

魏超时, 赵坤, 余晖, 等. 2011. 登陆台风卡努 (0515) 内核区环流结构特征分析 [J]. 大气科学, 35 (1): 68-80. Wei Chaoshi, Zhao Kun, Yu Hui, et al. 2011. Mesoscale structure of landfall typhoon Khanun (0515) by single Doppler radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 68-80.

# 登陆台风卡努 (0515) 内核区环流结构特征分析

魏超时<sup>1</sup> 赵坤<sup>1</sup> 余晖<sup>2</sup> 王明筠<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 教育部国家中尺度灾害性天气重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京 210093

<sup>2</sup> 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

**摘要** 本文采用地基雷达轨迹显示技术 (Ground Based Velocity Track Display, 简称 GBVTD) 反演的雷达风场资料, 分析台风卡努 (0515) 在登陆期间近中心环流结构特征。轴对称环流结构分析表明, 登陆前卡努轴对称切向风速最大值出现在眼墙区域 2 km 高度附近, 最大风速半径随高度向外倾斜。轴对称径向入流主要位于低层, 而上升气流主要出现在眼墙区和外围雨带区内。台风最大风速半径在登陆前几乎不变, 但登陆后逐渐内缩。登陆过程中, 轴对称切向风速值总体随时间呈明显减弱的趋势, 但在中低层存在波动, 特别是在登陆前半小时, 切向风速突然增强。此外, 登陆后最大轴对称切向风速高度明显抬升, 伴随着外围雨带区上升流显著减弱。同时台风低层入流增强、厚度增加、范围向内和向外扩展。非对称环流结构显示: 登陆过程中, 台风眼墙区切向风环流和雷达回波均呈显著的一波不对称结构。其中大风速区和强降水区的位置相对于台风移动方向和垂直风切变方向有显著的规律性分布。由于卡努移动速度较快, 且登陆期间受强垂直风切变影响。因此, 其不对称结构应是垂直风切、台风移动和陆气相互作用三者共同作用的结果。

**关键词** 登陆台风 地基雷达轨迹显示技术 轴对称环流结构 非对称结构

**文章编号** 1006-9895 (2011) 01-0068-13

**中图分类号** P444

**文献标识码** A

## Mesoscale Structure of Landfall Typhoon Khanun (0515) by Single Doppler Radar

WEI Chaoshi<sup>1</sup>, ZHAO Kun<sup>1</sup>, YU Hui<sup>2</sup>, and WANG Mingjun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Mesoscale of Severe Weather/Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

<sup>2</sup> Shanghai Typhoon Institute, Laboratory of Typhoon Forecast Technique, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

**Abstract** Landfalling typhoon Khanun (0515) was observed by the CINRAD WSR-98D radar on the southeast coast of China. This study documents the structure and evolution of typhoon Khanun's circulation during its landing by using circulation derived from the Ground Based Velocity Track Display (GBVTD) technique. The axisymmetric structure analysis results are revealed as follows: Before landfall, the maximum tangential wind existed in the eye-wall at about 2-km height and the radius of the maximum wind (RMW) tilted outward at about 30 degrees from the

**收稿日期** 2009-12-30, 2010-06-30 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421502, 国家自然科学基金资助项目 40975011、40505004, 中国气象局公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY200906004)

**作者简介** 魏超时, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达气象、中小尺度灾害性天气。E-mail: wcs81303@hotmail.com.

**通讯作者** 赵坤, E-mail: zhaokun@nju.edu.cn

zenith. Meanwhile the inflow was confined at the low level and strong updrafts existed in both eyewall and outer rain band. During the landfall stage, the axisymmetric tangential wind decreased obviously, accompanied with slight contraction of the RMW and few fluctuation of wind speed at the low level. After landfall, the low-level inflow intensified and expanded both inward and outward in the radial direction, while the maximum tangential wind was elevated to 3-km height. Meanwhile, the updraft in outer rain band weakened obviously. The asymmetric circulation structure analysis results exhibited the distinct wave-1 structure during landfall. Both the maximum tangential wind and the maximum rainfall have remarkable regular locations in relation to the shear vector and the storm motion. Since Khanun was fast-moving typhoon and was in an environment of strong vertical wind shear, its asymmetry structure could be attributed to the influences of vertical wind shear, storm motion, and land-typhoon interaction.

**Key words** landfalling typhoon, Ground Based Velocity Track Display (GBVTD) technique, axisymmetric circulation structure, asymmetric structure

## 1 引言

研究表明, 台风发展和维持的能量主要集中在内核区 (Riehl et al., 1950; Ooyama, 1969; Emanuel, 1986; ), 增进对台风登陆过程中台风内核区环流结构演变特征的研究, 对于台风预报而言, 具有重要意义。

多普勒雷达是国内外研究台风内核结构的主要工具。其中, 机载多普勒雷达的观测主要用于洋面上台风的内核区三维环流结构研究 (Marks and Houze, 1984, 1987; Marks et al., 1992; Reasor et al., 2000)。地基多普勒雷达主要用于研究登陆台风环流结构。目前, 地基雷达研究登陆台风环流结构较为成熟的方法为周仲岛等 (1994) 和 Lee et al. (1999) 提出的地基单多普勒雷达速度轨迹显示 (Ground Based Velocity Track Display, 简称 GBVTD) 技术, 该方法以单多普勒雷达观测到的径向风资料, 针对台风风场近似轴对称的特性与几何关系, 利用傅里叶级数转换, 定量反演出台风的主要环流结构 (包括轴对称及非轴对称切向风、径向风等)。近年来, GBVTD 方法已被用于分析多个台风在登陆期间的内核区结构 (Lee et al., 2000; 周仲岛等, 2002; Zhao et al., 2008)。其中, Lee et al. (2000) 的结果显示, 在台风登陆之前非轴对称环流呈现明显 1 波结构, 大风速区位于偏东象限; 随着台风接近陆地, 强度快速减弱, 最大风速半径内缩且随高度向外倾斜的情况趋于明显。Zhao et al. (2008) 分析了超强台风桑美 (2006) 的眼墙三维结构, 揭示了其登陆过程中双眼墙结构的变化特征。

由于我国新一代多普勒天气雷达网建成时间不

长, 其采集的高时间 (6 分钟) 空间分辨率 ( $1 \text{ km} \times 1^\circ$ ) 数据在登陆我国台风内核区环流结构特征分析中的应用仍相当有限, 我们对台风登陆期间结构演变特征的认识也还需要更多的研究来增进。本文将应用 GBVTD 技术和温州雷达数据, 分析 2005 年登陆浙江省的强台风卡努 (0515) 内核区环流结构的变化特征。

## 2 资料和处理方法

### 2.1 个例概述和资料来源

强台风卡努 (0515) 于 2005 年 9 月 5 日上午在雅浦岛东南偏东约 500 km 的西北太平洋洋面上形成, 随后向西北方向运动, 于 8 日加强为台风。10 日夜间进入东海海域并逐渐向浙江沿海靠近, 9 月 11 日 14:51 (北京时, 下同) 在浙江台州市路桥区登陆。登陆时台风中心附近最大风速 50 m/s, 风力 12 级, 近中心气压 945 hPa。登陆后强度逐渐减弱, 12 日凌晨在浙江省境内减弱为强热带风暴。图 1 是利用弱回波中心定位方法确定的卡努台风登陆前后移动路径图, 取 9 月 11 日 04:02~17:47 每隔 1.5 小时显示台风中心位置。

研究所用雷达数据来自于浙江温州的中国气象局新一代天气雷达, 雷达型号为 CINRAD WSR-98D, 波长 10 cm, 位于 ( $27.895^\circ\text{N}$ ,  $120.74^\circ\text{E}$ ), 高度为海拔 734 m, 包括 6 分钟一次的体积扫描雷达反射率因子和径向速度数据, 观测范围分别为 460 km 和 230 km, 径向分辨率分别为 1 km 和 0.25 km, 方位角分辨率均为  $1^\circ$ , 时间从卡努登陆前 3 小时到登陆后 1 小时。台风环境场资料使用日本气象厅 (JMA) 区域谱模式 (RSM) 20 km 分辨率的再分析资料 (Tsuyuki and Fujita, 2002)。

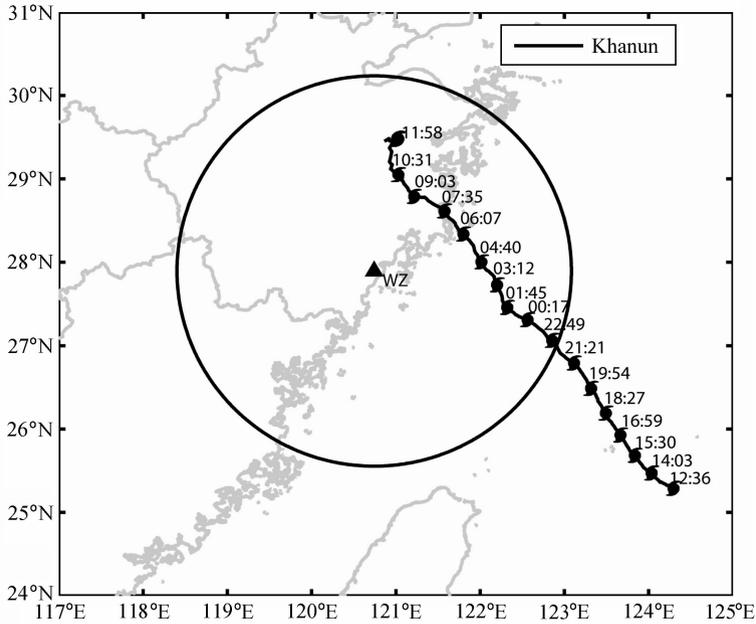


图1 卡努台风路径。黑三角：观测雷达所在位置；圆圈：雷达径向速度最大观测范围（半径为230 km）

Fig. 1 The track of typhoon Khanun with 1.5-h interval from 0402 LST to 1747 LST, 11 Sep 2005. Black triangle indicates the location of radar. Solid circle indicates the coverage of the Doppler radar radial velocity data at 230 km.

## 2.2 雷达资料预处理

利用美国国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, 简称 NCAR）提供的 SOLOII 软件（Software for radar translation, visualization, editing, and interpolation）(Oye et al., 1995) 对雷达资料进行质量控制，包括去除噪声点、去除地物回波、去除二次回波和速度退模糊。资料预处理后，利用双线性内插将雷达资料从极坐标插值到笛卡儿坐标的等高面上。

## 2.3 GBVTD 方法

GBVTD 方法基本原理是根据台风风场近似轴对称的特性，采用几何方法将雷达观测的径向风在以台风为中心的圆环上进行傅里叶级数展开。然后通过最小二乘拟合的方法获取台风的轴对称切向风、轴对称径向风和切向风较高次项的非对称分量。具体程序如下：首先确定台风中心位置，然后将数据转换到以台风中心为轴心的极坐标系进行反演分析。设定分析半径为 1~80 km，分辨率为 1 km，共 80 圈，分析高度 1~10 km，分辨率 1 km，共 10 层。当缺测数据点的方位大于 240° 时，所有风场分量均不分析；而当缺测数据的方位大于 180° 但小于 240° 时，则分析轴对称分量，相关处理程序可参阅周仲岛等 (1994)。得到轴对称环流后，可

进一步按照 Lee et al. (2000) 的方法计算轴对称垂直速度、涡度和扰动气压，公式如下：

$$\bar{w} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \int_{z=0}^{z=10\text{km}} \bar{\rho} \left( \frac{\partial \bar{V}_R}{\partial R} + \frac{\bar{V}_R}{R} \right) dz, \quad (1)$$

其中， $\bar{V}_R$  为轴对称径向风， $\bar{w}$  为轴对称垂直速度， $\bar{\rho}$  为空气密度， $R$  表示分析半径。平均切向风涡度计算公式如下：

$$\bar{\zeta}_R = \frac{\bar{V}_T}{R} + \frac{\partial \bar{V}_T}{\partial R}, \quad (2)$$

其中， $\bar{V}_T$  为轴对称切向风。因为台风的轴对称切向风近似的满足梯度风平衡，因此扰动气压公式如下：

$$\frac{\bar{V}_T^2}{R} + f\bar{V}_T = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial R}, \quad (3)$$

其中， $\bar{p}'$  表示轴对称扰动气压。

由于 GBVTD 方法进行反演时，需要首先定位台风中心。本文采用 Lee and Marks (2000) 提出的 GBVTD-SIMPLEX 方法，利用多普勒径向资料确定台风中心，以迭代的方法寻找具有最大轴对称切向风分量的估计中心，并结合统计的门坎设定，将一些不具代表性的中心去除。此外，为了保证中心的时间连续性，减少观测误差和随机误差的影响，利用 4 阶多项式拟合对 GBVTD-SIMPLEX 方法求得的中心进行时间连续性检测，剔除时间上不

连续中心, 最后得到一组时间和空间分布均为最优的台风中心。

过去研究 (Willoughby, 1992, Lee and Marks, 2000) 指出, 台风中尺度环流结构分析可能因几公里的中心定位差异而产生截然不同的结果。Lee and Marks (2000) 用理想的台风分析显示, 只有当台风中心定位误差小于轴对称切向风最大值所在半径, 即最大风速半径 (Radial Maximum Wind, 简称 RMW) 的 5%, GBVTD 方法反演的非对称结构才可信。GBVTD 反演的轴对称结构对中心定位的敏感程度则较非对称结构要低。本研究中卡努台风的 RMW=20 km, 因此如要定量分析其非对称结构, 则要求其中心定位误差必须小于 1 km。雷达中心定位结果显示, 在卡努台风登陆前后, 雷达最低仰角 (0.5°) 观测的台风中心离地面的高度从 3.1 km 降低到 2.4 km (图 2a), 这主要是因为卡努台风离雷达的距离较远 (>80 km), 受地球曲率的影响 (雷达波束随距离升高), 并且温州雷达所在地海拔较高 (约 730 m)。由卡努台风中心定位不

确定性值 [定义为: 多个猜测中心经 GBVTD-SIMPLEX 收敛到的中心均方根误差, 如果均方根误差越小, 表示中心收敛程度越好, 中心定位越精度越高, 详细计算参考 Lee and Marks (2000)] 随时间和高度的变化图显示 (图 2b), 12:01~14:21 期间, 3 km 高度上的中心不确定性较大, 平均值大于 1 km, 最大值约 4 km, 出现在 13:14。对比图 2a 显示, 该阶段台风中心距地面的高度在 2.5~3.2 km 之间, 因此低层台风中心附近的有效观测数据较少, 可能是此阶段 3 km 高度中心不确定性较大的原因之一。而在 4~8 km 高度上, 除个别时间存在较大的不确定性值外 (如在 11:56, 5 km 高度的中心不确定值达到 2.5 km), 整体中心不确定性比 3 km 高度小, 平均值小于 500 m。14:21~16:03, 3 km 高度的不确定性显著减低, 且 3~6 km 高度的中心不确定性值在大多数时间都小于 500 m。总体而言, 在分析期间, 在所有高度上中心定位的平均值小于 2 km, 因此, GBVTD 方法反演的轴对称结构比较准确。而对于非对称结构, 4 km 和 6 km 高度

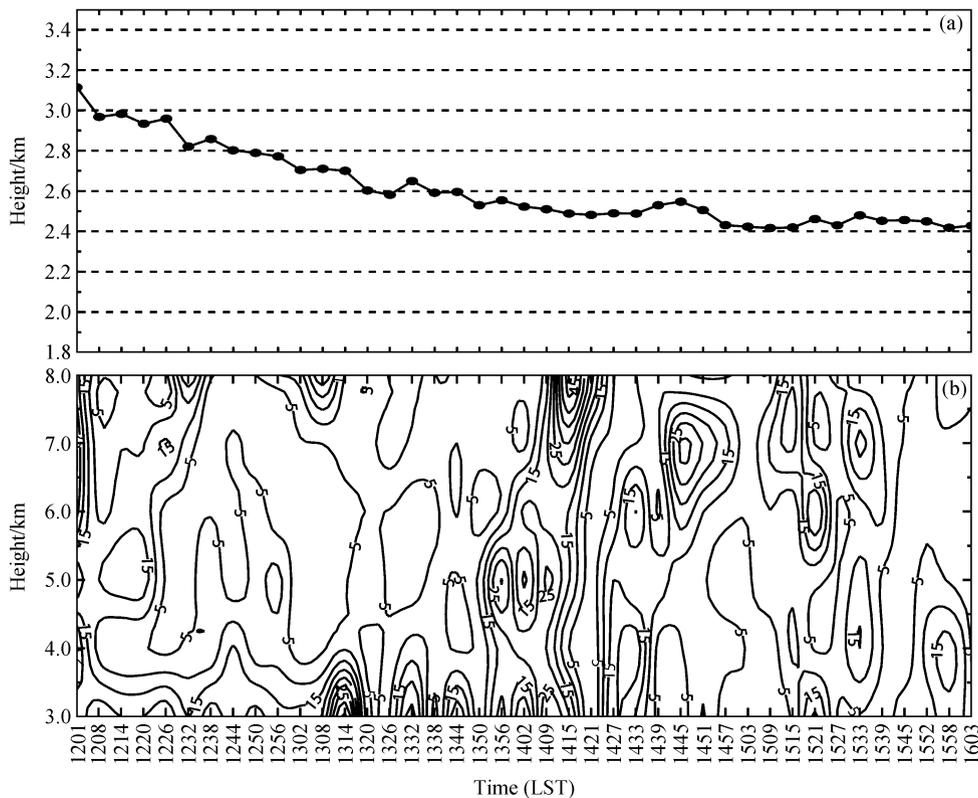


图 2 雷达最低仰角所能测到的 (a) 台风中心位置离地面的高度变化和 (b) 中心定位不确定性 (单位:  $10^2$  m) 随时间和高度的变化  
Fig. 2 (a) The evolution of typhoon center's altitude observed at the lowest elevation angle; (b) the time - height distribution of the circulation center uncertainty (units:  $10^2$  m) estimated from the GBVTD-simplex vortex center algorithm

的中心不确定性最小(平均值小于 1 km),符合 GBVTD 反演非对称风场精度要求,因此本文中关于台风环流非对称部分的分析将主要选用这两个高度上的反演结果。

### 3 分析结果

#### 3.1 轴对称结构分析

对 9 月 11 日 12:01~15:39 期间卡努近中心环流进行 GBVTD 分析,分析时间间隔为 6 分钟。在这期间,卡努台风中心环流完全进入雷达径向风场覆盖范围(150 km),是 GBVTD 分析的最佳范围。当登陆前台风刚进入雷达径向风场观测范围时,台风中心距雷达较远,由于波束随距离增高的原因,2 km 高度以下的反演结果大部分为缺省值,故在等高面图分析时以 3 km 和 5 km 高度的结果进行分析,但在作垂直剖面图时,为保证显示的连续性,采用缺省层顶之上的数据向下外延的方式对低层数据进行插值。

图 3 为 3 km 和 5 km 高度上轴对称回波和切向风分量的时间变化序列图。轴对称回波显示,在 12:01~14:15 期间(登陆前 3~0.5 小时),3 km 高度(图 3a)的眼墙位于 20 km 左右,其回波强度约 30 dBZ,而眼区附近为弱回波区。随后,眼墙逐渐内缩增强,其回波强度于登陆后 0.5 小时增强至 35 dBZ,台风眼最终被降水所填塞。此眼墙内缩增强现象在 5 km 高度的回波图上(图 3b)也清晰可见,但 5 km 高度的雷达回波强度较 3 km 高度弱。轴对称切向风显示,在 3 km 高度上(图 3c),登陆期间轴对称切向风速总体随时间呈明显减弱趋势,但其中存在一些波动,如在 12:01 和 12:44 出现速度极值为 40.8 m/s 和 40.4 m/s。此波动现象在台风纳莉中也被观测到(高聿正,2003),可能与台风不对称结构的变化有关,而登陆的影响是另一个可能的原因。台风最大风速半径(定义为轴对称切向风的最大值所在半径,下同)在 12:01~14:51(即登陆前 3 小时至登陆时)没有明显的变化,约为 19 km,在登陆后 1 小时略有缩小。值得注意的是,在 14:27~14:39,即登陆前 0.5 小时,切向风速突然从 35 m/s 增强至约 39 m/s,这种轴对称切向风在登陆前 1 小时内突然增强现象在过去一些登陆台风也被观测到(张保亮,2000; Zhao et al., 2008)。同 3 km 高度的轴对称切向风相比,5 km

高度的轴对称切向风速明显偏弱(图 3d),且随时间几乎是线性减小,未出现明显的波动现象。另外,在分析时间内,5 km 高度的最大风速半径在登陆前变化不大,但在登陆后减少约 1.5 km。轴对称涡度场显示,3 km 高度的最大涡度值集中在半径 20 km 内,在眼墙区外涡度值随半径逐渐减小(图 3e)。同 3 km 高度相比,5 km 高度涡度分布变化不大(图 3f),大涡度值同样也集中在 20 km 以内,但强度较弱。此外,两个高度图中最大涡度所在半径均随时间内缩,这同登陆后眼墙快速内缩一致。

为了定量了解登陆后台风眼墙内缩的特征,进一步分析最大风速及其所在半径随时间的演变[图 4(见文后彩图)]。图 4 中显示,3 km 高度最大风速半径在登陆前 2 小时内维持  $R=18\sim 20$  km,登陆 20 分钟后开始显著减小,在 40 分钟内减小至 15 km。而 3 km 高度最大风速在台风登陆前后总体呈减小趋势,从 40.8 m/s 降低(登陆前 3 小时)至 35 m/s(登陆后 1 小时)。5 km 高度的最大风速及半径的变化呈现同 3 km 类似的趋势。最大风速半径曲线采用了 5 点平滑处理。

图 5 是登陆前后轴对称环流结构的垂直剖面图。在登陆前半小时(14:21),轴对称切向风(图 5a)最大值风速出现在中低层,高度约 2 km、半径 20 km 的位置,约 38 m/s。最大风速半径随高度倾斜约  $20^\circ$ 。最大切向风位于低层且最大风半径随高度倾斜的现象,在多个登陆台风中(台风贺伯 1996、奥托 1998、碧利斯 2001 等)均被观测到,但不同台风倾斜程度有差异,这种结构出现的原因一般认为与角动量守恒有关。根据热成风关系,随高度的增加,切向风将减小,为保持角动量守恒,最大风速半径随高度增加(Jorgensen, 1984)。回波场(图 5a)显示,眼墙处存在一回波极值区( $>30$  dBZ),而在半径 30~70 km 处也可看到台风主雨带造成的强回波区。眼墙区强回波随高度向外倾斜,倾斜程度同切向风一致。轴对称径向风(图 5b)显示在 2 km 高度以上的分析区域内基本上为外流所控制,而主要入流位于眼墙强回波处的低层,入流强度低于 2 m/s 而在眼区周围低层是明显的出流区。垂直运动显示(图 5b),眼墙区( $R=20$  km)和外围雨带区( $R=50$  km)存在强上升运动,其中眼墙区的上升速度超过 6 m/s,而在上升

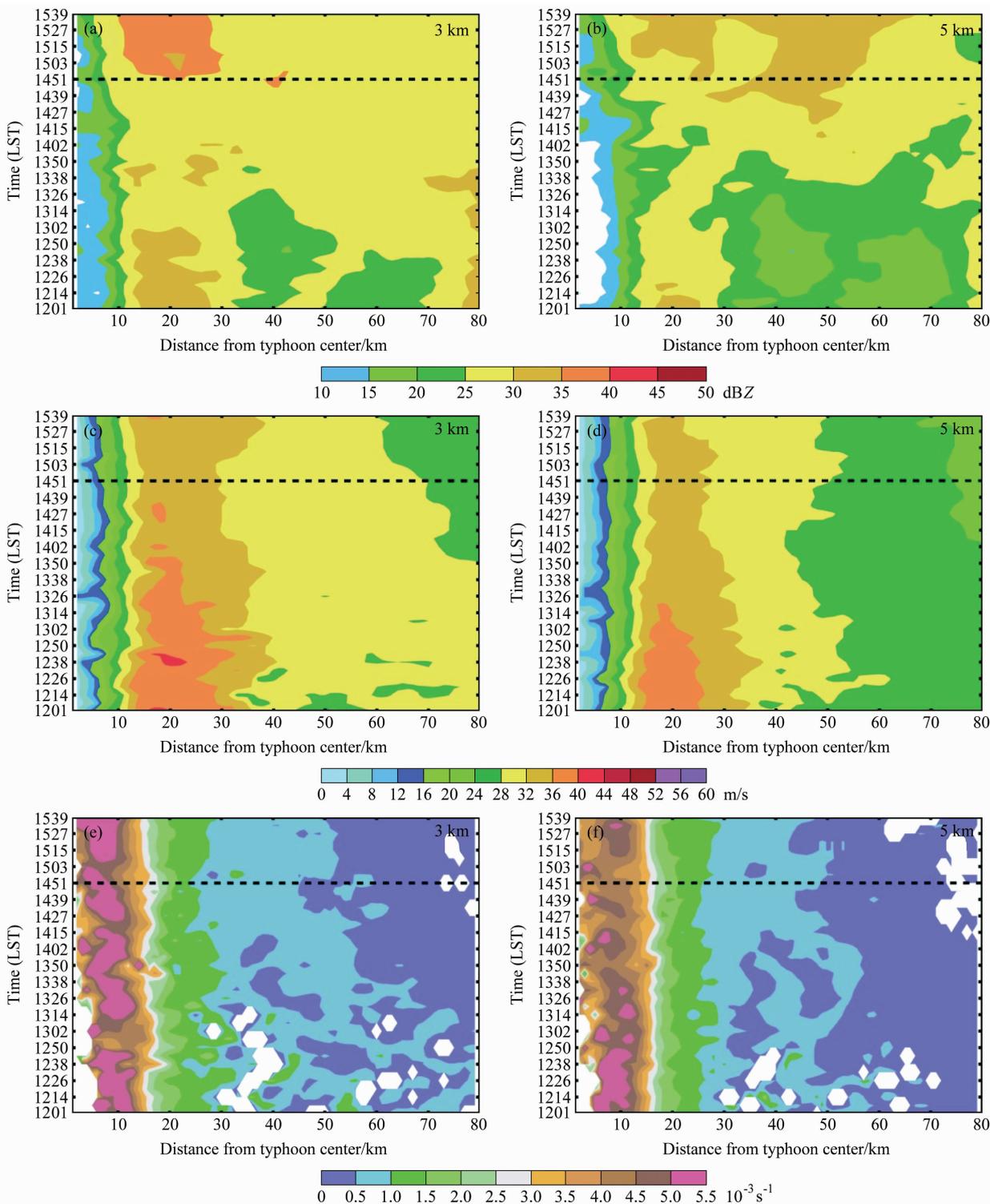


图3 2005年9月11日12:01~15:39期间(a、c、e)3 km和(b、d、f)5 km高度上(a、b)回波值、(c、d)轴对称切向风和(e、f)涡度值在不同半径上的环状平均值的时间序列图

Fig. 3 The radius - time distribution of annular-average (a, b) echo, (c, d) axisymmetric tangential winds, and (e, f) vorticities at (a, c, e) 3-km and (b, d, f) 5-km altitude during the period from 1201 LST through 1539 LST on 11 Sep 2005

运动两侧则分别伴随明显的补偿性下沉气流区，台风中心附近也为下沉运动所控制。角动量等值线

(图5c)在眼墙内侧接近垂直，而在眼墙区及外侧则随高度明显向外倾斜，其倾斜角 $<30^\circ$ ，同回波的

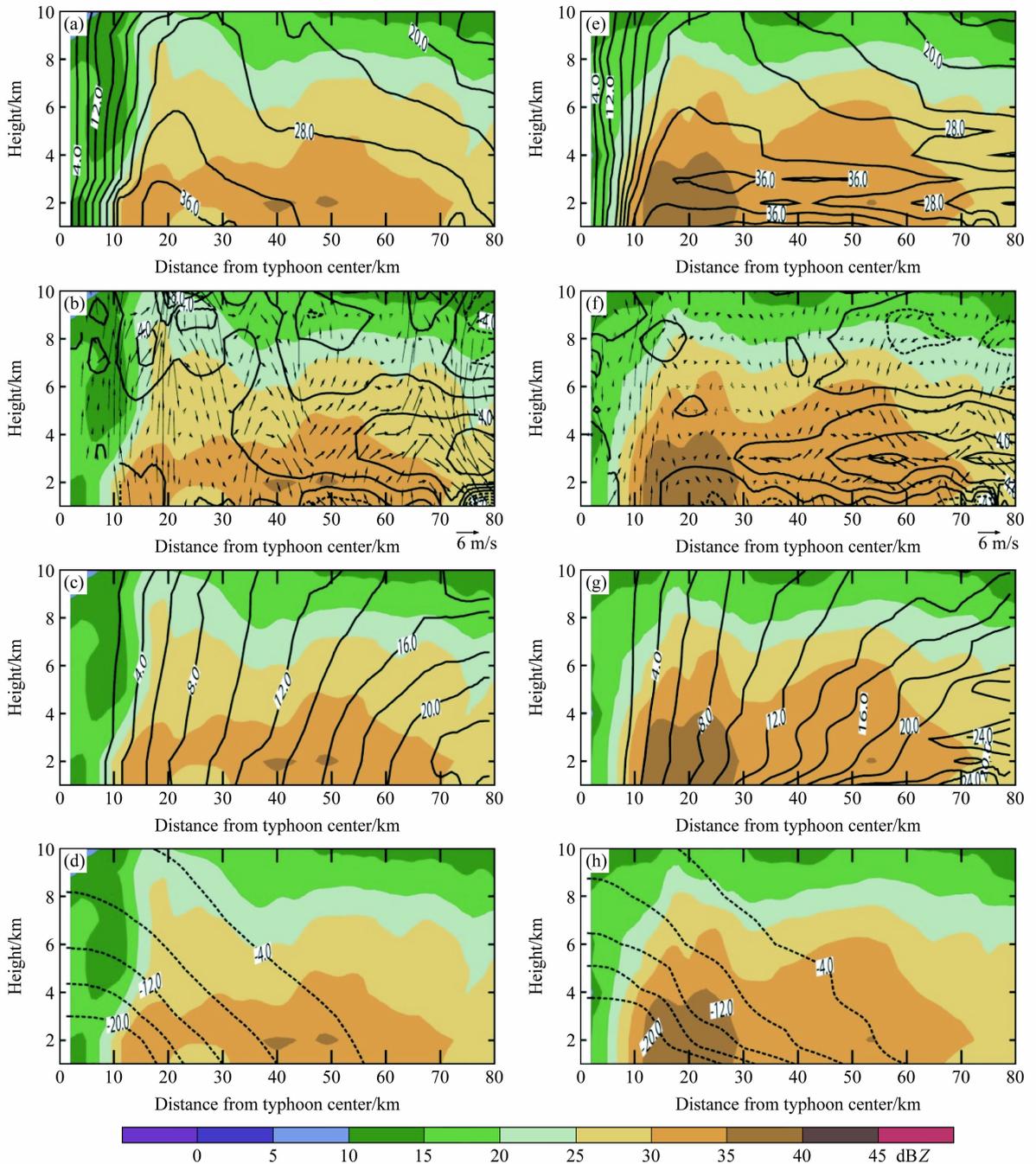


图5 (a-d) 14:21 和 (e-h) 15:21 时刻台风轴对称环流垂直剖面图: (a, e) 轴对称切向风 (单位: m/s); (b, f) 径向风 (单位: m/s) (矢量表示轴对称径向风和垂直速度矢量); (c, g) 轴对称切向风角动量 (单位:  $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ ); (d, h) 扰动气压 (单位: hPa)。实线: 正值; 虚线: 负值; 彩色: 回波强度

Fig. 5 Axisymmetric structures of (a, e) tangential winds (m/s), (b, f) radial winds (m/s), (c, g) angular momentum ( $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ ), and (d, h) perturbation pressure (hPa) at (a, b, c, d) 1421 LST and (e, f, g, h) 1521 LST. Vectors in (b, f) represent axisymmetric radial wind and vertical velocity. Solid (dashed) lines represent positive (negative) values; colors indicate the radar echoes

倾斜程度接近。水平扰动气压梯度随半径、高度递减, 中心最低扰动气压达到  $-20 \text{ hPa}$  (图 5d)。

至 15:21 (即登陆后半小时), 轴对称切向风的

最大风速半径向外移至  $R=28 \text{ km}$ , 最大风速值减弱至约  $37 \text{ m/s}$ , 但其高度升至约  $3 \text{ km}$  处, 同时最大风速半径随高度倾斜度略为增大, 达  $30^\circ$  左右

(图 5e)。回波垂直结构显示, 眼墙区回波显著增强, 最大值超过 40 dBZ, 而主雨带区的回波则明显减弱。轴对称径向风 (图 5f) 显示低层入流场 ( $Z < 2$  km) 明显增强, 最强入流达 4 m/s, 位于眼墙外 25 km, 高度 1 km 处。同时, 入流范围从眼墙内侧 ( $R = 15$  km) 扩展至  $R = 75$  km, 但厚度则随半径明显降低。过去许多登陆台风的研究均显示, 台风登陆后其近地层切向风会减少, 径向风速会增加 (Tuleya and Kurihara, 1978; 周仲岛等, 1994; Lee et al., 2000)。一种解释是台风登陆后摩擦增加导致近地层切向风减弱, 同时造成径向上气压梯度力大于离心力, 进而加强径向入流。另外, 在眼墙外  $R = 60$  km 处的中高层 ( $Z = 3 \sim 8$  km) 存在一气旋性次级环流。相应的, 在  $Z = 5 \sim 10$  km 存在一入流层, 最大入流强度 2.1 m/s, 位于  $Z = 8$  km。此高层入流在过去的观测 (Lee and Bell, 2007) 和模拟研究 (Rotunno and Emanuel, 1987) 中均被注意到, 但其同台风结构的关系至今并不清楚。垂直速度显示最强上升仍位于眼墙处强回波内侧, 而外围雨带区的上升运动有进一步减弱。扰动气压分布特征变化不大 (图 5h), 中心扰动气压值仍低于  $-20$  hPa。然而, 由周围的自动站观测显示台风中心附近的气压已经比登陆前升高 (图略), 因此, 台风中心绝对气压升高, 表明台风强度已逐渐减弱。

### 3.2 非轴对称结构分析

图 6 是非轴对称切向风场在 12:50~16:03 期间 4 km 和 6 km 高度的变化。所取的 4 个时刻 4 km 高度的中心不确定性分别为 730 m、630 m、476 m、425 m, 6 km 高度的中心不确定性分别为 790 m、222 m、534 m、128 m, 根据前面不确定性分析, 4 个时刻 4 km 和 6 km 高度中心定位误差均小于 1 km (RMW 的 5%), 因此可以定量分析非轴对称结构。在 12:50, 风场在 4 km 高度上呈现非轴对称波数 1 结构, 最大风速值达到 41.4 m/s, 位于眼墙区东北侧, 同眼墙区强回波位置一致。在 13:50, 40 m/s 风速区有所扩大, 位于眼墙区东侧, 并与强回波区重叠, 而最大风速值增加到 45.4 m/s。到 15:03, 最大风速减小到 41.5 m/s, 这时大风区和强回波区都逆时针转到眼墙区的东北侧。最大切向风和回波的相位都有随时间逆时针转动现象, 这一方面与台风环流的水平平流效应有关, 另一方面则与登陆时低层的摩擦相关。至 16:03, 整个环流仍

然呈波数 1 不对称结构, 最大风速区位于东北偏东侧, 且强风速区向外围雨带扩张, 30 m/s 的风区已位于眼墙外侧, 距眼墙 40 km 处的雨带区, 同时最大风速有所增强, 达到 42.3 m/s。

在 12:50~16:03, 6 km 高度上的切向风均呈现显著的非轴对称波数 1 结构, 与 4 km 高度相似, 但最大风所在相位较 4 km 高度呈明显的逆时针转动 (例如, 12:50 时 6 km 高度上 40 m/s 风区已逆时针移动到眼墙区北侧, 16:03 时 35 m/s 风区移动到眼墙区东北偏北侧)。此外, 6 km 高度上整体风速和大风区范围均小于 4 km 高度的风速和风区范围 (例如, 6 km 高度上 35 m/s 风速区的范围均比 4 km 高度的 35 m/s 风区范围小, 在 13:50 和 16:03 时 4 km 高度上最大风速值达到 45.4 m/s 和 42.3 m/s, 而 6 km 高度上对应最大风分别小于 45 m/s 和 40 m/s)。

过去的观测和数值模拟研究均显示, 环境垂直风切变和台风移动是影响台风内核区非对称结构的两个重要因子, 因此, 我们在这里尝试探讨它们对卡努台风内核区非对称结构的影响。

首先, 利用日本 20 km 分辨率再分析资料计算卡努登陆前后的环境风和垂直风切变 [计算方法参照 Hanley et al. (2001), 垂直风切变定义为 200 hPa 和 850 hPa 环境风矢量差], 讨论垂直风切变的影响。由计算的风切显示, 9 月 11 日 08:00 (图 7a), 垂直风切变数值为 8.8 m/s, 方向西南偏西  $260.8^\circ$ 。在登陆前 1 小时, 即 14:00 (图 7b), 垂直风切变减弱至 7.0 m/s, 但风切方向变化不大, 约  $261.8^\circ$ 。登陆后到 20:00 (图 7c), 垂直风切比 14:00 有所增大, 达到 7.9 m/s, 方向西南偏西  $250.2^\circ$ 。Reasor et al. (2000) 分析飓风 Olivia (1994) 发现, 环境垂直风切变是造成飓风 Olivia 波数 1 非轴对称结构的一个重要因素, 其中高度 3 km 以上的非轴对称波数 1 结构最大风速区出现在垂直风切变方向的右前侧到左前侧区域。Black et al. (2002) 基于机载雷达观测资料分析垂直风切变对东太平洋飓风 Jimena (1991) 和 Olivia (1994) 结构的影响 (两台风所处的环境垂直风切变均超过 10 m/s), 发现这两个台风的回波和垂直速度均呈波数 1 不对称结构, 其中最大回波值位于顺切变方向的左侧。随后, 以此观测建立垂直风切变影响下台风非轴对称结构的概念模型: 因垂直风切变的作用, 在顺切变方向激发上升

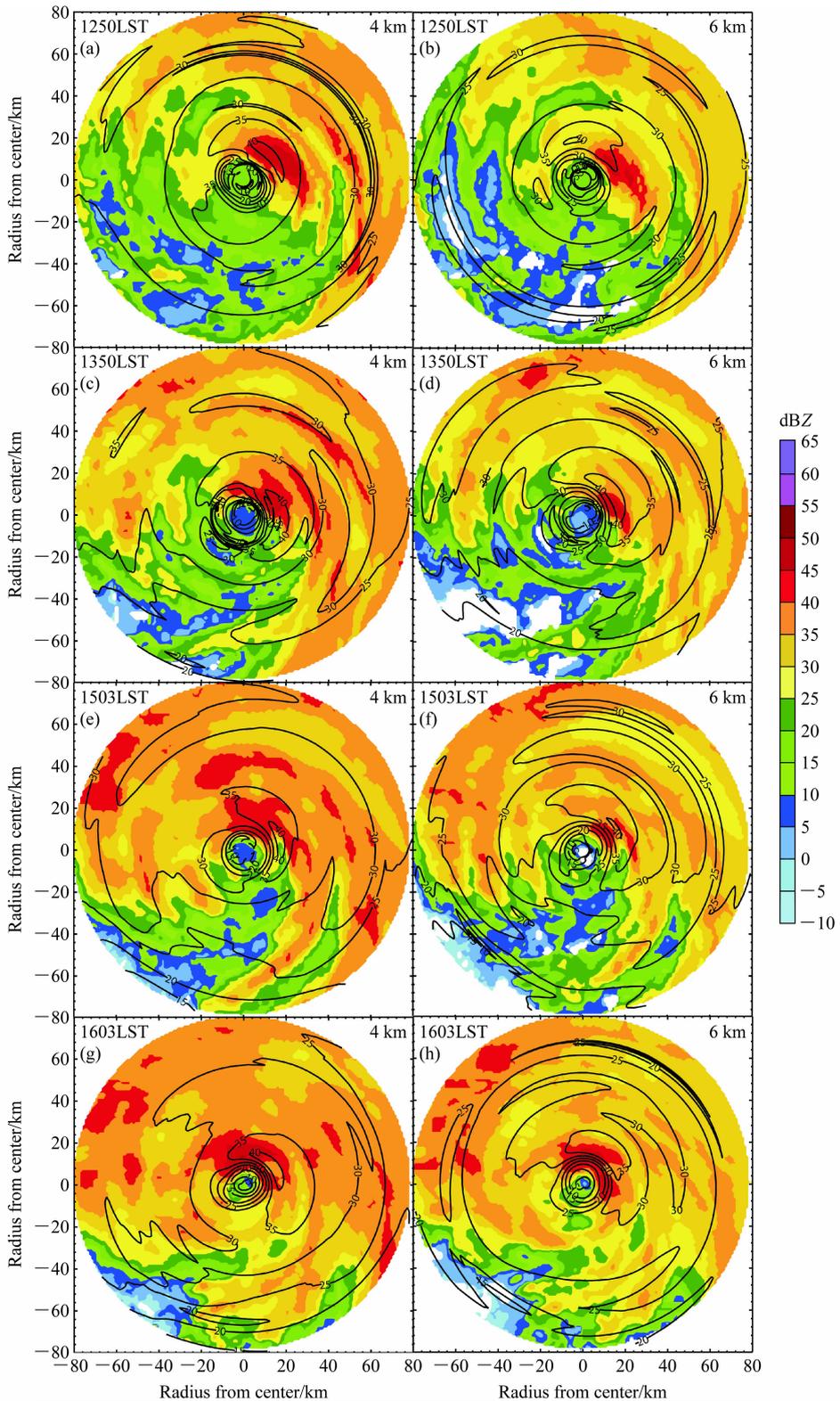


图 6 2005 年 9 月 11 日台风在 4 km ( a, c, e, g ) 和 6 km ( b, d, f, h ) 高度上的非轴对称风场平面结构图。实线：风速等值线，风速间隔 5 m/s；彩色：回波强度

Fig. 6 The structures of asymmetric tangential winds of typhoon Khanun on 11 Sep 2005 at  $Z=(a, c, e, g)$  4 km and (b, d, f, h) 6 km. Isolines represent wind speed and the contour interval is 5 m/s; colors indicate the radar echoes

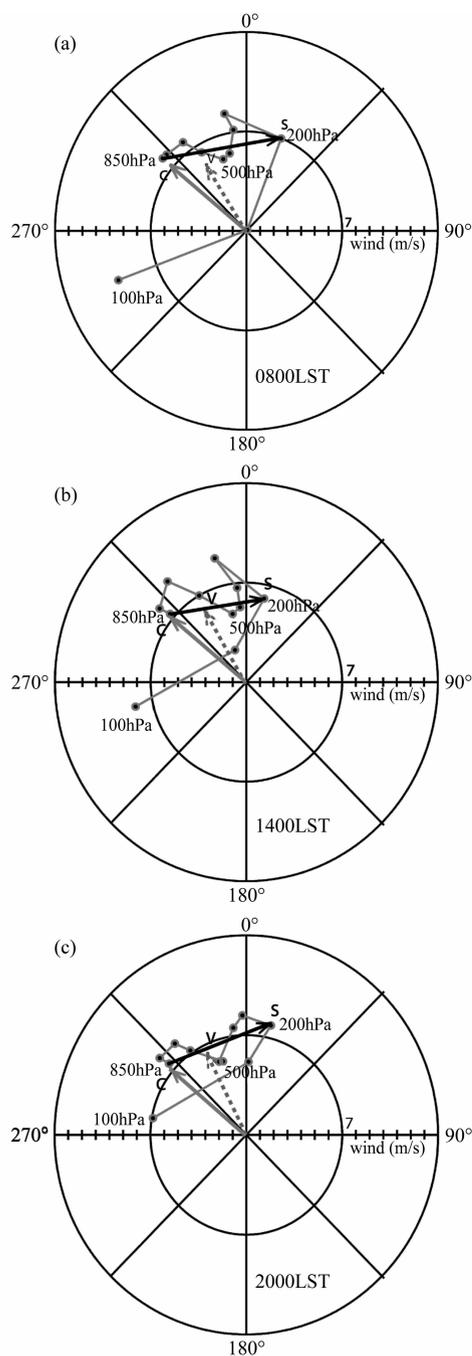


图7 2005年9月11日 (a) 08:00、(b) 14:00 和 (c) 20:00 的环境相对风场的矢量图。黑箭头 S: 200 hPa 和 850 hPa 之间的风矢量差; 灰色箭头 C: 台风移动路径; 虚线箭头 V: 整层平均风矢量

Fig. 7 Hodograph of the storm-relative wind of typhoon Khanun at (a) 0800 LST, (b) 1400 LST, (c) 2000 LST on 11 Sep 2005. The black solid arrow S indicates the shear between 200 hPa and 850 hPa, the gray solid arrow C represents the storm motion, and the black dotted arrow V represents the vertically averaged wind

气流。在台风环流和上升流的共同引导下, 低层的空气块从顺切变方向的右前侧进入, 然后向逆切变方向逆时针上升。此过程中, 对流单体不断发展至成熟, 并在顺切变方向的左侧产生强回波区。当引导气流到达顺切变方向的右侧时, 凝结物都已降落或抛出, 因此在顺切变方向的右侧中低层难以产生强回波区。Corbosiero 和 Molinari (2002) 进一步总结了过去观测和模拟研究中垂直风切对台风内对流不对称分布的影响, 研究结果归纳出, 垂直风切主要导致台风内核区对流发生在顺风切的左侧。图7分析显示, 卡努台风在登陆期间受一较强的垂直风切影响。配合垂直风切和最大切向风的位置(图6), 显示在 12:50~16:03 期间 4 km 高度内核区(特别是眼墙区)切向风和雷达回波均非呈显著的波数 1 非对称结构, 最大切向风出现的位置为垂直风切顺切变方向的右前方到左前方并略为偏左。最大回波位于顺切变方向的左侧, 与最大风速区位置较为一致。这些特征[图8(见文后彩图)]与过去观测的强垂直风切影响下台风内核区降雨和环流分布(Black et al., 2002; Shea and Gray, 1973; Reasor et al., 2000) 相当类似。由此推测, 垂直风切是影响卡努台风内核区降水和环流不对称的一个重要原因。

相对于垂直风切, 在分析期间卡努移动速度则比稳定, 移动方向变化在 20° 以内, 数值为 6.6 m/s 至 7.2 m/s。Shapiro (1983) 指出台风移动将增强移动前方的低层辐合, 使得最大降水区发生在移动的前方到右前方; 其中移动较快的台风(速度 > 5 m/s) 降水不对称比移动慢的台风强, 且最大降水区和最大风速区均集中在垂直风切变的右前侧区域。Chan et al. (2004) 在分析我国南海的登陆台风时, 也发现了类似现象。Corbosiero and Molinari (2003) 通过分析 1985~1999 大西洋上 35 个台风的闪电分布特征, 也显示在台风移动的右前方是闪电发生频率最高的区域。由台风移动(图7)和台风不对称结构(图6)配置显示, 在登陆前后, 最大风速区位于台风移动方向的右侧; 最大降水区在登陆前 2 小时位于移动方向的右侧(图6a、c), 登陆后逐渐逆时针转动至右前侧。卡努台风平均移动速度约 7 m/s, 属于移动较快的台风, 降水不对称结构与其移动有较为密切的关系。值得注意的是, 在登陆前, 强降水区域相对移动方向的位置比

Shapiro (1983) 研究更偏右, 而最大风速区的位置也是在移动右侧而非右前侧, 这可能与本文分析的非对称环流层次较高有关。

除垂直风切和台风移动外, Chan et al. (2004) 在分析我国南海登陆台风时发现, 当台风接近海岸期间, 强对流更容易出现在气旋内核区的移动前侧, 并随高度逆时针旋转, 并指出台风结构的不对称还可能同台风和陆地交互作用有关。综上所述, 在卡努登陆期间, 其不对称结构应是垂直风切、台风移动和陆气相互作用三者共同作用的结果。

## 4 结论

本研究利用温州雷达多普勒雷达资料和 GB-VTD 风场反演方法, 对卡努登陆前以及登陆后的内核区中尺度结构特征进行分析, 结果如下:

(1) 从轴对称结构分析来看, 在登陆前半小时, 轴对称切向风风速最大值近 40 m/s, 位于眼墙区距台风中心 20 km, 高度 2 km 附近。眼墙区存在回波极值区 ( $>30$  dBZ), 并且该眼墙强回波和最大风速半径均随高度向外倾斜, 倾斜角约  $20^\circ$ 。轴对称径向入流主要位于低层, 而上升气流主要出现在眼墙区和外围雨带区内, 台风眼区伴随下沉运动。在登陆过程中, 轴对称切向风速值总体随时间呈明显减弱的趋势, 但在 3 km 高度存在波动, 特别是在登陆前半小时, 切向风速突然增强。此切向风速波动现象可能与台风不对称结构的变化有关, 而登陆的影响是另一个可能的原因。同轴对称切向风相对应, 轴对称涡度大值均集中在眼墙所在半径以内, 而眼墙外涡度值随半径减少。在登陆后半小时, 最大切向风速值减少为 37 m/s, 位置向外、向上移至距台风中心 28 km、高度 3 km 左右; 最大切向风半径随高度向外倾斜角度比登陆前增加。同时, 台风低层入流增强、厚度增加, 范围向内和向外扩展, 伴随着外围雨带区上升流显著减弱。随着台风登陆时间增长, 其眼墙快速内缩, 强度进一步减弱。

(2) 从非对称结构分析来看, 在登陆期间卡努台风眼墙内的切向风和回波呈显著的波数 1 不对称结构。其中大风速区位于台风移动的右侧、垂直风切变顺切变方向的右前方到左前方并略为偏左, 而降水区则位于相对移动方向的右前侧、顺切变方向的左侧。由于卡努台风属于移动较快的台风(移速

约 7 m/s), 且登陆期间受 7.9 m/s 的强垂直风切影响。因此, 其不对称结构应是垂直风切、台风移动和陆气相互作用三者共同作用的结果。由于观测资料的限制, 我们在将来的工作中将进一步透过高分辨率数值模拟研究卡努台风非轴对称波数 1 结构的形成的作用机理。

**致谢** 美国国家大气研究中心 (NCAR) 李文兆研究员提供 GB-VTD 程序和对文章提出宝贵的建议。

## 参考文献 (References)

- Black M L, Gamache J F, Marks F D, et al. 2002. Eastern Pacific Hurricanes Jimena of 1991 and Olivia of 1994: The effect of vertical shear on structure and intensity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130: 2291 - 2312.
- Chan J C L, Liu K S, Ching S E, et al. 2004. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132: 2410 - 2420.
- Corbosiero K L, Molinari J. 2002. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130: 2110 - 2123.
- Corbosiero K L, Molinari J. 2003. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60: 366 - 376.
- Emanuel K A. 1986. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 585 - 605.
- Jorgensen D F. 1984. Mesoscale and convective-scale characteristics of mature hurricanes. Part I: General observations by research aircraft [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41: 1268 - 1286.
- 周仲岛, 张保亮, 李文兆. 1994. 都卜勒雷达在台风环流中尺度结构分析的应用 [J]. *大气科学(台湾)*, 22: 163 - 187. Jou B J, Chang P L, Lee W C. 1994. Analysis of typhoon circulation using ground based Doppler radar [J]. *Atmos. Sci. (Taiwan) (in Chinese)*, 22: 163 - 187.
- 周仲岛, 张保亮, 李文兆. 2002. 贺伯台风 (1996) 中尺度分析. 第一部分: 眼墙环流结构. *大气科学(台湾)*, 30: 201 - 216. Jou B J, Chang P L, Lee W C. 2002. Mesoscale analysis of typhoon Herb (1996): Part I: eyewall structure [J]. *Atmos. Sci. (Taiwan) (in Chinese)*, 30: 201 - 216.
- 高聿正. 2003. 纳莉台风近中心环流结构特征分析 [D]. 台湾大学大气科学系硕士学位论文. 105pp. Kao Y C. 2003. Inner core circulation structure of typhoon Nari (0116) [D]. M. S. thesis (in Chinese). Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University.
- Lee W C, Jou B J D, Chang P L, et al. 1999. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single Doppler radar observations.

- Part I; Interpretation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127: 2419–2439.
- Lee W C, Jou B J D, Chang P L, et al. 2000. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part III; Evolution and structures of typhoon Alex (1987) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 3982–4001.
- Lee W C, Marks F D. 2000. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single Doppler radar observations. Part II; The GBVTD-simplex center finding algorithm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 1925–1936.
- Lee W C, Bell M M. 2007. Rapid intensification, eyewall contraction, and breakdown of Hurricane Charley (2004) near landfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: 2802.
- Marks F D, Houze R A. 1984. Airborne Doppler radar observations in Hurricane Debby [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65: 569–582.
- Marks F D, Houze R A. 1987. Inner core structure of Hurricane Alicia from airborne Doppler radar observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 1296–1317.
- Marks F D, Houze R A, Gamache J F. 1992. Dual-aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert. Part I; Kinematic structure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 49: 919–942.
- Ooyama K. 1969. Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 26: 3–40.
- Oye R, Mueller C, Smith S. 1995. Software for radar translation, visualization, editing, and interpolation [C]. Preprints, 27th Conf on Radar Meteorology, Vail, CO, *Amer. Meteor. Soc.*, 359–361.
- Reasor P D, Montgomery M T, Marks F D, et al. 2000. Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 1653–1680.
- Riehl H, Yeh T C, La seur N E. 1950. A study of variations of the general circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 7: 181–194.
- Rotunno R, Emanuel K A. 1987. An air–sea interaction theory for tropical cyclones. Part II; Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model [J]. *J. Atmos. Soc.*, 44: 542–561.
- Shapiro L J. 1983. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 1984–1998.
- Shea D J, Gray W M. 1973. The hurricane's inner core region. Part I; Symmetric and asymmetric structure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30: 1544–1564.
- Tsuyuki T, Fujita T. 2002. Outline of the operational numerical weather prediction at the Japanese meteorological agency [R]. Appendix to WMO Numerical Weather Prediction Report. *JMA*, 157.
- Tuleya R E, Kurihara Y. 1978. A numerical simulation of the landfall of tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35: 242–257.
- Willoughby H E. 1992. Linear motion of a shallow-water barotropic vortex as an initial-value problem [J]. *J. Atmos. Sci.*, 49: 2015–2031.
- 张保亮. 2000. 登陆中台风环流变化分析: 贺伯 (1996) 个案研究 [D]. 国立台湾大学大气科学研究所博士学位论文, 158 pp.
- Chang P L. 2000. Circulation change analysis on landfalling typhoon; A case study Herb (1996) [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, 158pp.
- Zhao K, Lee W C, Jou B J D. 2008. Single Doppler radar observation of the concentric eyewall in typhoon Saomai (2006) near landfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: 7807–7808.

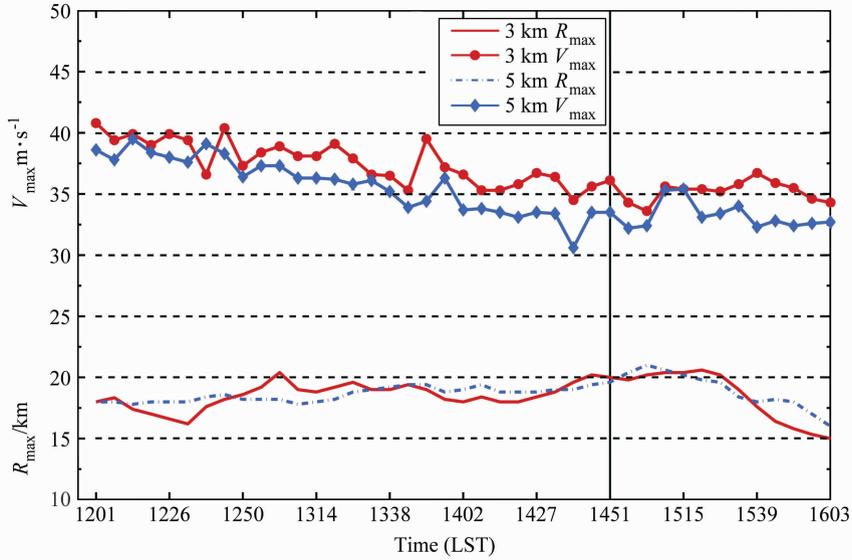


图 4 最大风速半径 (单位: km) 和最大风速 (单位: m/s) 时间序列图。竖线: 登陆时间

Fig. 4 The evolution of radius and velocity of the maximum wind. The solid plumb line indicates the landfall moment

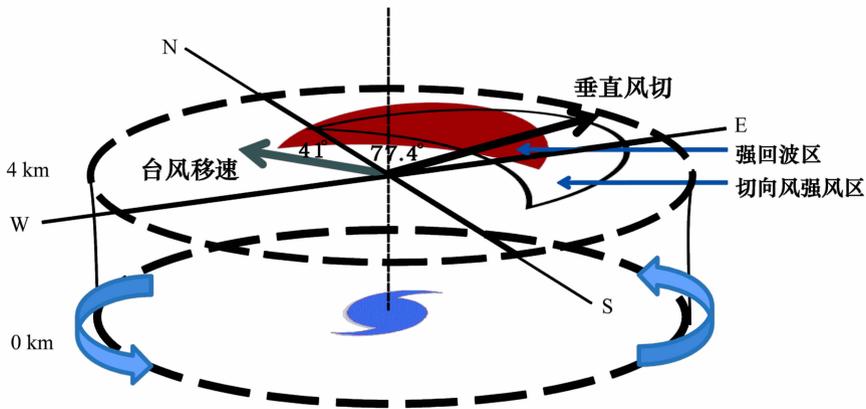


图 8 台风卡努最大风速区位置三维示意图。4 km 高度上弧形线条区域: 最大风速区位置; 红色: 强回波区; 黑色箭头: 垂直风切矢量 (大小为 7.9 m/s, 方位角 257.4°); 灰色箭头: 台风移速矢量 (大小 7.0 m/s, 方位角 139°)。零点: 台风中心

Fig. 8 Schematic illustration of typhoon Khanun's maximum winds location based upon observations. At 4-km altitude the crescent area bounded by the closed solid curve indicates the maximum winds location. The red crescent area indicates the chief location of strong echoes. Black arrow indicates the average vertical storm-related wind shear between 200 hPa and 850 hPa (7.9 m/s, azimuth 257.4°). Gray arrow indicates the vector of typhoon motion (7.0 m/s, azimuth 139°)