

李勋, 李泽椿, 赵声蓉, 等. “珍珠”(0601)异常急翘路径和内核结构变化的诊断分析及数值研究[J]. 气象, 2010, 36(9): 1-8.

“珍珠”(0601)异常急翘路径和内核结构变化的诊断分析及数值研究^{*}

李 勋^{1,2} 李泽椿³ 赵声蓉³ 曾智华⁴ 王 勇¹

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 海南省气象台, 海口 570203

3 国家气象中心, 北京 100081

4 中国气象局上海台风研究所, 中国气象局台风预报技术重点开放实验室, 上海 200030

提 要: 使用 FY2 卫星 TBB 资料、NCEP 最终分析资料($1^\circ \times 1^\circ$)和中尺度模式 WRF, 对 0601 号强台风“珍珠”的“急翘”异常转向路径和内核结构变化进行诊断分析和数值模拟。结果表明:“珍珠”移向变化与环境引导气流和位涡倾向 1 波分量正异常有关,“急翘”前 12 小时,环境引导气流向北偏转,位涡倾向 1 波分量正异常对应着“珍珠”移动方向变化;内核非对称结构发展与环境风垂直切变演变有关,垂直切变使得涡旋倾斜,涡旋倾斜方向出现较强的上升运动,导致“珍珠”内核偏南象限对流活动较强。

关键词: 热带气旋, 异常路径, 位涡倾向, 涡旋倾斜

A Diagnosis and Numerical Study of an Abrupt Recurved Typhoon Chanchu and Its Inner Core Structure Evolution

LI Xun^{1,2} LI Zechun³ ZHAO Shengrong³ ZENG Zhihua⁴ WANG Yong¹

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

4 Laboratory of Typhoon Forecast Technique/CMA, Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030

Abstract: The abrupt recurved severe typhoon Chanchu and its inner core structure evolution are documented by using FY-2 TBB images, NCEP final analysis and the new generation mesoscale weather research and forecasting (WRF) model. Results show that the surrounding large-scale steering flow and potential vorticity tendency play important roles in Chanchu movement. The rightward deflection of Chanchu is indicated by the surrounding large-scale steering flow in advance. Chanchu is likely to move toward an area of maximum wavenumber-1 potential vorticity tendency. The evolution of inner core asymmetric structure is closely related to the environmental vertical wind shear. The shear-induced tilt of the vortex has a dominant influence on the maximum upward motion in the southerly quadrant of Chanchu.

Key words: tropical cyclones, abnormal track, potential vorticity tendency, vortex tilt

引 言

热带气旋(简称 TC)运动理论研究是气象界共

同关注的重要课题之一^[1]。统计分析结果表明,环境引导气流是影响 TC 运动的主要因素^[2-3]。数值试验的结果显示,非对称对流活动对于 TC 移动有一定的影响,即 TC 外围积云对流云团或上升运动

* 国家自然科学基金面上项目(40875039);国家自然科学基金重点项目(40730948);中国气象局上海台风研究所台风研究基金项目(2006STB07)共同资助

2008 年 10 月 24 日收稿; 2010 年 4 月 7 日收修定稿

第一作者:李勋,主要从事热带气旋和数值模拟方面研究。Email:cyrilpat@sina.com

区的吸引作用^[1,4]。研究^[5]指出,非均匀环境引导气流和 β 效应的相互作用也可对 TC 移动产生影响。该相互作用可产生非对称环流系统,即 β 涡对, β 涡对之间的气流即“通风流”,代表了 TC 运动方向^[6]。徐祥德等^[7]验证了“通风流”对 TC 运动的引导作用。Wu 等^[8]提出 TC 可被认为是环流背景中的位涡(以下简称 PV)异常,TC 的移动方向与 PV 倾向(以下简称 PVT)1 波分量正异常有关。Chan 等^[9]的研究结果验证了 PVT 理论的有效性。Yu 等^[10]应用 PVT 理论诊断分析了台风海棠(0505)靠近我国台湾岛时的近海打转路径。

TC 移向突然发生变化,往往会导致预报失误^[11]。研究^[12-14]分析了路径预报的难点,表明预报成功率受大气的可预报性问题影响。副高减弱断裂东退有利于 TC 西行北翘路径的出现^[11,15-16]。另外,张胜军等^[17]的数值结果表明,当水平最大风速位于 TC 环流的西南侧,台风 Helen(9505)表现为显著的西行北翘路径。

0601 号强台风珍珠(Chanchu)进入南海后移向突然发生变化,为典型急翘路径^[18]。李天然等^[19]根据 CIMSS 微波卫星探测亮温产品,发现“珍珠”转向过程以及转向后,内核螺旋雨带在其偏北象限减弱,偏南象限维持甚至加强,内核呈现非对称结构特征。西行北抬路径的 0606 号台风派比安也存在类似现象^[16]。雷达观测分析^[20]和高分辨率数值模拟研究^[21-23]发现在环境垂直风切变增大的情况下,内核结构趋于 1 波非对称。

本文使用 TC 定位资料(取自中国台风网“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”)、FY-2 卫星 TBB 资料、NCEP 最终分析资料($1^\circ \times 1^\circ$)对 0601 号强台风珍珠异常转向路径进行诊断分析和数值模拟研究,分析环境引导气流及 PVT 的演变,以及内核结构变化与环境垂直风切变的关系。

1 “珍珠”概况及转向前后内核结构演变

0601 号强台风珍珠于 2006 年 5 月 9 日(世界时,UTC,下同)加强为热带风暴,12 日穿越菲律宾群岛进入南海,稳定西行,并不断加强。14 日,控制华南和南海北部的副高减弱断裂^[19]。15 日 00 时,“珍珠”发生急翘,向偏北方向移动(图 1)。

转向前后 24 小时(14 日 00 时至 16 日 00 时)

TBB 方位角分布时间剖面(图 2)表明,转向后(15 日 00 时至 16 日 00 时)内核非对称结构特征十分明显,“珍珠”中心以北温度高于 -30°C ,对流减弱明显,该现象与“珍珠”CIMSS 观测^[19]一致。

什么因素影响了“珍珠”的转向运动?转向后内核非对称特征明显的原因是什么?本文将就这些问题展开分析。

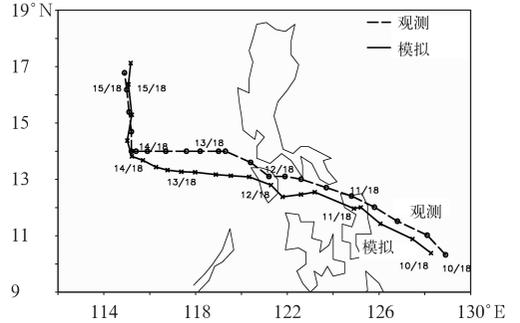


图 1 “珍珠”移动路径

(2006 年 5 月 10 日 18 时至 16 日 00 时,世界时,以下同,间隔 6 h,虚线为观测,实线为模拟)

Fig. 1 Tracks (6h) of Chanchu from the observations (dashed) and the model simulation (solid), valid at 1800 UTC 10 May to 0000 UTC 16 May, 2006

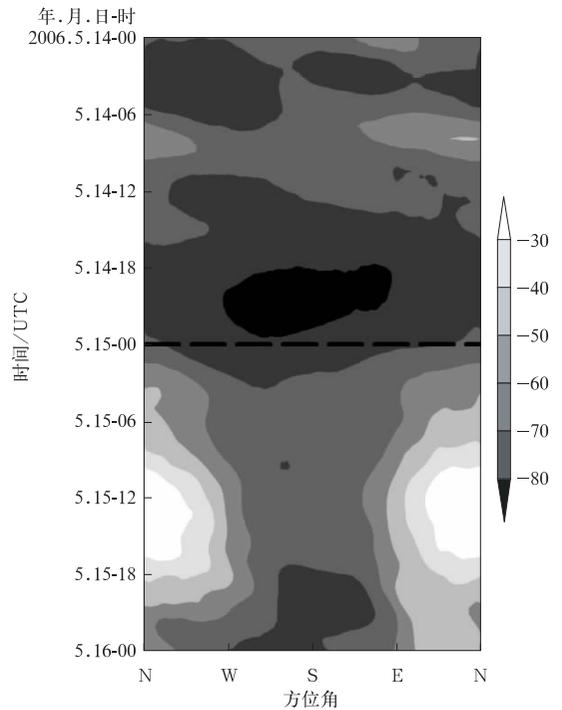


图 2 FY-2 卫星 TBB 方位角分布时间剖面,虚线表示“急翘”转向时刻,时间为 2006 年 6 月 14 日 00 时至 16 日 00 时,范围为距眼心 0~150 km 半径,单位: $^\circ\text{C}$

Fig. 2 Hovmöller diagram of radially averaged temperature of black body (TBB briefly, unit in $^\circ\text{C}$) of FY-2C between 0000 UTC 14 May and 0000 UTC 16 May from 0~150 km radius. The thick dashed line shows the time of the shift northward

2 异常路径诊断分析

2.1 环境引导气流

在环境引导气流与 TC 环流不发生相互作用^[2]的前提下,本文定义各等压面上围绕眼心 $5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 纬度半径圆环内的环境引导气流为:

$$V_s(p) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{5^{\circ}}^{7^{\circ}} Vr dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_{5^{\circ}}^{7^{\circ}} r dr d\theta} \quad (1)$$

深层平均(850~300 hPa)环境引导气流为:

$$V_{sf} = \frac{\int_{850 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} V_s(p) dp}{\int_{850 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} dp} \quad (2)$$

图 3a 是“珍珠”转向前后 30 小时各等压面的环境引导气流时间剖面(“珍珠”转向前后 30 小时),图 3b 是深层平均引导气流(steering flow)和实况路径(best track)。

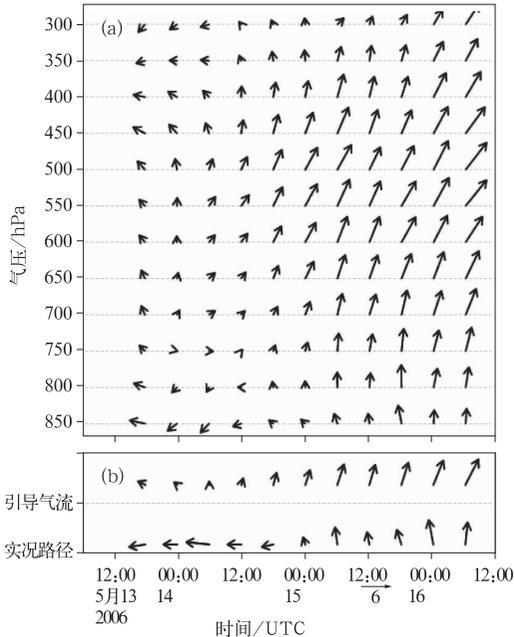


图 3 (a) 各等压面环境引导气流;(b) 深层平均环境引导气流和实况路径,时间为 13 日 18 时至 16 日 06 时,15 日 00 时为“急翘”时刻,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig. 3 (a) The steering flow at pressure levels;(b) the deep-layer mean steering flow and the best-track between 1800 UTC 13 May and 0600 UTC 16 May

由图 3a 可见,13 日 18 时—14 日 12 时,各等压面的环境引导气流较弱,与该阶段华南到南海北部的副高断裂为两环(图略),引导作用较弱^[19] 相对应。14 日 12 时以后,副高南落西伸,700~400 hPa

高度的引导气流逐渐加强,为偏南气流,风随高度顺时针偏转。高拴柱^[3] 研究发现,当环境地转基本气流从低到高呈顺时针偏转时,TC 多偏东或偏北方向运动。本文结果表明环境引导气流随高度顺时针偏转时,“珍珠”为偏北方向运动。

各时次的深层平均环境引导气流(图 3b)基本上体现了对应时次的各等压面引导气流特征。总的来说,“珍珠”转向前 12 小时,深层平均环境引导气流即向北偏转,“珍珠”转向后环境引导气流均指向偏北方向,但是与“珍珠”实际移向存在着一定的偏差。产生该偏差的主要因素可能是热带洋面上资料误差导致的环境引导气流计算偏差^[3],以及非均匀环境引导气流和 β 效应的相互作用,产生的“通风流”引导作用^[6-7,24]。下文分析“通风流”如何影响“珍珠”运动。

2.2 位涡倾向

文献[6]指出,TC 涡旋与行星涡度的相互作用可诱生非对称环流,其主要由围绕气旋中心的切向 1 波组成,气旋性的涡旋位于气旋中心的西南方向,而反气旋则在东北方向,表现为一对反向旋转的涡旋,称为 β 涡对(β -gyres), β 涡对之间的气流被称为“通风”流。已有研究^[19] 表明,“珍珠”南海活动期间,副高断裂为东西两环,华南地区以及南海北部存在冷空气活动,大气斜压性增强。此外,环境垂直风切变或者潜热释放也可改变大气温度层结,进而影响 PV 的分布^[9]。Wu 等^[8] 认为,将“通风流”理论应用于斜压 TC 运动,TC 可被认为是环流背景场中的正 PV 异常,TC 运动趋向于 PVT 的 1 波分量分布最大区域,即:

$$-C \cdot \nabla P_s = \frac{\partial P_1}{\partial t} \quad (3)$$

其中 C 表示 TC 运动方向, P_s 和 P_1 分别是位涡的轴对称和 1 波分量。该式表明,根据 $\frac{\partial P_1}{\partial t}$ 计算得到 PVT 的 1 波分量,即可判断 TC 运动方向。另外,文献[9]指出 $\frac{\partial P_1}{\partial t}$ 可分为四项,即:

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = \Lambda_1 [(\text{水平平流}) + (\text{垂直平流}) + (\text{非绝热加热}) + (\text{摩擦})] \quad (4)$$

Λ_1 符号表示提取 1 波分量。

Chan 等^[9] 认为, $\frac{\partial P_1}{\partial t}$ 的主要贡献来自于水平平流项(表示为 HA)和非绝热加热项(表示为 DH),即:

$$HA = -\mathbf{V} \cdot \nabla P \quad (5)$$

其中 \mathbf{V} 为风矢量,提取 1 波分量后,体现了 β 涡对之间的“通风”流对 PV 的输送作用以及:

$$DH = g \left(-\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \quad (6)$$

其中 u, v 分别为纬向和经向风, p 为气压, g 为重力加速度, Q 为对流加热率,根据文献[9], Q 可由下式得出:

$$Q = q_{\max} \frac{T_{BB} - T_b}{T_t - T_b} \quad (7)$$

其中绝对加热率 $q_{\max} = 25 \text{ }^\circ\text{C/d}$, T_{BB} 为云顶黑体辐射温度, $T_b = 273 \text{ K}$, $T_t = 193 \text{ K}$ 。该式表明 DH 项与非绝热加热以及风垂直切变有关^[9]。

图 4 给出了 PVT 的计算结果, PVT 、 HA 项和 DH 项的 1 波分量正异常分布较好地对应着“珍珠”路径移动方向。

“急翘”前(14 日 00 时—18 时),正 PVT 和 HA 大值中心位于“珍珠”中心的偏西象限(图 4a、b),正 DH 大值中心位于“珍珠”中心的西南象限(图 4c)。该时段“珍珠”为稳定西行路径,移动方向指向正 PVT 、 HA 和 DH 分布。

“急翘”时(15 日 00 时),正 PVT 、 HA 和 DH 大值中心均出现向“珍珠”中心西北象限转移的趋势,此时“珍珠”移动方向指向西北象限(图 4d、e、f)。

“急翘”后(15 日 06 时—16 日 00 时),正 PVT 、 HA 和 DH 大值中心均位于“珍珠”中心的偏北象限(图 4g、h、i),该时段“珍珠”路径指向北。

通过对比 HA 项和 DH 项量值大小,发现 HA 项量值较大(图 4b、e、h),说明水平平流作用对于“珍珠”的移动起主要作用。文献[9]指出,对于移向稳定的 TC ,一般是 HA 项起主要作用; DH 项一般是对移动相对缓慢、移向曲折多变的 TC 起主导作用。“珍珠”虽然发生了“急翘”转向,但是“急翘”前后其移向相对稳定, HA 项对“珍珠”移向起主要作用基本上验证了文献[9]的观点。

以上分析说明“珍珠”移动方向改变与 PVT 变化有关,其中水平平流作用(HA 项)起主要作用。

“珍珠”转向后, TBB 图像显示,“珍珠”中心的偏南象限对流活动旺盛,非对称结构特征明显(图 2),而正 DH 分布于其中心的偏北象限(图 4i),该现象与此阶段副高主体减弱断裂后导致环境场发生改变,进而引起风垂直切变的变化有关。正如 Chan 等^[9]所指出的, DH 作用不仅要考虑非绝热加热,还要考虑风垂直切变的影响。下文分析表明,“珍珠”转向后垂直切变明显增大导致“珍珠”内核呈现非对

称结构特征。

3 内核非对称结构分析

上文分析了环境引导气流以及“通风流”的引导作用。值得注意的是,“珍珠”转向后 TBB 非对称特征明显(图 2),已有的研究^[16、19]也发现类似现象,即 TC 向北转向后,内核出现明显的非对称结构特征。由于洋面观测资料不足以揭示“珍珠”内核对流活动,因此本文通过数值模拟研究考察“珍珠”转向后内核非对称结构明显的原因。

3.1 数值试验设计和结果处理

使用新一代中尺度数值模式 WRF(ARW2.2), 6 h 间隔的 1° 分辨率 NCEP 最终分析资料作为初始场。中心点为 (21°N , 119°E), 三重双向嵌套,垂直方向线性 Sigma 坐标 34 层,模式层顶 50 hPa,其他模拟配置请见表 1。经检验,数值结果较好地再现“珍珠”转向前后路径(图 1)、强度变化,以及内核非对称结构演变^①,因此数值结果可用于下文分析。采用 Braun 等^[21]的方法确定 TC 中心:根据气压场水平分布,以最低气压位置作为初猜值,在 15 km 半径范围内计算初猜值至眼壁外侧 90 km 半径的方位角偏差,直到中心至眼壁外侧的气压方位角偏差(the azimuthal variance, 气压非对称分量)之和最小为止,该点即为所求地理中心。由于涡旋倾斜使得各垂直层中心位置有所差异,因此该方法应用于各垂直层模式结果。

3.2 环境风垂直切变和内核非对称结构演变

环境风垂直切变是影响 TC 强度的重要因子^[25],也是影响垂直运动分布的重要原因^[26]。

本文以网格 B 数据,取 495 km 半径绘制垂直风切变时间剖面(图 5),考察风场垂直切变与 Chan-chu 内核结构演变的关系。具体算法依据 Hanley 等^[27]的方法,对于 u, v 分量,有:

$$\langle U \rangle = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{55} \left\{ \frac{\bar{U}_{i-1} + \bar{U}_i}{2} \right\} A_i \quad (8)$$

$$\langle V \rangle = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{55} \left\{ \frac{\bar{V}_{i-1} + \bar{V}_i}{2} \right\} A_i \quad (9)$$

其中符号 $\langle \rangle$ 表示 495 km 半径面积平均, i 表示半径索引, A_i 表示 9 km 圆环面积, \bar{U} 和 \bar{V} 表示轴对称处理,最后根据 $\langle \rangle_{200 \text{ hPa}} - \langle \rangle_{850 \text{ hPa}}$ 得到切变大小和下方方向(DSD)。

① 李勋,李泽椿,赵声蓉,等,强台风 Chanchu(0601)的数值研究:转向前后内核结构和强度变化。《气象学报》接收待刊

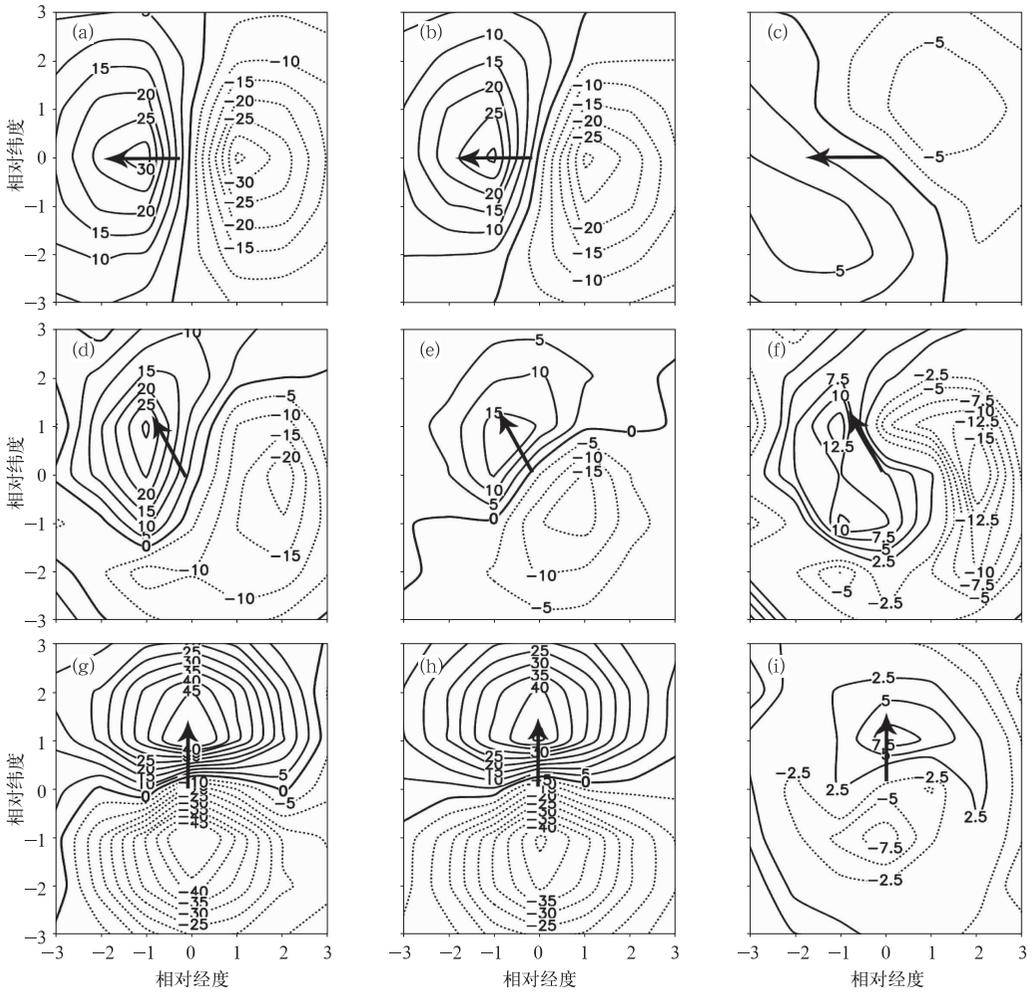


图 4 位涡倾向 1 波分量,分别是(a)14 日 00—18 时合成平均,(d)15 日 00 时,和(g)15 日 06 时—16 日 00 时合成平均;水平平流项 1 波分量,分别是(b)14 日 00 时—18 时合成平均,(e)15 日 00 时,和(h)15 日 06 时—16 日 00 时合成平均;非绝热加热项 1 波分量,分别是(c)14 日 00 时—18 时合成平均,(f)15 日 00 时,和(i)15 日 06 时—16 日 00 时合成平均。各项均为 500 hPa 高度,其中位涡倾向和水平平流项 1 波分量等值线间隔为 $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$,非绝热加热项 1 波分量等值线间隔为 $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。横纵坐标为相对经纬度,坐标(0,0)表示“珍珠”中心,黑色箭头表示台风移动方向

Fig. 4 The wavenumber-1 component of potential vorticity tendency from (a) composite averaged between 0000 UTC 14 May and 1800 UTC 14 May, (d) plots at 0000 UTC 15 May, and (g) composite averaged between 0600 UTC 15 May and 0000 UTC 16 May; (b), (e), (h) have the same time set as (a), (d), (g), but for the horizontal advection term; (c), (f), (i) have the same time set as (a), (d), (g), but for the diabatic heating term. All the plots at 500 hPa level. The plots are relative to the center of Super Typhoon Chanchu. [at coordinate (0, 0)]. The black arrow indicates the direction of Chanchu

表 1 模拟设计

Table 1 Simulation design

区域	网格 A	网格 B	网格 C
格点数	201×161	151×151	166×166
格距	27 km	9 km	3 km
时间步长	120 s	40 s	13.3 s
积分时间	0~180 h	49~180 h	132~180 h
微物理方案	WSM3	WSM3	WSM3
积云对流参数化方案	Betts-Miller-Janjic	Kain-Fritsch (new Eta)	None
边界层方案	Monin-Obukhov	YSU	Monin-Obukhov
	YSU	Monin-Obukhov	YSU
陆面过程	Noah	Noah	Noah

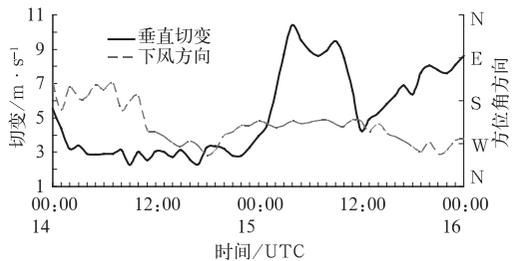


图 5 495 km 半径风场垂直风切变大小(黑实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和下风方向(虚线)时间剖面
Fig. 5 Time series of the area-averaged magnitude of simulated vertical shear between 200 and 850 hPa (solid) and the azimuthal distributions of the area-averaged vertical wind shears (dashed) over a circle of 495 km radius

环境风垂直切变在“珍珠”转向前后区别明显,当垂直切变增大,“珍珠”内核非对称分布与 DSD 有关。转向前(14日),副高减弱断裂^[19],切变较小,维持在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右(图 5),模拟的雷达回波分布较为对称(图 6a),距中心 100 km 半径内 35 dBz 的回波带围绕眼心一周,垂直上升运动也为准对称结构(图 7a)。15日 00 时“珍珠”发生“急翘”,副高南落西伸^[19],切变大小迅速增加至 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,DSD

指向西南(图 5),DSD 左侧的上升运动加强(图 7b),即“珍珠”偏南象限的上升运动加强,与此同时,“珍珠”偏北象限的回波减弱为 35 dBz 以下,偏南象限的螺旋雨带明显增强(图 6b),结构趋于 1 波非对称。与 Braun 等^[26]结果相似,强回波略微位于上升运动的下游。与文献^[23]研究结果一致,切变增大至 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,内核结构趋于 1 波非对称,强上升运动和回波主要位于“珍珠”的偏南象限。

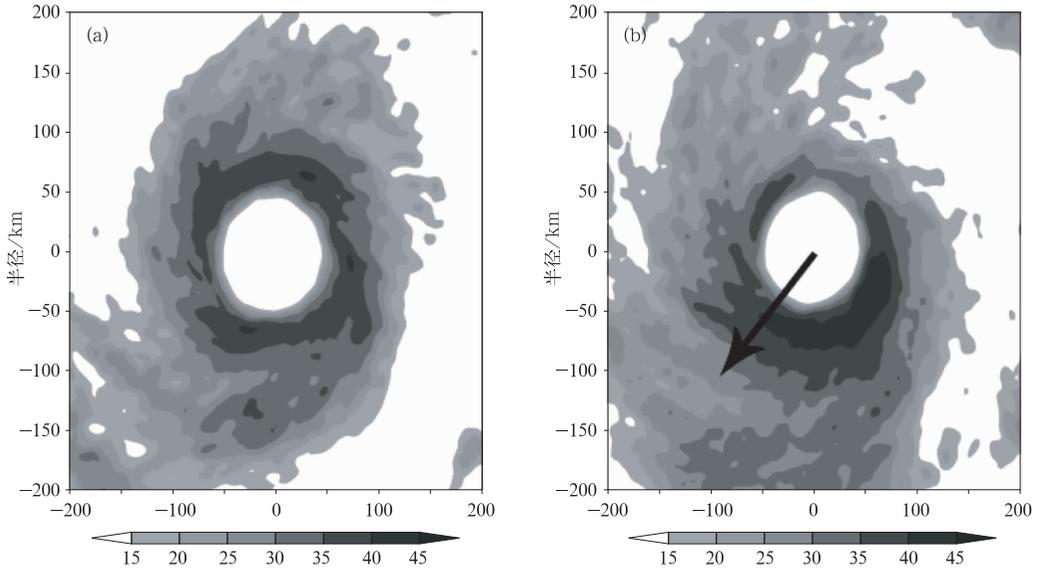


图 6 模式底层至 6 km 高度 24 小时平均的模拟雷达回波(单位: dBz), 横纵坐标为相对中心位置(单位: km), 坐标(0,0)表示“珍珠”中心, 分别是(a)14日 00 时—15日 00 时;(b)15日 01 时—16日 00 时

Fig. 6 Averaged simulated radar reflectivity structure between the lowest model level and 6 km height in 24 h from (a) 0000 UTC 14 May to 0000 UTC 15 May, and (b) 0100 UTC 15 May to 0000 UTC 16 May. The coordinate (0, 0) is the center of Chanchu. Arrows show the 24-h-averaged 850–200-hPa vertical wind shear vector

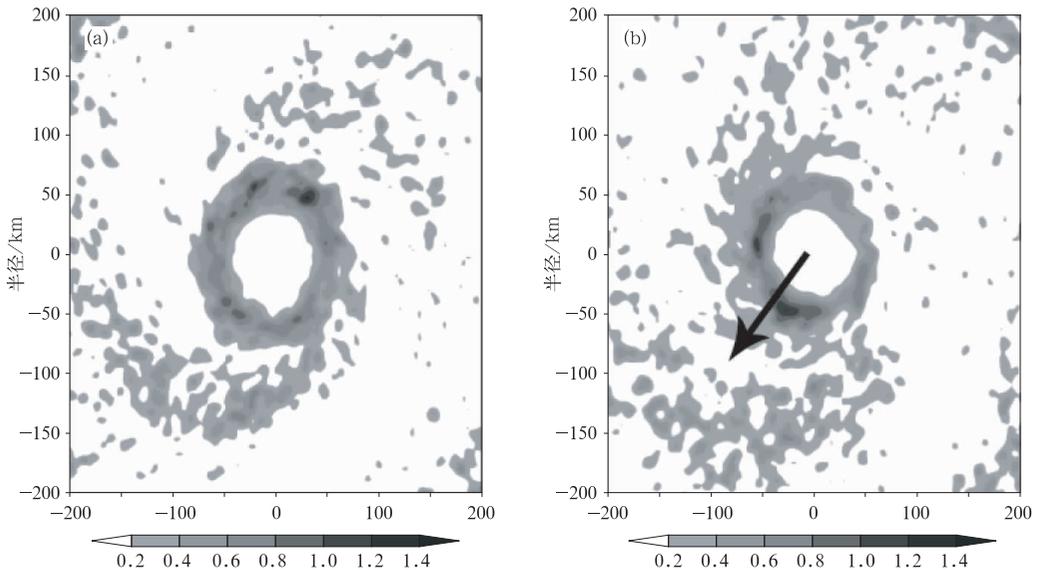


图 7 同图 6, 但为模式底层至 6 km 高度 24 h 平均的垂直速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 The same as Fig. 6, but for the vertical motion

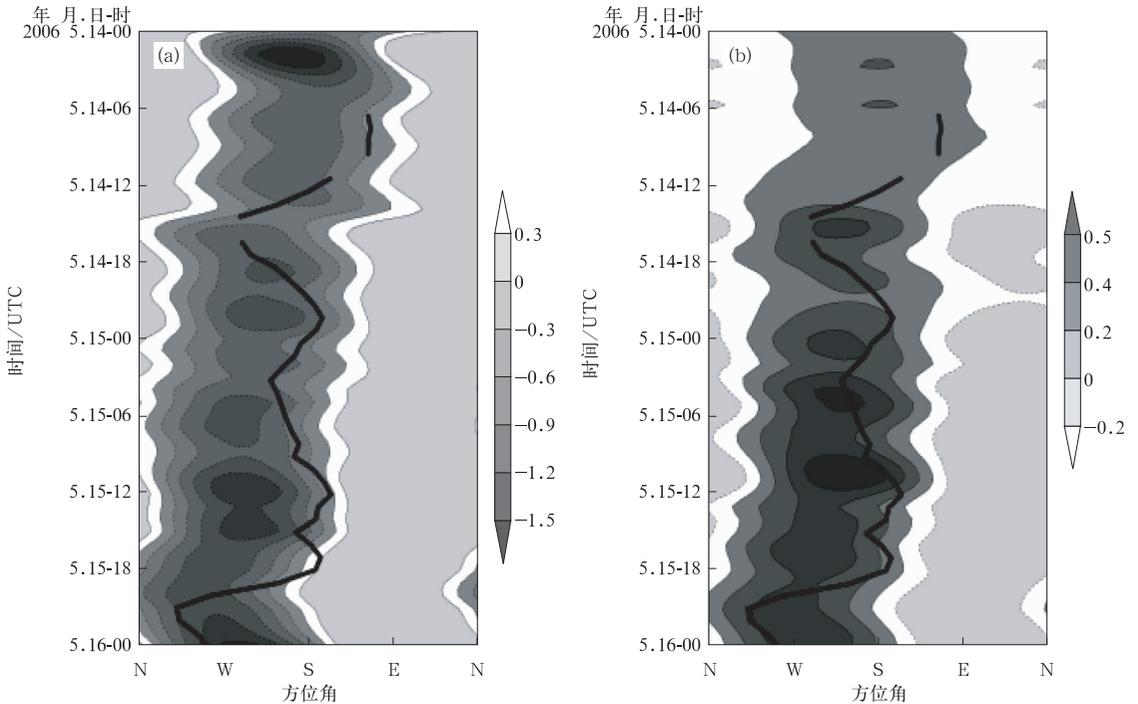


图 8 6 km 高度距眼心 30~60 km 半径径向平均 1 波非对称分量的位温(单位:K)和垂直运动(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)时间剖面,黑实线表示涡旋倾斜方向

Fig. 8 Time-azimuth distributions of wavenumber-1 (a) potential temperature (unit:K) and (b) vertical motion (unit in m/s) at 6.0 km averaged between radius of 30 and 60 km. The solid curves in (a) and (b) show the direction of vortex tilt. Dates and times are provided along the vertical axis together with date/time (UTC)

总之,“珍珠”转向前后内核结构变化与环境风垂直切变演变紧密相关。转向前切变较小,内核为准对称结构;转向后切变明显增大对应内核 1 波非对称结构的出现,上升运动增强并位于 DSD 的左侧。

3.3 涡旋倾斜

环境风垂直切变如何影响内核非对称结构分布呢?已有的研究^[21-22,26]指出在绝热涡旋情况下,涡旋倾斜可影响内核非对称结构。成熟的 TC 具有深厚的气旋性环流和强对流,可以抵抗一定的垂直切变,并使涡旋倾斜^[24]。切变的强弱与下风方向是涡旋倾斜变化的重要原因^[22]。研究^[21-22,24]还指出,涡旋倾斜引起涡旋倾斜方向(vortex downtilt directions,简称 VTD)一侧或右侧(反向一侧)出现上升(下沉)气流,导致冷(热)异常,涡旋气流与热力异常的相互作用使得较强的上升运动出现在 VTD 的一侧或右侧。为了考察涡旋倾斜对强上升运动分布的影响,根据文献^[21-22]的方法,分别确定 8 km 高度与海平面 TC 中心的相对位置(经过 9 点平滑处理,由于某些时刻涡旋倾斜不明显,使得某些时段倾斜不连续,为绘图方便绘制连续倾斜时段)表示 VTD。

图 8 给出 VTD 以及 6 km 高度 30~60 km 径

向平均 1 波非对称分量的位温和垂直运动时间剖面,可以看到 VTD 随时间变化为:14 日,07 时至 09 时,VTD 指向东南,12 时至 15 时,VTD 由东南方向反气旋式旋转至西南方向,14 日 17 时至 16 日 00 时,出现连续的 VTD,主要指向“珍珠”偏南象限。

对照 DSD(图 5),可以发现 VTD 基本上位于 DSD 的左侧,VTD 基本上与 DSD 方向变化一致,说明下风方向与涡旋倾斜变化有关。另外,1 波非对称分量位温冷异常主要位于 VTD 一侧或右侧(图 8a),“珍珠”转向后位温冷异常比转向前的略为明显。1 波非对称分量上升运动主要位于 VTD 右侧(图 8b),“珍珠”转向后(15 日 00 时)出现连续、明显的上升运动正异常,量值达到 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,对应着“珍珠”转向后明显的内核非对称结构(图 2),与文献^[19]中的 CIMSS 观测也是一致的。

以上分析表明,“珍珠”转向后环境风垂直切变增加,引起“珍珠”自身涡旋变化可能是偏南象限非对称结构形成的原因之一。

4 小 结

通过对 0601 号强台风珍珠南海西行急翘异常

路径的诊断分析和数值模拟,初步探讨其移向变化和急翘转向前后内核结构变化的原因,小结如下:

(1)“珍珠”移向变化与环境引导气流和位涡倾向 1 波分量异常有关。环境引导气流提前 12 小时指示了“珍珠”的急翘,以及对随后偏北移向,但是与“珍珠”实际移向存在着一定的偏差。位涡倾向 1 波分量正异常对应着“珍珠”移动方向,其中“通风流”对 PV 的水平平流作用起主要作用。

(2)内核结构变化以及非对称对流活动分布与环境风垂直切变演变密切相关。转向前,风垂直切变较弱,FY-2 卫星 TBB 观测以及模拟的上升运动和回波表现为内核准对称特征;转向后,风垂直切变增加至 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,内核呈现 1 波非对称结构,1 波非对称的上升运动和强回波均位于风垂直切变下风方向的左侧。环境风垂直切变影响内核非对称对流分布的可能机制是涡旋倾斜,涡旋倾斜方向出现冷的热力异常以及较强的上升运动,“珍珠”内核非对称结构加强。

致谢:感谢南京信息工程大学吴立广教授和审稿专家的宝贵意见。

参考文献

[1] 陈联寿,徐祥德,解以扬,等. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应[J]. 大气科学,1997,21(1):83-90.

[2] Chan J C L, William M G. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships[J]. Mon Wea Rev,1982,110:1354-1374.

[3] 高拴柱. 环境地转基本气流的计算及热带气旋运动与其偏差的统计分析[J]. 热带气象学报,2001,17(2):155-162.

[4] Willoughby H E. Linear normal modes of a moving, shallow-water barotropic vortex[J]. J Atmos Sci, 1990, 47: 2141-2148.

[5] Holland G J. Tropical cyclone motion; environmental interaction plus a beta effect[J]. J Atmos Sci, 1983,40:328-342.

[6] Fiorino M, Elsberry R L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion[J]. J Atmos Sci,1989,46:975-990.

[7] 徐祥德,陈联寿,解以扬,等. TCM-90 现场科学试验台风 FLO “β 陀螺”“通风流”非对称动力结构特征[J]. 气象学报,1996,54(5):536-543.

[8] Wu L G, Wang B. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion[J]. Mon Wea Rev, 2000,128:1899-1911.

[9] Chan J C L, Ko F M F, Lei Y M. Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion[J]. J Atmos Sci, 2002,59:1317-1336.

[10] Yu H, Huang W, Duan Y H, et al. A simulation study on pre-

landfall erratic track of typhoon Haitang(2005)[J]. Meteorol Atmos Phys,2007,97:189-206.

[11] 胡斯团,黄大文,张儒林. 南海北部热带气旋移向突变的气候特征[J]. 气象,1995,21(8):23-25.

[12] 高拴柱,孟智勇,杨贵名. 台风麦莎渤海转向的可预报性研究[J]. 气象,2009,35(2):8-14.

[13] 刘爱鸣,林毅,黄美金,等. 0713 号台风韦帕路径预报难点分析[J]. 气象,2008,34(10):27-33.

[14] 钱燕珍,张寒. 台风森拉克路径与预报难点分析[J]. 气象,2004,30(9):19-23.

[15] 陈坤林,欧阳桂生. 0212 号强热带风暴过程分析[J]. 气象,2003,29(9):47-49.

[16] 吴乃庚,林良勋,李天然,等. 环境流场和“派比安”结构变化对其异常北抬路径影响的诊断分析[J]. 气象,2007,33(11):9-15.

[17] 张胜军,陈联寿,徐祥德. Helen 台风(9505)异常路径的诊断分析与数值模拟[J]. 大气科学,2005,29(6):937-946.

[18] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社,1979,289-295.

[19] 李天然,吴婉萍,林良勋. 强台风“珍珠”异常路径的特点、成因及预报[J]. 广东气象,2006,29(3):18-22.

[20] Reasor P D, Montgomery M T, Marks F D, et al. Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 2000,128: 1653-1680.

[21] Braun S A, Montgomery M T, Pu Z. High-resolution simulation of Hurricane Bonnie(1998). Part I: The organization of eyewall vertical motion[J]. J Atmos Sci, 2006, 63: 19-42.

[22] Wu L G, Braun S A, Halverson J, et al. A numerical study of Hurricane Erin (2001). Part I: Model verification and storm evolution[J]. J Atmos Sci,2006,62: 65-86.

[23] Zhu T, Zhang D L, Weng F. Numerical simulation of Hurricane Bonnie(1998). Part I: Eyewall evolution and intensity changes[J]. Mon Wea Rev,2004,132: 225-241.

[24] 王斌, Elsberry R L,王玉清,等. 热带气旋运动的动力学研究进展[J]. 大气科学,1998,22: 535-547.

[25] Zeng Z, Wang Y, Wu C C. Environmental dynamical control of tropical cyclone intensity-an observational study[J]. Mon Wea Rev,2007,135: 38-59.

[26] Braun S A, Wu L G. A numerical study of Hurricane Erin (2001). Part II: shear and the organization of eyewall vertical motion[J]. Mon Wea Rev,2007,135: 1179-1194.

[27] Hanley D E, Molinari J, Keyser D. A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper-tropospheric troughs[J]. Mon Wea Rev, 2001,129: 2570-2584.

[28] 李勋,李泽椿,赵声蓉,等. “浣熊”强度变化的环境背景和卫星观测分析[J]. 气象,2009,35(12):21-29.

[29] 王新,方翔,邱红,等. 应用 AMSU-B 微波资料分析 0509 号 Matsa 台风水汽场分布特征[J]. 气象,2009,35(12):30-36.

[30] 涂小萍,许映龙. 基于 ECMWF 海平面气压场的热带气旋路径预报效果检验[J]. 气象,2010,35(3):107-111.