平面最低气压(b)的模拟与实况

Fig. 1 Contrast between simulation and observation for TC track (a) and sea level minimum pressure (b), 12:00 UTC 18–00:00 20 August, 2002

从天气尺度系统分析热带气旋加强过程最初阶段,发现最显著的特征是在其西北侧有一股从中纬度南下的弱冷空气系统从对流层中层靠近并侵入内核区。同时 TC 东侧深厚的副热带高压加强西伸,从而引起 TC 东侧的位势梯度加大,增强了东侧的南风气流,使得由南海南部输送的水汽不断进入 TC 环流,为其加强过程提供了能量。西北侧低层暖湿、中层干冷的空气配置造成位势不稳定的层结构,从而有利于对流的发展。

3 涡旋 Rossby 波分析

将模式输出物理量从网格直角坐标系 (x, y, z) 转换到柱坐标系 (r, θ, z) ,然后分解为轴对称和扰动分量:

$$A = A_s + A_a$$

A_s 为轴对称分量, A_a 为扰动分量。

$$A_s(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A(r, \theta, z) d\theta$$

$$A_a(r, \theta, z) = A - A_s$$

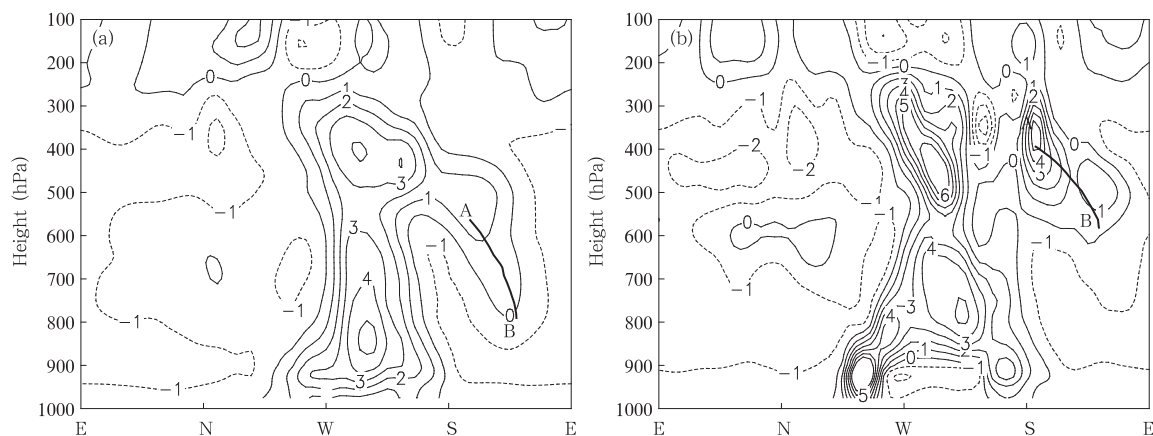
由于西北侧对流的激发作用,将不断地产生波动,并随基态的切向风气旋式传播。如图 2 为扰动 PV 在 $R=60$ km 处的方位高度剖面图。图中 A, B 标注显示,在 600 hPa 处,扰动 PV 的波峰在逆时针方向上 1 h 传播了约 30° ,在垂直方向移动了约 2.5 km,因

此波动在方位角方向上的移速约为 8.8 m/s,垂直移速约为 0.7 m/s。利用文献[1]公式

$$C_{pk} = \omega r / n = \bar{V} + \frac{d\bar{\zeta}/dr}{(k^2 + n^2/r^2)}$$

计算的理论传播速度来与模拟结果进行比较,其中 $\bar{V}$ 和 $\bar{\zeta}$ 分别代表轴对称的切向速度与相对涡度, k, n 表示径向和切向的波数, r 为半径距离。

由以上公式可以看出, C_{pk} 取值大小与 $d\bar{\zeta}/dr$ 密切相关。由于在 TC 环流中,轴对称的涡度中心基本上是集中在 TC 中心附近,因此 $d\bar{\zeta}/dr < 0$,波动方位向传播速度要比切向的基流速度小。由于中高层非对称性特征与切向波数 $n=2$ 较为相似^[9],径向 30 km 约为半个波长,以此求出的径向波数 k ,以及模拟得出的 $d\bar{\zeta}/dr$ 带入公式中,近似估计波动在切向上的传播速度约为 10.5 m/s。为计算波动在垂直方向上的传播速度,近似的采用公式 $C_{pz} = \omega/m = nC_{pk}/mR$ 进行估测,垂直方向约为 8 km 代表半个波长,计算得到的垂直传播速度比切向的偏小大概一个量级,约为 0.9 m/s,这与模拟出的波速量级基本一致。如图 3 所示,考察 $R=100$ km 处的波动, C, D 两线之间距离约为 35 km,方位向传播速度为 9.7 m/s,由公式计算得出的值约为 12.4 m/s,两者也较为接近,也显现有类似 VRWs 的特征。以上的分析结果表明不同半径都存在类似 VRWs 性

图2 2002年8月19日非对称PV在 $R=60$ km方位高度分布

(a. 03UTC, b. 04UTC)

Fig. 2 Asymmetric PV azimuth-time distribution in $R=60$ km on 19, August 2002

(a. 03UTC, b. 04UTC)

质的波动,并且围绕中心逆时针传播。另一方面,由于重力惯性波属于快波,所以叠加上切向基流 $\bar{V}$ 后,若是相对于基流气旋式传播,则位相传播速度要比基流的快;若相对于基流反气旋传播,则波动几乎

是静止的。本例中的情况不具有这种重力惯性波传播特征,这也从反面验证了此例中波动主要表现为VRWs的特征。

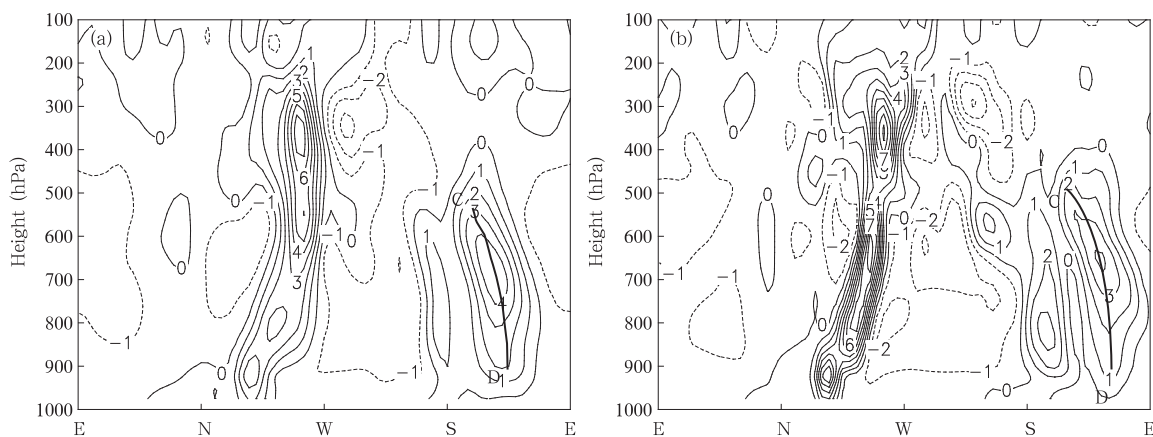
图3 位于 $R=100$ km,其他同图2Fig. 3 As in Fig. 2 but for $R=100$ km

图2,3都显示,在TC西北侧的PV值在TC的加强阶段不断地增加,作为扰源所激发产生的波动在不同半径上都表现出逆时针的传播性质,这使得眼墙与外围的螺旋雨带,也逐渐由西侧向南侧扩展延伸,使得原先雷达回波呈开口状的气旋南侧逐渐被强回波区所替代,眼墙逐渐趋于闭合,预示着“黄蜂”开始逐渐加强。从TC开始加强到最终达到强盛时期,在西侧上冷下暖空气配置使得对流制造的PV值不断加大,由扰源所激发波动的传播使得热带气旋加强为强热带风暴,并且伴随着眼墙趋于闭

合、收缩的过程。

TC登陆时,西南暖湿气流对TC的主水汽输送带减弱,同时冷空气已经从西侧的低层影响到气旋中心,改变了原有的大气稳定度层结,从而使得大气层结趋于稳定,对流活动受到了抑制。这种稳定层结的增强,减弱了为PV波动提供扰源的支持,所以在登陆阶段,波动的活动不再活跃,气旋南侧对流减弱,眼墙与外围螺旋雨带也趋于瓦解,并逐渐消失。在北部的大陆一侧,由于边界层摩擦辐合作用,仍存在较大范围的对流,但呈现出零散无组织的分布,并

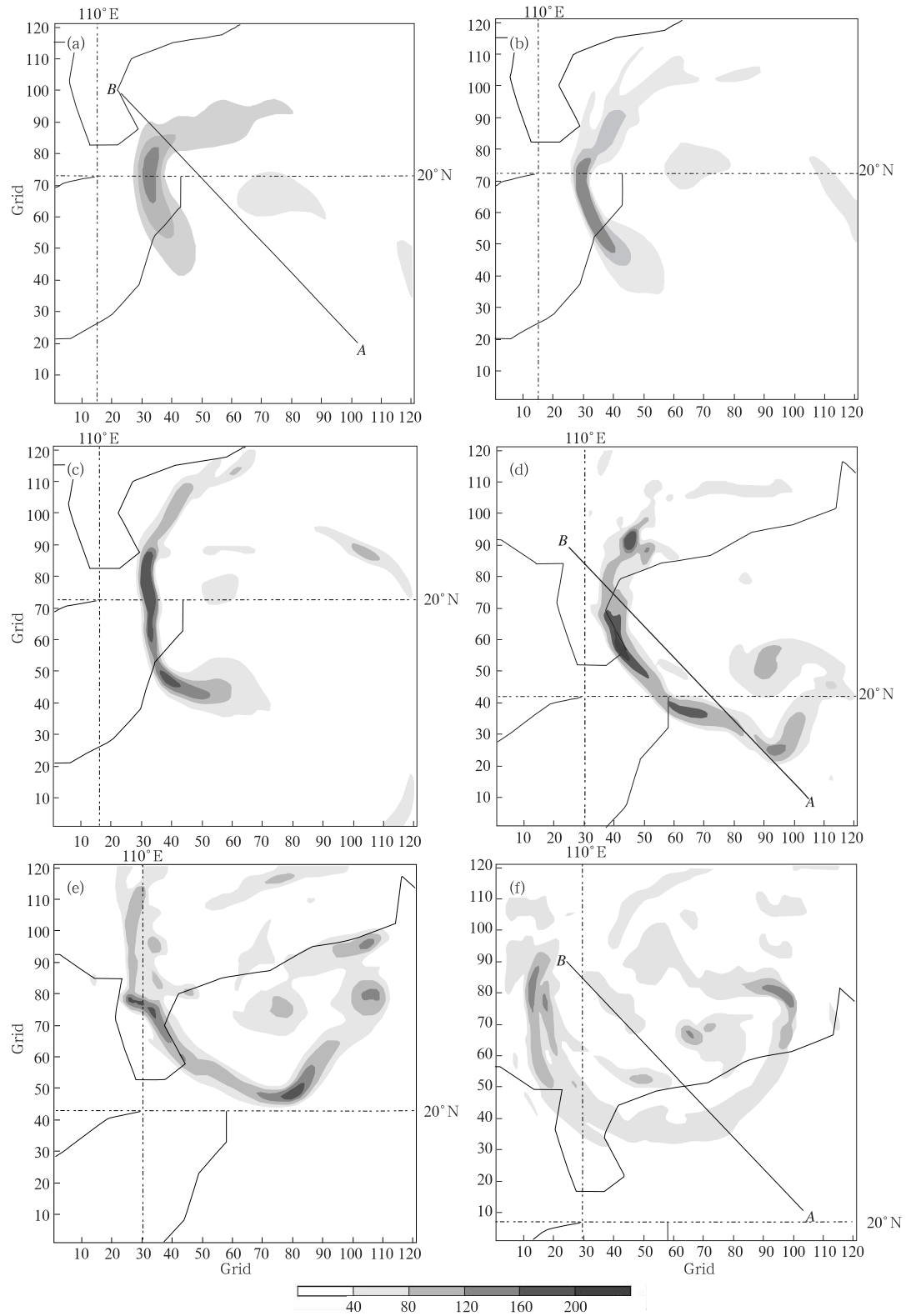


图 4 2002 年 8 月 19 日 850 hPa 相对涡度图(10^{-5} s^{-1})

(a. 00 UTC, b. 02 UTC, c. 04 UTC, d. 06 UTC, e. 09 UTC, f. 12 UTC)

Fig. 4 850 hPa relative vorticity contour(10^{-5} s^{-1}) on 19, August 2002

(a. 00 UTC, b. 02 UTC, c. 04 UTC, d. 06 UTC, e. 09 UTC, f. 12 UTC)

且对流发展也比较浅薄。从而使得登陆后 TC 迅速减弱,并最终在内陆地区消失。

4 中尺度涡旋演变

利用图 4 中的相对涡度场对中尺度系统进行分析。在加强的初始时刻(图 4a), β 中尺度的涡度中心位于 TC 的西北侧,且涡度中心的数值较小。在随后的 2 h(图 4b),涡度中心的强度明显加大,另一个显著变化是中尺度涡旋在径向方向上被压扁,而在切向方向上被拉长,同时向西南方扩散传播,径向的尺度大概为 20 km,而切向伸展的距离则为 150 km。其后的时间里,强度进一步的加大,中尺度涡旋在切向方向继续延长,同时分裂出几个更小的涡度中心。到 04 UTC(图 4c),中尺度涡度带已经部分传播到了 TC 的南侧,且此时涡度带切向伸展的长度约为 200 km。这种逆时针伸展和中心增强的趋势持续到 TC 发展的最强盛时刻(图 4d)。从 TC 强盛阶段到登陆这段时间内(图 4e,f),虽然中尺度涡旋继续气旋式的扩展,但是中心值开始减小了,登陆时 β 中尺度涡旋基本上均匀分布了。

研究结果表明^[10],即使台风涡旋始终处于环境风场和柯氏力场的非轴对称的强迫下,叠加在台风圆形基流上的扰动能量仍然会稳定地向基流输送,而导致扰动减弱。线性理论认为,在轴对称化过程中,扰动向基流转化过程中是不断衰减的。“黄蜂”在加强阶段也表现出了中尺度涡旋逐渐轴对称化的形式,但通过一定程度非线性相互作用,可以使得基本气流加强的同时, β 中尺度涡旋的强度也得到维持和发展,轴对称环流与中尺度扰动经历相互演变过程,并导致了 TC 的增强。这与准地转正压模式下的研究结果^[8]较为吻合。由此可见,TC 作为一个开放系统,存在着复杂的多尺度相互作用,使得中小尺度系统得以维持与发展。

5 结 论

本文从热带气旋结构与强度变化的观点出发,利用中尺度数值模式 MM5 对 2002 年 0214 号热带气旋“黄蜂”进行数值模拟。模拟结果较好地再现了“黄蜂”从近海加强到登陆减弱阶段的结构变化特征。

大尺度环境背景场中,TC 加强阶段,东侧深厚的副热带高压系统西伸,加大了南风气流,从而增强了水汽向核区的输送。西侧有冷空气活动,并从中

层侵入核区,加强不稳定层结。这些因素触发了 TC 强度的增强。

近海加强阶段,风暴内核区存在的中小尺度涡旋系统呈现轴对称化的趋势,通过非线性作用将扰动动能向基态环流转化,对 TC 强度的维持起到了一定的作用。利用 VRWs 理论,探讨气旋加强与减弱的成因机理,证实了气旋环流中确实存在有 VRWs 性质的波动。西北侧对流作为扰源,激发波动沿逆时针方向传播,使得眼墙与螺旋雨带逐渐趋于闭合,包围形成较为完整的眼区结构。而 TC 登陆后,水汽输送被切断且冷空气从底层侵入造成对流稳定度加大,使得扰源受到衰减,波动不再活跃,伴随着 TC 强度的减弱。

参考文献

- [1] Montgomery M T, Kallenbach R J. A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity change in hurricanes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1997, 123: 435—465
- [2] May P T, Holland G J. The role of spiral rainbands in tropical cyclones. *J Atmos Sci*, 1999, 56: 1224—1228
- [3] Montgomery M T, Enagonio J. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a three-dimensional quasigeostrophic model. *J Atmos Sci*, 1998, 55: 3176—3207
- [4] Moller J D, Montgomery M T. Tropical cyclone evolution via potential vorticity anomalies in a three-dimensional balance model. *J Atmos Sci*, 2000, 57: 3366—3387
- [5] 余志豪. 台风螺旋雨带—涡旋 Rossby 波. *气象学报*, 2002, 60(4): 502—507
Yu Zhihao. The spiral rain bands of tropical cyclone and vortex Rossby waves. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2002, 60(4): 502—507
- [6] 钟科, 康建伟, 余清平. 飓风中的涡旋罗斯贝波. *气象学报*, 2002, 60(4): 436—441
Zhong Ke, Kang Jianwei, Yu Qingping. Vortex Rossby waves in hurricane. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2002, 60(4): 436—441
- [7] MaCalpin J D. On the adjustment of azimuthally perturbed vortices. *J Geophys Res*, 1987, 92: 8213—8225
- [8] 罗哲贤. 台风轴对称环流和非轴对称扰动非线性相互作用的研究. *中国科学(D)*, 2003, 33(7): 686—694
Luo Zhexian. Nonlinear interaction of axisymmetric circulation and nonaxisymmetric disturbances in hurricanes. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 2003, 33(7): 686—690
- [9] Chen Y, Yau M K. Spiral bands in a simulated hurricane. Part I: Vortex Rossby wave verification. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 2128—2145
- [10] Carr L E, Williams R T. Barotropic vortex stability to perturbations from axisymmetry. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 3177—3191

A CASE SIMULATION STUDY ON OFFSHORE INTENSIFICATION MECHANISM OF TROPICAL CYCLONE IN SOUTH CHINA SEA

Chen Guanghua

(Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039;

Institute of Atmospheric Physics of CAS, Beijing 100080)

Qiu Guoqing

(National Meteorological Center, Beijing 100080)

Abstract

Full physical model MM5 has been used to simulate tropical cyclone “Huang-Feng” in August 2002. Adapting high resolution grids, the effect of structure changes on intensity in the process of intensification was investigated. The simulation catches evolution details to support further analysis.

During the process of intensification, there exist two different synoptic systems in the two sides of TC circulation. One is deep subtropical high, which stretches westwards and led adequate vapor into inner core; the other is cold vortex located in the west of TC, which induced cold air to surrounding of TC circulation through middle level to increase instability. These environmental conditions were favorable for TC intensification.

According to vortex-Rossby waves (VRW) theory to explore the mechanism of TC intensification, the results confirm that there exists Vortex-Rossby like waves, which are initiated by convection as perturbation source in the northwest of TC circulation. Vortex-Rossby waves, coupled with eyewall convective band and spiral rain band outside, propagate cyclonically in the process of intensification. Ultimately the propagation of waves leads to form a complete eye structure in the minimum bottom of sea level pressure. Mesoscale vortices axisymmetrization are found to transfer energy to parent vortex through nonlinear interaction. Meantime vortices also experience self-maintain and development process. These factors impact on the offshore intensification. After landfall, vapor channel is cut off and cold air penetrates low level to strengthen stability of troposphere. These unfavorable conditions weaken the convective activity and lead to decay of TC intensity.

Key words: Tropical cyclone, Intensification, Vortex-Rossby wave, Axisymmetrization.