

# 利用多普勒雷达数据分析中国华东地区 登陆台风轴对称降水特征<sup>\* 1</sup>

吴丹<sup>1</sup> 赵坤<sup>1</sup> 余晖<sup>2</sup> 王明筠<sup>1</sup>  
WU Dan<sup>1</sup> ZHAO Kun<sup>1</sup> YU Hui<sup>2</sup> WANG Mingjun<sup>1</sup>

1. 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

2. 上海台风研究所, 上海, 200030

1. *Key Laboratory for Mesoscale of Severe Weather/MOE, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China*

2. *Shanghai Typhoon Institute, Shanghai, 200030, China*

2008-08-21 收稿, 2009-06-08 改回.

**Wu Dan, Zhao Kun, Yu Hai, Wang Mingjun, 2010. An analysis of spatial and temporal variations in the axisymmetric precipitation structure associated with typhoons making landfall on the southeastern coast of China based on the Doppler radar data. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6):896-907**

**Abstract** This study investigated temporal and spatial variations in the precipitation structure within 300 km radius from typhoon center by using the reflectivity data taken from the Doppler radars located in Wenzhou (CINRAD WSR-98D) and Wufenshan, Taiwan, China. Six typhoons making landfall along the southeastern coast of China in the years of 2004–2007 have been selected to examine changes in the precipitation distribution from 18 h before landfall to 6 h after landfall. The axisymmetric component of typhoon rainfall, represented by the radial distribution of the azimuthally mean reflectivity, reveals that the maximum rainfall is located in the eyewall and a secondary maximum rainfall is in the rainband outside from 9 to 18 h before landfall. With increasing storm intensity, the maximum rainfall rate increases while its radius from the typhoon center decreases. When typhoons are approaching the coast, the mean rainfall rate in the inner-core region increases abruptly, accompanied with the rapid contraction of the out-ring precipitation toward typhoon center. The highest intensification factor of the mean rain rate in the inner-core of the six typhoons reaches 3.2. The peripheral rainbands contract to typhoon center simultaneously, and the rates of contraction decrease with typhoon intensifying. After typhoon landfall, the eye is filled by rain and the intensity decreases quickly with the precipitation shrinking continuously. As a result, the amount of rainfall in the inner-core attenuates gradually. Finally, a model was proposed in this paper to fit the observed precipitation curve before typhoon landfall. This model is able to quantitatively describe the profile of the azimuthally mean rain of typhoon, and reveal the characteristic of two-peak of the profile. The maximum of the RMSE between the observed curve and the simulative result was 5.3 mm/h while the minimum was only 0.46 mm/h, suggesting that the model can well fit the real outline of typhoon precipitation.

**Key words** Landfall typhoon, Axisymmetric component, Precipitation structure

**摘要** 利用中国新一代多普勒雷达网温州雷达和台湾气象局五分山雷达资料、地面自动站降水资料, 分析 2004—2007 年登陆中国华东地区的 6 个台风从登陆前 18 小时至登陆后 6 小时的降水结构时空变化特征。环状平均回波分析显示, 在台风离陆地较远时, 轴对称降水径向廓线呈双峰结构, 最大降水位于台风眼墙处, 降水次大值位于台风外围雨带处。台风强度越强,

\* 资助课题: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421500)、国家自然科学基金项目(40505004 和 40333025)、国家重点机理研究发展项目(973: 2004CB18301)、上海台风研究基金(2006STA01-2)、国家科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J104)。

作者简介: 吴丹, 主要从事雷达气象学研究。E-mail: wudan8512@126.com

通讯作者: 赵坤, 主要从事雷达气象和中尺度灾害性天气研究。E-mail: zhaokun@nju.edu.cn。

最大降水越强,且离台风中心的距离也越近。当台风接近登陆时,其内核区降水有增强的趋势,从登陆前6小时至登陆时,各台风内核区平均降水率的增强倍率在1.3—3.2,且外围降水随时间向台风中心收缩,内缩速率随台风强度增强而减慢。台风登陆后,台风眼被降水填塞,强度快速减弱,同时降水持续内缩,内核区总降水逐渐衰减。此外本文还建立了一个登陆前台风轴对称降水径向廓线模型,该模型能定量地描述降水廓线的双峰结构,模拟结果与实际雷达观测降水廓线的均方根误差最小为0.46 mm/h,最大为5.3 mm/h。

**关键词** 登陆台风,轴对称分量,降水分布

**中图法分类号** P458.1<sup>+</sup>24

## 1 引言

热带气旋,特别是强台风在沿海登陆或者沿海地区受台风外围系统的影响而出现的特大暴雨天气过程,都会给人民生命财产和社会经济发展带来严重损失。迄今为止,国内外学者已经利用各种观测资料(包括雨量站、气象卫星、天气雷达和飞机观测等)对台风降雨结构进行了大量的研究。这些研究通常将台风降水空间分布分为轴对称部分(环状平均值)和非对称部分(扰动量)。在轴对称降水研究方面,Rodgers等(1981)利用卫星的微波辐射仪资料分析太平洋上21个热带气旋的降雨廓线发现,平均降水率和强降水的比例均随台风强度增强而增大,而最大降水半径则随台风强度增强而减小。Marks(1985)研究得到台风Allen(1980)的眼墙内平均降水率为11 mm/h,为眼墙至111 km半径内平均降雨率的6倍。Burpee等(1989)分析台风Alicia(1983)和Elena(1985)也显示平均降水率从眼墙到外围第一条螺旋雨带处有明显减弱。丁伟钰等(2004)利用TRMM资料分析2002年登陆广东的3个热带气旋降水分布特征,发现3个热带气旋登陆过程中心附近降水沿半径方向存在收缩和扩展变化,另外热带气旋外围的降水加强可能会导致中心附近降水减弱。最近Lonfat等(2004)利用TRMM卫星的微波成像仪测得的降水资料来定量研究全球热带气旋降水的空间分布。在将1998年至2000年TRMM观测到的260个热带气旋按强度和地域分组后,通过统计分析各组降水数据发现,台风降水的环状平均值与风暴强度有关,风暴强度越大,则最大环状平均降水率越大,其出现的位置到台风中心距离越近。周仲岛等(2004)利用台湾雷达网资料分析侵台台风降雨结构发现,台风登陆期间眼墙快速内缩,内核区降水占有率快速增加,降水总量也大幅度增加。

国外对于开放洋面上台风降水特征已经有相当的研究,但对登陆台风降水的研究则相对较少。我

国东南沿海经济发达,人口稠密,在东南沿海登陆的热带气旋灾情大、普遍等级高、灾情严重(钱燕珍等,2001),但过去由于观测资料的缺乏,对中国登陆台风的降水分布的研究非常有限。当台风接近陆地时,其降雨结构变化经常相当显著,这将影响到其强度及路径。因此,增进对登陆台风降雨结构的了解,对于降水预报而言,具有相当重要的价值。目前中国新一代多普勒天气雷达布网已基本完成,其中中国东南沿海地区的雷达在近几年业务运行中获取了大量高时间(6 min)空间分辨率(径向分辨率1 km,方位分辨率1°)的登陆台风观测数据,为了解中国登陆台风降雨结构特征提供了绝佳的机会。本文利用2004—2007年新一代天气雷达观测的华东地区6个登陆台风资料,分析台风登陆前后降水时空变化特征,以促进对中国登陆台风定量降水预报能力的提高。

## 2 资料来源和分析方法

### 2.1 资料来源

本次研究选取的个例为2004—2007年6个登陆浙江省的台风,包括云娜(0414)、麦莎(0509)、卡努(0515)、桑美(0608)、韦帕(0713)和罗莎(0716),分析时间从台风登陆前18小时到登陆后6小时,表1为所分析台风的特征。雷达资料来源为中国气象局新一代天气雷达温州雷达(S波段,120.74°E,27.895°N,海拔734 m)和台湾气象局五分山雷达(S波段,121.46°E,25.04°N,高度为766 m)每6 min一次的体积扫描雷达反射率因子数据(最大探测距离460 km)。

在参考了余晖等(2006)对西北太平洋3个主要预报中心的热带气旋资料的差异性分析后,本文选取了中国台风网提供的“CMA-STI热带气旋最佳路径数据集”(包括每6小时1次的台风中心位置、地面最低气压和最大风速等)。图1为本文选择的6个登陆台风路径以及雷达位置示意图。

表1 6个登陆中国台风的特征

Table 1 Characteristic of the six typhoons

| 编号   | 台风名称        | 登陆时间(UTC)<br>(月/日/时) | 登陆地点 | 登陆时中心气压/最<br>大风速(hPa/m/s) | 移动速度<br>(m/s) | 移动方向   |
|------|-------------|----------------------|------|---------------------------|---------------|--------|
| 0414 | 云娜(Rananim) | 08/12/12             | 浙江温岭 | 950/45                    | 6.82          | 308.7° |
| 0509 | 麦莎(Matsa)   | 08/05/19             | 浙江玉环 | 950/45                    | 3.94          | 320.8° |
| 0515 | 卡努(Khanun)  | 09/11/06             | 浙江台州 | 945/50                    | 6.61          | 326.4° |
| 0608 | 桑美(Saomai)  | 08/10/09             | 浙江苍南 | 919/60                    | 7.2           | 293.5° |
| 0713 | 韦帕(Wipha)   | 09/18/18             | 浙江苍南 | 950/45                    | 6.0           | 303.3° |
| 0716 | 罗莎(Krosa)   | 10/07/07             | 浙江苍南 | 975/33                    | 4.49          | 325.5° |

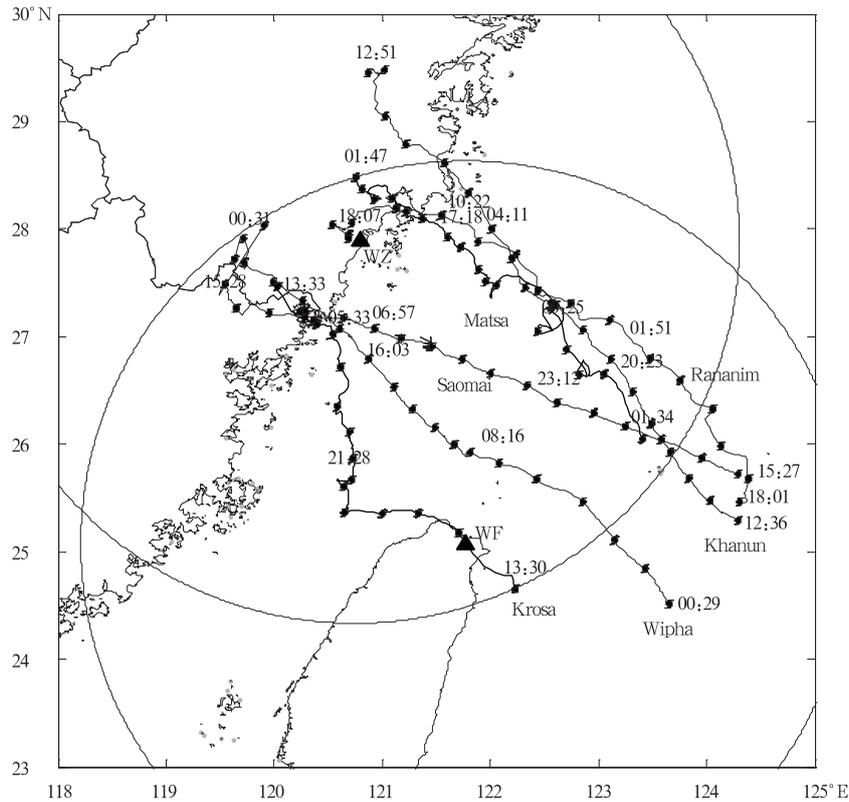


图1 6个登陆台风路径图

(黑色三角表示观测雷达位置,黑色实线圆表示雷达探测覆盖范围,半径为350 km)

Fig. 1 Best tracks of the six typhoons (Black triangle indicates the location of radar. Black circle covers radars' detection span with its radius of 350 km)

## 2.2 分析方法

首先对研究中用到的雷达资料进行质量控制(包括地物回波滤除、异常回波剔除和平滑、缺测数据填充),随后分别将温州雷达和五分山雷达反射率因子数据插值到等高面上,再将两雷达数据进行合成并按周仲岛等(2004)的方法将资料内插至2 km等高面以台风中心为原点的极坐标下(资料范围为300 km×360°,径向和方位分辨率分别为3 km和

1°,其中,为消除高分辨率对台风中心定位的影响,数据处理过程中对格点数据作了3 km的平滑,因此文中的径向分辨率为3 km)。在做双雷达数据合成前,参照肖艳姣等(2007)的方法对温州和五分山雷达的观测数据做了对比分析,结果显示,在两部雷达间存在稳定的系统偏差。在此后的合成过程中修正了五分山雷达相对于温州雷达的系统偏差。另外,文中台风中心的定位采用张保亮(2000)提出的

弱回波中心定位法。为避免地形杂波与亮带数据的影响,采用 2 km 等高面极坐标资料进行分析。

台风轴对称降雨结构随时间变化特征采取哈莫图(Chang 1970)方式(时间-空间序列)。此显示方式纵轴为时间序列(每 6 min 1 组合成数据),横轴为距台风中心的距离(单位为 km)。回波环状空间平均计算方法是以台风中心为原点,取固定半径上所有数据点做平均,若数据环上格点资料少于 90 个则不予分析,经处理后每组资料简化成 100 个资料点做代表(图 2a)。文中也参考 Lonfat 等(2004)的方法计算雷达数据覆盖率(每个环上数据覆盖面积占整个环的面积百分比)随离台风中心距离的变化(图 2b),结果显示,在分析期间雷达的数据覆盖率(>60%)优于 Lonfat(2004)采用 TRMM/TMI 资料的数据覆盖率(<40%),因而文中分析的降水特征具有较好的代表性。为分析台风的降雨分布特征,本文采用气候学方法(窗概率配对方法),利用文中分析的 6 个登陆台风地面雨量站观测资料和对应的雷达观测资料确定了雷达的回波-降雨 Z-R 关系式为  $Z = 228.3R^{1.3}$ ,并利用该关系式将雷达反射率因子换算成降雨强度。6 个台风共采集到 4782 个配对的样本,1 h 累积雨量与地面自动雨量站的观

测值的均方根误差为 5.4 mm,相关系数为 0.81,通过了  $\alpha = 0.01$  的相关性检验。这一结果要优于丁伟钰等(2004)得到的卫星资料对台风降水估计值的精度(样本数为 140 时,相关系数在 0.11—0.62)。

在过去对台风结构的研究中,通常把距中心固定半径范围内区域定义为台风内核区,如 Corbosi-ero 等(2003)、周仲岛等(2004)的研究中将台风中心向外至 100 km 半径范围定义为内核区。然而,这样定义的台风内核区,常常不能反映每个台风真实的内核区降水特征,因为台风内核区的大小和台风本身的尺度有关,对尺度不同的台风,其对应内核区范围大小也不相同。Willoughby 等(1984)根据台风内核区降水结构定义了滞性雨带综合体(Stationary Band Complex,简称 SBC),包括眼墙、主要雨带、连接雨带及次要雨带。其中,主要雨带是由眼墙外缘向外延伸的螺旋状雨带,代表台风内核区的边界。我们参照 Willoughby(1984)的定义,将台风中的主雨带作为内核区的外边界,通过观察各台风的平面回波图确定台风内核区的范围,台风云娜、麦莎、卡努、桑美、韦帕和罗莎的内核区半径(相对台风中心的距离)分别为 140、150、140、70、140、100 km。

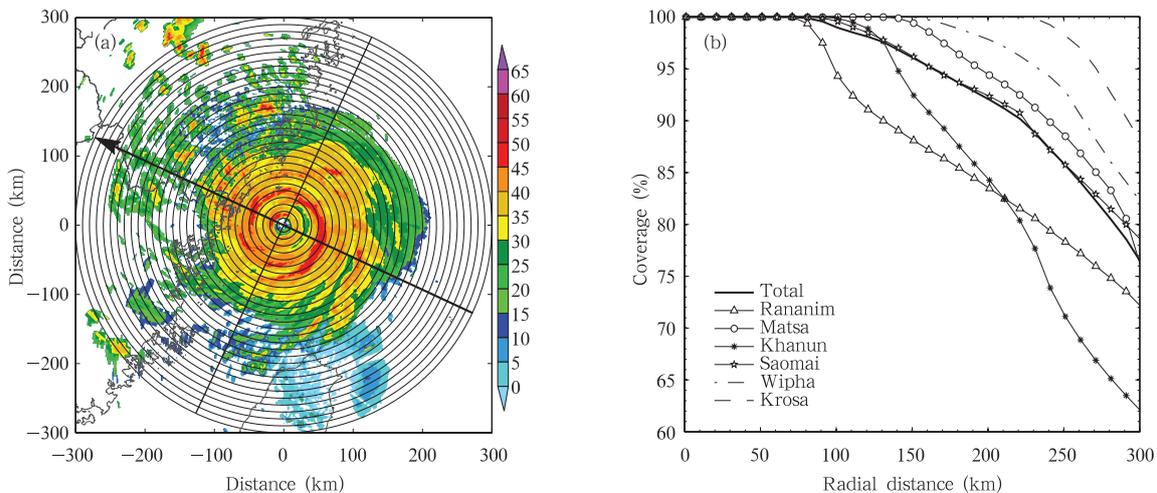


图 2 台风平面回波示意图(a)和雷达数据覆盖率随离台风中心距离的变化(b)  
 (图 a 中台风中心为(0,0),箭头表示台风移动方向;彩色表示 2006 年桑美(0608)台风  
 (8 月 10 日 5 时 59 分)2 km 高度回波水平分布,为图像清晰,示意图中环宽放大到 10 km。  
 b 中横坐标为离台风中心距离,纵坐标为雷达资料覆盖率)

Fig. 2 (a) The map shows the intensity of radar echo of Saomai (2006) (2 km) at 05:59 UTC with the arrow pointing to its moving direction. (b) Radar data coverage as a function of the distance from TC center for the 6 typhoons

### 3 台风登陆前后环状平均回波值的结构

由登陆前 18 小时至登陆后 6 小时的雷达回波哈莫图显示,6 个台风降雨结构有显著差异(图 3)。

云娜台风的降水范围很大,反射率因子大于 20 的回波范围约 300 km,台风中心弱回波区约 25 km,眼清晰可辨,其外围 150—300 km 存在大范围的雨带,此外围雨带向台风中心收缩,并在登陆前 6 小时有明显增强(图 3a)。

麦莎台风的范围和中心弱回波区范围均很大,但其结构比较松散(图 3b)。眼墙回波较弱,而外围雨带紧邻眼墙,范围大且强度较弱,这与云娜的外围雨带位置和结构均存在较大差异。在登陆过程中,它的眼先增大后收缩,外围雨带随时间向内收缩,和眼墙合并。结合 2 km 平面回波图(图略),很明显可以看到,登陆前 6 小时左右,有一雨带从眼墙中分离出来,向外传播。另外,值得注意的是,在登陆前 11 小时到登陆前 9 小时,大于 150 km 范围回波强度突然减弱,造成此现象的一个原因是此段时间五分山雷达资料缺测引起。

台风卡努的中心弱回波区范围较小(约 20 km),眼墙处环状平均回波大于 35 dBz,眼墙位置在登陆前几乎没有变化。在距离台风中心 120—200 km 处也存在一外围雨带,此雨带发展同云娜台风外围雨带相当类似,即随时间逐渐增强并向台风中心移动,登陆后最终与眼墙合并(图 3c)。

桑美是个超强台风,结构很紧密,它的眼墙平均回波大于 40 dBz,是 6 个台风中最强的。中心弱回波区范围也最小,仅 15 km 宽。此外,在登陆前 10 小时左右,桑美出现双眼墙结构(图 3d)。

韦帕台风的强度与云娜、卡努相似,但在登陆前其雨带发展却与后两者不同(图 3e)。从登陆前 13 小时开始,韦帕的眼墙处有雨带向外传播,因此,在外围出现平均强度大于 30 dBz 的强回波区。从韦帕的 2 km 高度平面回波图上(图略)可以看到,在其西北方距中心 200 km 向外处,出现增强的地形雨带。此雨带对韦帕外围强回波区的出现具有一定贡献。登陆后,韦帕的雨带发展与云娜、卡努相同,向中心内缩与眼墙合并。

罗莎台风是个移动路径较为特殊的台风,其生命期中共登陆 3 次。在本文的研究时段中包含两次登陆的过程。图 3f 中的时间以罗莎最后一次登陆

为基准,在此前 17 小时为其第 2 次登陆时间。图 3f 显示,在其 2 次登陆台湾过程中,回波结构已非常松散,眼墙回波先内缩增强,随后破碎且强度减弱。至登陆前 9 小时,罗莎离开台湾移至开放洋面上,其眼墙重新组织且结构清晰。张保亮(2000)和杨三吉(2003)分别在研究登陆台风亚力士和启德时均注意到,当台风登陆台湾时,其切向环流迅速减弱,眼墙结构被破坏,而当台风离开陆地重新进入海洋后,则又重新组织,且切向环流加强,同罗莎的发展相当类似。造成这一回波结构演变的一个可能原因是:在台风登陆台湾期间,受地形影响和缺乏水汽、热量输送等原因,其强度大大减弱,眼墙结构被破坏,而当其进入海洋后,下垫面条件再次变得有利于台风发展,促进眼墙重新组织。

值得注意的是,6 个台风有一个共同的特点(图 3):在登陆前后眼墙回波均明显增强并逐渐内缩,至登陆后台风眼填塞,此特征同周仲岛等(2004)分析的侵台台风相似。其中麦莎和罗莎收缩开始时间为登陆前 2 小时左右,云娜、卡努和韦帕的眼墙则是从登陆时开始收缩,而桑美的眼墙收缩得最晚,大约在登陆后 3 小时,这一差异可能取决于各台风的强度。而外围雨带的演变情况主要有两种,一是随时间向台风中心收缩,此种外围雨带在登陆过程中因台风外围环流同地形交互作用降雨不断增强,如云娜、卡努;二是随时间往台风外传播,此雨带主要是台风眼墙中分离出的螺旋雨带,如麦莎、韦帕。

为清楚表示出 6 个台风环状平均回波登陆前后随时间变化特征,我们将登陆过程分为 3 个阶段(登陆前 18—9 小时,登陆前 9 小时至登陆时,登陆时至登陆后 6 小时),平均后的 6 个台风 3 个阶段的环状平均回波在图 4 中显示。在登陆前 18—9 小时(图 4a),台风的环状平均回波均呈双峰形式,最大值对应于台风眼墙,次大值对应于外围雨带区,其中最大环状平均值与其出现位置距台风中心距离(即眼墙半径)如表 3 所示(由于罗莎台风在登陆前 18—9 小时阶段登陆台湾,受地形影响在环状平均回波的时间平均廓线上已经失去其眼的结构,因此在表 3 中未列出罗莎的第一组最大环状平均值与出现位置)。从表中可以看出在距登陆较远的时段(登陆前 18 至 9 小时),超强台风桑美和在该时段发展到最强的韦

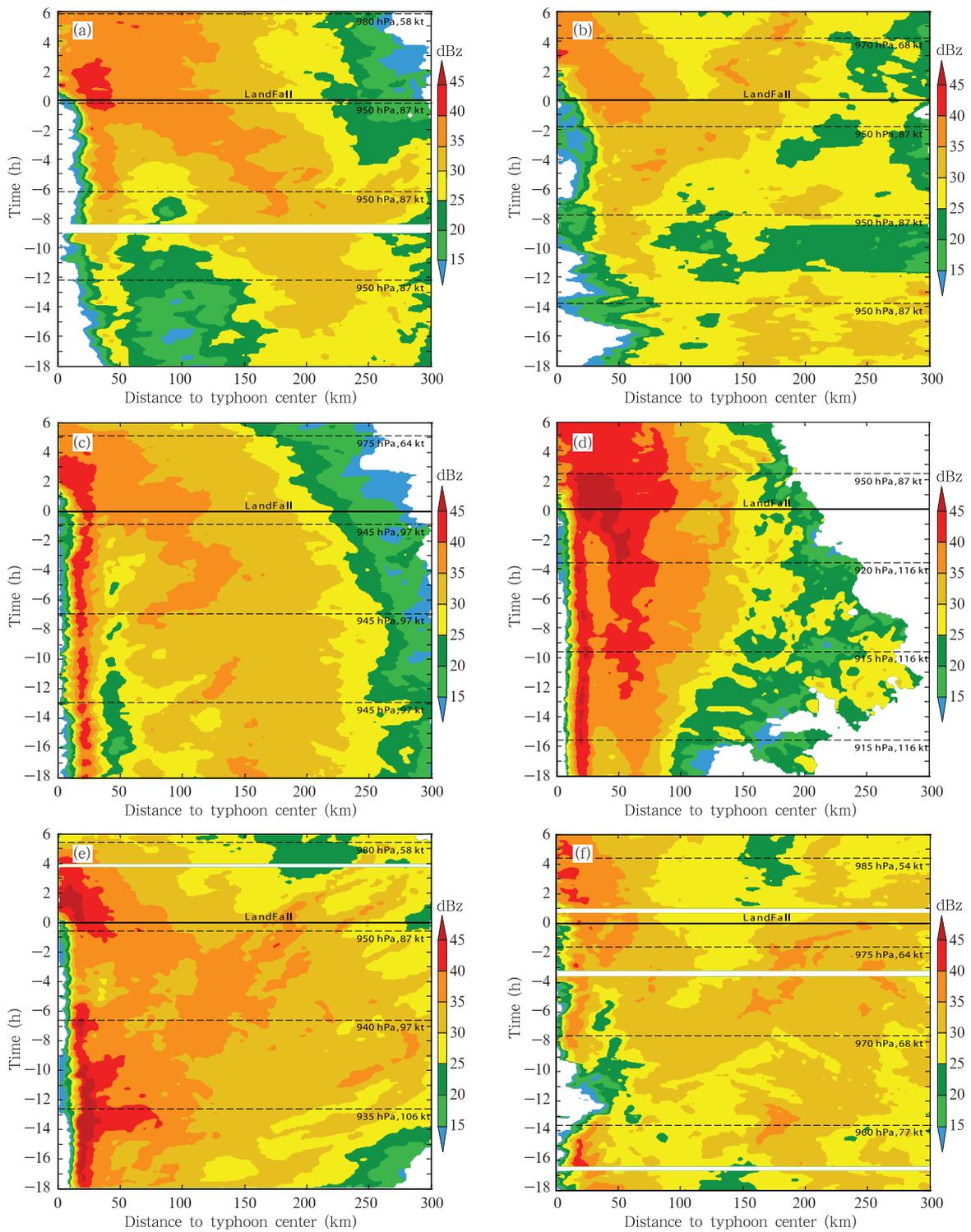


图3 (a)云娜(0414)、(b)麦莎(0509)、(c)卡努(0517)、(d)桑美(0608)、(e)韦帕(0713)、(f)罗莎(0716)台风从登陆前18小时至登陆后6小时2 km等高面的回波环状平均哈莫图(单位为相对台风登陆前(-)或(+))几小时。标注数字为虚线指示时刻的台风强度(海平面最低气压及最大风速),粗实线表示台风登陆时间

Fig. 3 Azimuthally-mean intensity of the six typhoons from 18 h before landfall to 6 h after landfall (a. Rananim, b. Matsa, c. Khaunu, d. Saomai, e. Wipha, and f. Krosa; the ordinate is for time in h with the landfall time as zero shown by thick solid line; dashed line shows the times with the corresponding minimum surface pressure and the maximum surface velocity to each typhoon marked)

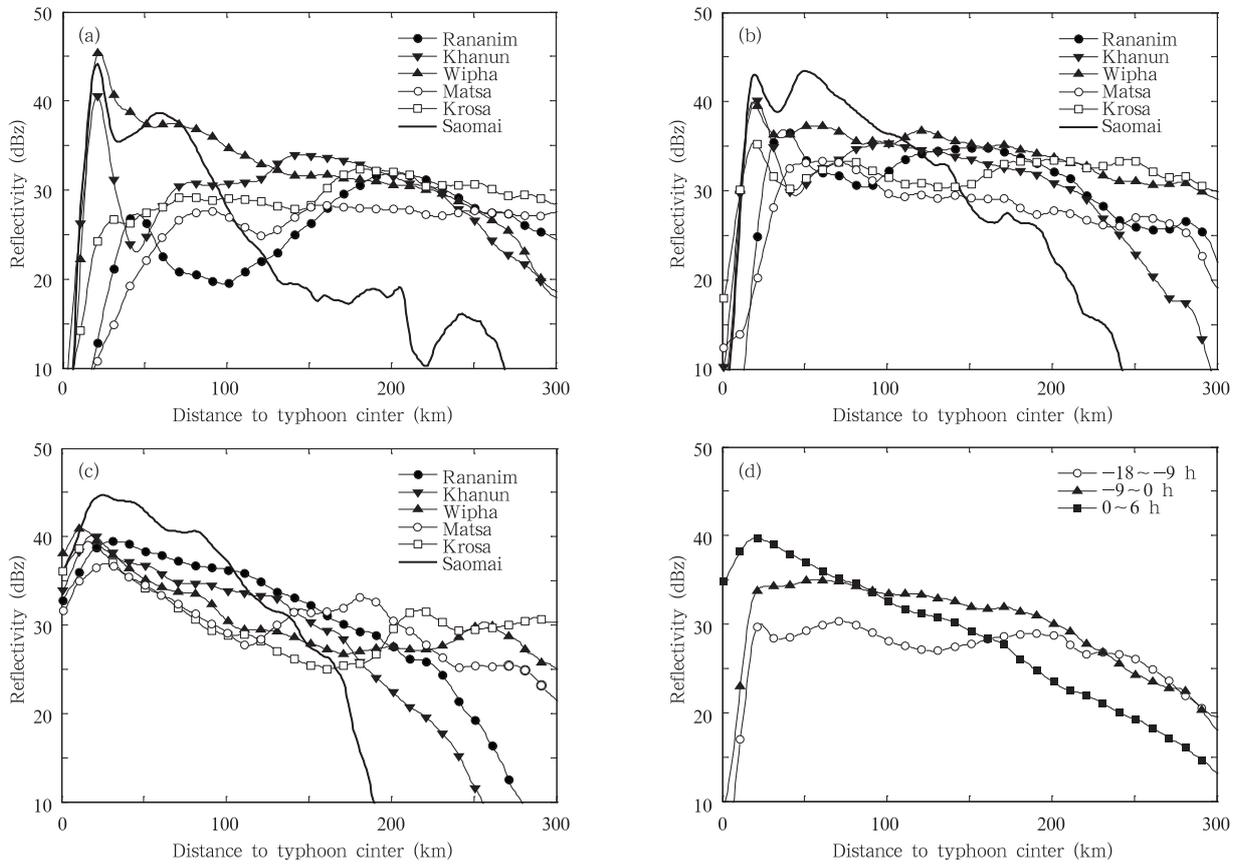


图4 6个台风登陆前18小时至9小时(a)、登陆前9小时至登陆时(b)、登陆时至登陆后6小时(c)环状平均回波值时间平均和所有台风环状平均回波值的时间平均(d)

Fig. 4 Time average of the azimuthally-mean intensity of the six typhoons for the three periods: (a) -18 - -9 h, (b) -9 - 0 h and (c) 0 - 6 h as well as (d) Average for all TCs

帕台风的最大环状平均回波值是所有台风中最强的,分别为45和46 dBz,而桑美的眼墙半径也最小,仅有21 km。卡努的眼墙半径与桑美接近,但最大环状平均值略小。云娜的强度虽然和卡努、韦帕类似,但最大环状平均值比这两个台风要小,眼墙半径也比较大。麦莎的眼墙半径是所有台风中最大的(88 km)。对比表1中台风强度信息可见,在台风登陆前,台风最大环状平均回波强度以及出现位置同台风强度有明显的关系,台风强度越强,最大环状平均回波越强,离中心的距离也越近。Lonfat等(2004)的研究发现,在远离陆地的洋面上的热带气旋,其降水径向廓线和台风强度有关。即随着强度的增强,最大环状平均降水的值也在增大,出现位置也向台风中心靠近,这同雷达观测结果相当类似。不同之处在于,在开放洋面上台风降水径向廓线呈现单峰值结构,即在眼墙半径外降水随距离减少,和

此处降水呈现明显双峰结构不同。在登陆前9小时到登陆时(图4b),台风眼墙至250 km半径处回波都有明显增强,而250 km外回波减弱,表明台风降水向台风中心收缩。这种台风登陆期间降水内缩的现象在过去登陆台风中也常被观测到(丁伟钰,2004;周仲岛等,2004)。从表3中可以得出此阶段,6个台风眼墙极值大小和位置依次为桑美(因桑美台风此时已呈现双眼墙结构,此处用内眼墙半径)、韦帕、卡努、云娜、罗莎、麦莎。值得注意的是台风接近登陆时降水持续内缩增强,并且内缩增强一直持续至登陆后(图4c)。为定量分析台风眼墙内缩程度,我们对登陆前(-18—0小时)眼墙位置做线性拟合,以拟合曲线的斜率来表示眼墙内缩速率(表2)。结果表明,眼内缩的程度仍然同台风强度相关,台风强度越强,眼墙内缩的速率越慢。图4d为所有台风在登陆前后降水平均廓线,结果显示在台风登

陆后,其 100 km 半径内降水显著加强,而外围降水则显著减弱。此现象也表明,当台风登陆后,虽然风暴强度减弱,但因台风和陆地交互作用产生的降水会造成局部区域的增雨效应,出现降水反而增加的情形。另外,在图 4d 中除眼墙区出现峰值,眼墙外围并未出现单台风降水廓线所有的双峰结构,考虑

到本文研究中各个台风的大小有很大差异,如云娜台风的半径可达 350 km,而桑美台风的半径最小时仅不足 100 km,则各台风外围雨带的位置也会有显著差异,因此 6 个台风的降水廓线平均后,外围雨带对应强降水位置不如单台风降水廓线明显。

表 2 各台风在 3 个阶段最大环状平均值、出现位置及登陆前眼墙收缩速率  
Table 2 Maximum of the azimuthally-mean intensity and the contraction rate of eye-wall for the three periods of each of the six typhoons

| 台风 | - 18—- 9 小时  |          | - 9—0 小时     |          | 0—6 小时       |          | 眼墙内收缩速率(km/h) |
|----|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|---------------|
|    | 最大环状平均值(dBz) | 眼墙半径(km) | 最大环状平均值(dBz) | 眼墙半径(km) | 最大环状平均值(dBz) | 眼墙半径(km) |               |
| 桑美 | 45           | 21       | 43           | 19       | 45           | 25       | 0.03          |
| 韦帕 | 46           | 22       | 40           | 18       | 41           | 12       | 0.25          |
| 卡努 | 41           | 21       | 40           | 20       | 40           | 19       | 0.20          |
| 云娜 | 27           | 45       | 37           | 37       | 39.5         | 30       | 0.95          |
| 麦莎 | 27           | 88       | 33           | 67       | 37           | 27       | 1.10          |
| 罗莎 | /            | /        | 35           | 20       | 39.5         | 16       | /             |

#### 4 台风登陆前后的轴对称降水变化特征

为进一步定量描述台风登陆的降水特征变化,利用 2.2 节中的 Z-R 关系将雷达反射率因子转化成降水率进行分析。在台风登陆过程中,由于海面和陆面的粗糙度不同,且陆面不能提供能量和水汽,台风降水的分布和结构通常会发生很大的变化,尤其是在台风的内核区。

##### 4.1 台风登陆前后降水率的概率分布

图 5 是登陆期间不同时段,各距离环上不同雨强发生概率的分布。图 5a 中显示在距离陆地较远时(登陆前 18—9 小时),在眼墙外(>20 km)所有半径处,均有两个雨强发生概率极值中心,分别位于 3 和 0.2 mm/h 附近,另外最大降水均<50 mm/h。在眼墙区中,最大降水强度超过 60 mm/h,而降水概率极值除了 3 和 0.2 mm/h 附近这两个极值中心外,在 20—30 mm/h 处还存在另一概率极值,其发生频率约占总雨强的 7%,这表明眼墙处最大降水强度和强降水比率比外围雨带要大。在台风眼区,降雨强度几乎都分布在<1 mm/h,最大降水概率在 0.1—0.2 mm/h,反映眼区的降水强度相当弱,这主要是因为台风眼内盛行下沉气流,不易形成降水。Lonfat 等(2004)利用 TRMM 卫星的微波成像仪在 1998—2000 年测得的 260 个洋面上的热带气旋的

降水资料,统计出热带气旋降水雨强概率径向分布图。该雨强概率径向分布图中,在不同半径处仅在 2—3 mm/h 的附近存在一个大值中心,且从眼墙位置向外,最大概率降雨率呈下降趋势。然而,Lonfat (2004)的分析中并未发现在小雨强(0.2 mm/h 附近)处存在降水概率极值,一个可能的原因是 Lonfat(2004)文中提到的 TRMM 卫星的微波成像仪在反演降水时会低估小雨强降水,另一个原因是 TRMM 的资料覆盖率随半径减小。因此雷达分析出的小雨区极值特征应更能反映实际台风的降水径向分布。至接近登陆阶段,即登陆前 9 小时至登陆时(图 5b),与图 5a 相比,眼墙外降水分布呈现明显变化。在 250 km 以外,2 mm/h 的降水所占比率由原来的 9%下降到 7%(0.2—0.3 mm/h 的降水所占比率却由 11%增加到 13%),外围雨带(100—250 km)处小雨强(<0.5 mm/h 以下降水)所占比重则有下降,降水强度主要集中到 3 mm/h 左右。眼墙处的降水有显著增强,并向强降水(>10 mm/h)集中。台风登陆后(图 5c),眼区已被强降水填满,眼墙处降水也均大于 1 mm/h,其中 2 mm/h 左右的降水所占比率也减小到 3%,大部分降水都集中到雨强为 20—30 mm/h 处。而台风外围中,小雨强降水所占比重进一步增大到 15%。这一降水率分布随时间演变特征反映,在台风登陆过程中,台

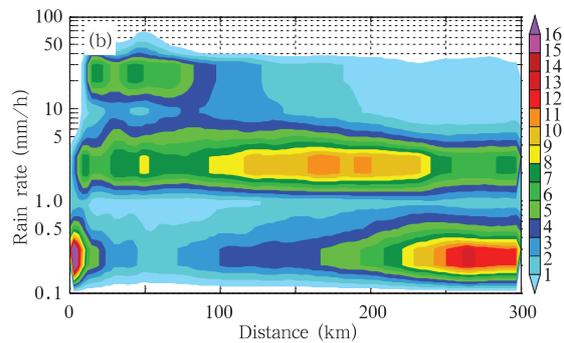
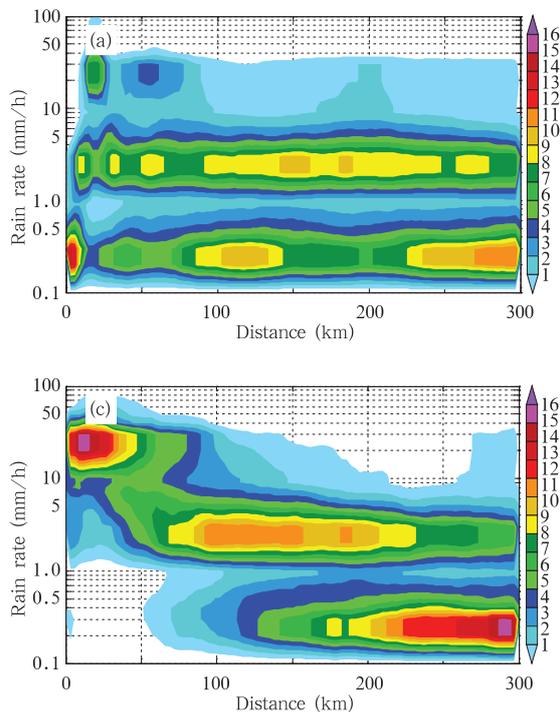


图5 6个台风雨强概率分布的径向变化  
(单位: mm/h; 不同颜色代表各雨强发生概率)  
(a. 登陆前18至9小时; b. 登陆前9小时至登陆时;  
c. 登陆时至登陆后6小时)

Fig. 5 Radial variations of the probability distribution of rain rate from storm center to 300 km radius  
(a. -18 - -9 h, b. -9 - 0 h and c. 0 - 6 h; see text for further details)

风外围降水强度减小,降水范围向内收缩,而内核区范围在减小,降水强度却在增加,尤其是眼墙区,大雨强降水所占比重越来越大。该结果也同前面分析的轴对称径向廓线分析结果相当一致。

#### 4.2 台风登陆前后内核区降水率时间变化特征

在登陆过程中,台风内核区的降水率的时间变化非常明显。从图 6a—6f,我们可以看到各台风内核区降水有一个共同趋势,即在登陆前约 6 小时左右,内核区平均降水率突然迅速增强,本文的 6 个台风分别增加到 3.2 倍(云娜)、2.3 倍(麦莎)、1.4 倍(卡努)、2.2 倍(桑美)、1.5 倍(韦帕)和 1.3 倍(罗莎),即登陆前至登陆时,台风内核区平均降水率增长在 1.3—3.2 倍。此后,台风强度减小,台风整体平均降水率随时间呈下降趋势。内核区降雨增强的现象,在海上增强的台风也有类似的现象(Rodgers, et al, 1994)。而周仲岛等(2004)在分析台湾地区登陆台风时也发现,其内核区降水在登陆前 1 小时呈现快速增强。周仲岛等(2004)也进一步分析指出,由于台风在登陆时,强度持续减弱,所以强降雨向内核区集中的现象可能是由于台风内核区接近并登陆初期受陆地和地形影响,地表粗糙度的增加以及地形爬升所产生的额外气流辐合结果(Chen, et al, 2003; Wu, et al, 2002),而非台风强度增强所造

成。此处观测的登陆期间台风内核区降水突然增强同周仲岛等(2004)的研究也相当类似,不同之处在于侵浙台风的内核区的降水的增幅比侵台台风(登陆后降雨率增长 3.7 倍)的低,一个可能原因是台湾地区地形高度比浙江地区高,所造成的地形增雨幅度也较强。

#### 4.3 环状平均降水廓线模型

在登陆期间,台风外围雨带有增强趋势,因此在图 4 中各台风登陆前 2 个阶段均有双峰结构出现。这一现象与 Lonfat 等(2004)总结出的开放洋面上台风的轴对称降水廓线的单峰结构有区别,为了更好地拟合出台风在登陆前的这种双峰结构,我们提出一种新的模型来描述其轴对称降水廓线。

该模型针对降水轴对称廓线的双峰特征,以两个峰值之间的最小值把廓线分解为两段:

(1) 眼墙峰值阶段。以眼墙处的极大值  $R_{\max 1}$  为界,在  $R_{\max 1}$  之前,降水率呈线性增长;  $R_{\max 1}$  之后,降水率做指数式衰减。

(2) 外围雨带阶段。以雨带的极大值  $R_{\max 2}$  为界,在  $R_{\max 2}$  之前,仍认为降水率呈线性增长,而  $R_{\max 2}$  之后按指数式衰减。

这样整个降水曲线以公式表达为

$$R = \begin{cases} R_0 + (R_{\max1} - R_0)r/r_{\max1} & r < r_{\max1} \\ R_{\max1} \exp[-I \cdot (r - r_{\max1}) / (r_{\min} - r_{\max1})] & r_{\max1} < r < r_{\min} \\ R_{\min} + (R_{\max2} - R_{\min})(r - r_{\min}) / (r_{\max2} - r_{\min}) & r_{\min} < r < r_{\max2} \\ R_{\max2} \exp[-I \cdot (r - r_{\max2}) / (r_t - r_{\max2})] & r > r_{\max2} \end{cases}$$

在上述模型中,  $R$  表示轴对称降水率,  $r$  表示距台风中心的距离,  $R_0$  是台风中心的降水率, 理想状态下眼内无降水, 该值为 0。  $R_{\max1}$  是眼墙峰值,  $r_{\max1}$  是眼墙峰值位置,  $R_{\max2}$  是外围雨带峰值,  $r_{\max2}$  是外围雨带峰值位置,  $R_{\min}$  是两个雨强峰值之间的极小值,  $r_{\min}$  是极小值的位置。以上参数均为台风自身降水的特征量。  $I$  为台风强度指数,  $r_t$  是台风自身尺度, 这两

个指数可以参考实际台风的强度和大小给出。其中  $I$  用于控制不同强度台风外围降水衰减的速率, 各台风的强度指数取值分别为: 云娜(1.5)、卡努(2.0)、韦帕(2.0)、桑美(2.5)。本文用到的台风中超强桑美尺度较小, 从雷达平面回波图上观测其半径约为 200 km, 因此桑美台风的  $r_t$  取为 200, 而韦帕台风的尺度较大,  $r_t$  取为 400, 其余均取为 300。

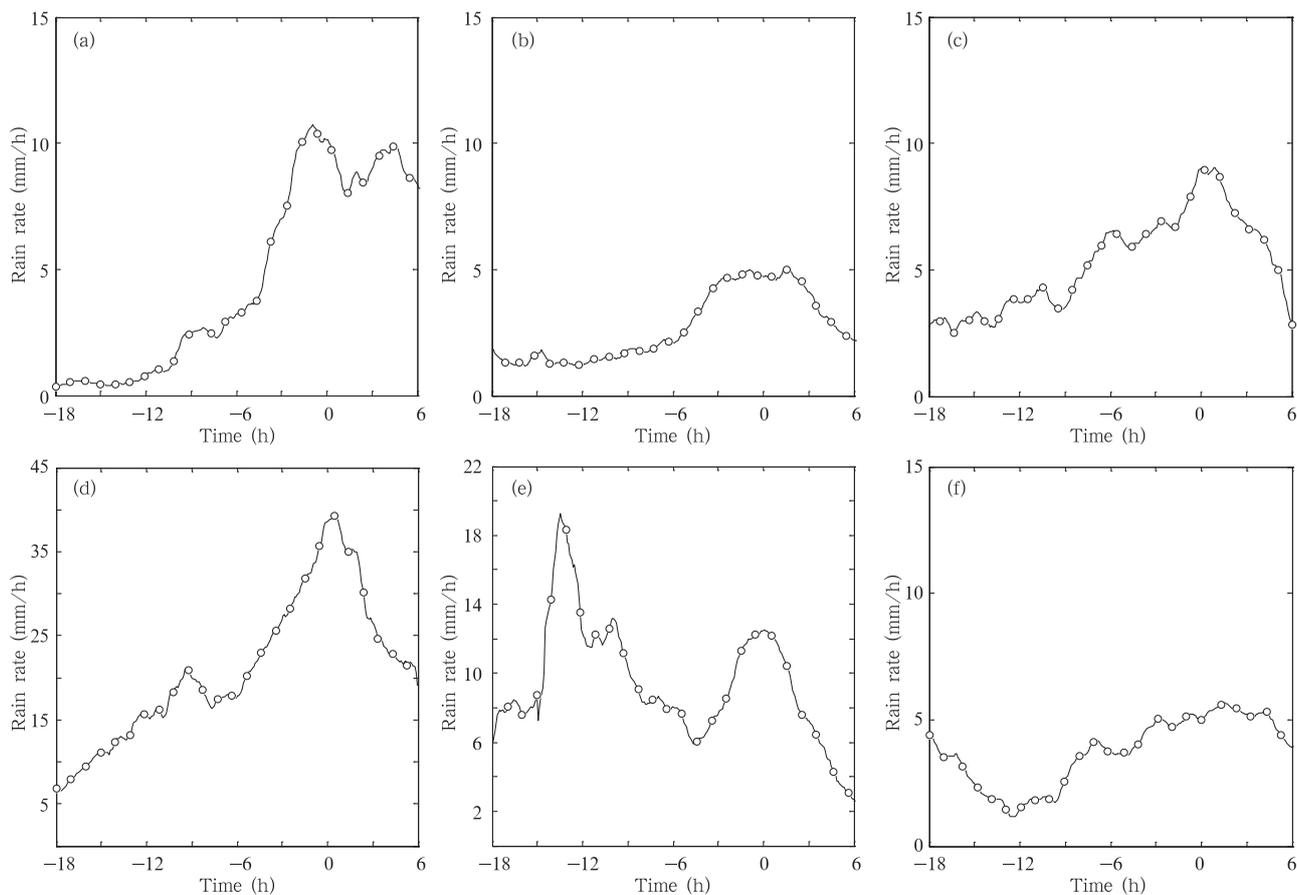


图 6 (a)云娜(0414)、(b)麦莎(0509)、(c)卡努(0517)、(d)桑美(0608)、(e)韦帕(0713)、(f)罗莎(0716)台风内核区降水率的时间变化

Fig. 6 Average rain rates over the inner-core region for each of the six typhoons (a. Ranim, b. Matsa, c. Khanun, d. Saomai, e. Wipha and f. Krosa)

6 个台风中, 登陆前 2 个时段均有双峰结构的是台风云娜、卡努、桑美和韦帕。麦莎台风在第 2 阶段由于雷达观测不完整造成外围雨带极大值不明显, 而

罗莎台风则因为已登陆台湾两次, 在第 1 阶段眼墙结构消失。利用以上模型, 对在登陆前 2 个时段均有双峰结构的 4 个台风降水廓线进行拟合(图 7)。

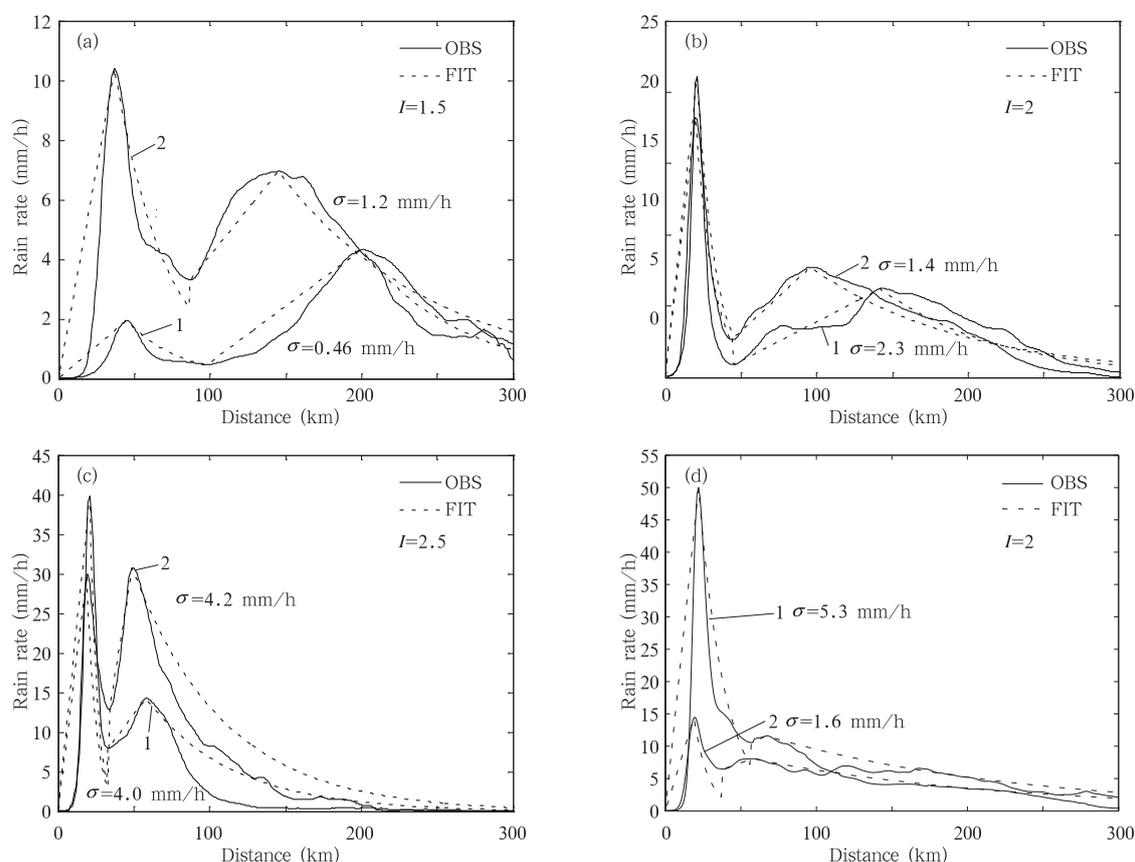


图7 降水廓线拟合(实线表示观测曲线,点线表示拟合曲线。数字1代表登陆前18—9小时,数字2表示登陆前9小时至登陆时;a.云娜, b.卡努, c.桑美, d.韦帕)

Fig. 7 Comparison between the observed rain rate based on the radar data and the model-fitting rare (Black lines are for the observed data while dashed lines are for the fitting; number 1 means the first period (-18 h to -9 h), and number 2 means the second period (-9 h to landfall)

利用上述模型做出的拟合曲线与观测曲线的均方根误差 $\sigma$ 最大为5.3 mm/h,最小仅为0.46 mm/h。表明模型能较好地描述台风在登陆阶段的双峰降水廓线结构。

## 5 结论与讨论

利用中国新一代多普勒雷达网(CINRAD WSR-98D)温州雷达和台湾气象局五分山雷达资料,地面自动站降水资料,分析2004—2007年登陆中国华东地区的6个台风从登陆前18小时至登陆后6小时的降水结构时空变化特征。研究结果表明:

(1) 在台风登陆过程中,环状平均降水径向廓线呈双峰结构,最大值对应于台风眼墙降水,降水次大值对应于台风外围雨带。台风强度越强,最大降水越强,距台风中心越近。当台风登陆时,眼墙降水

快速增强,并随时间往台风中心内缩,内缩速率随台风强度增强而减慢。

(2) 从降水分布来看,在台风登陆过程中,其外围的小雨( $<0.5$  mm/h)比例不断增大,而眼墙区则是强降水( $>10$  mm/h)比例在增大。这表明外围降水的强度和范围都在减小,而眼强区降水强度在加强,即台风降水在登陆过程中内缩。

(3) 由台风内核区平均降水率的时间变化我们可以得知,登陆前6小时左右内核区降水突然增长,增长率在1.3—3.2倍。登陆后,虽然眼墙处降水率仍在继续增长,但由于台风整体强度在减弱,内核区的平均降水率也呈下降趋势。

(4) 本文利用登陆台风的一些降水特征量,建立轴对称降水廓线的模型,并将该模型用于拟合在登陆前两个阶段具有双峰结构的4个台风(云娜、卡努、桑美和韦帕)。拟合的降水廓线与实际廓线的均

方根误差在 0.46—5.3 mm/h,表明此模型能较好地表现台风的实际轴对称降水分布。

**致谢:**感谢中国气象局和台湾大学 P3 实验室提供研究需要的雷达资料。感谢台湾大学大气科学系的周仲岛老师在文章修改过程中提供的建议和帮助。

## 参考文献

- 丁伟钰,陈子通. 2004. 利用 TRMM 资料分析 2002 年登陆广东的热带气旋降水分布特征. *应用气象学报*, 15(4): 436-444
- 江吉喜,叶惠明. 1987. 用 GMS 云图做登陆台风降水预报的方法研究. *热带气象*, 3(2): 369-376
- 钱燕珍,何彩芬,杨元琴等. 2001. 热带气旋灾害指数的估算与应用方法. *气象*, 21(1): 14-24
- 肖艳姣,刘黎平,杨洪平. 2007. 区域雷达网同步观测对比分析. *气象学报*, 65(6): 919-927
- 杨三吉. 2003. 登陆台风之中心定位与中尺度结构——启德台风个案研究[D]. 台北:台湾大学
- 余晖,胡春梅,蒋乐怡. 2006. 热带气旋强度资料的差异性分析. *气象学报*, 64(3): 357-363
- 张保亮. 2000. 登陆中台风环流变化分析:贺伯(1996)个案研究[D]. 台北:台湾大学大气科学研究所, 158pp
- 周仲岛,颜建文,赵坤. 2004. 登陆台风降雨结构之雷达观测. *大气科学(台湾)*, 32: 183-204
- Burpee R W, Black M L. 1989. Temporal and spatial variations of rainfall near the centers of two tropical cyclones. *Mon Wea Rev*, 117: 2204-2218
- Chen Y, Yau M K. 2003. Asymmetric structures in a simulated landfalling hurricane. *J Atmos Sci*, 60: 2294-2312
- Corbosiero K L, Molinari J. 2003. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones. *J Atmos Sci*, 60: 366-376
- Frank W M. 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone. Part I: Storm structure. *Mon Wea Rev*, 105: 1119-1135
- Johnny C L Chan, Liu K S. 2004. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China Coast. *Mon Wea Rev*, 132: 2410-2420
- Lonfat M, Marks F D Jr, Chen S S. 2004. Precipitation distribution in tropical cyclones using the tropical rainfall measuring mission (TRMM) microwave imager: A global perspective. *Mon Wea Rev*, 132: 1645-1660
- Marks F D. 1985. Evolution of the structure of precipitation in hurricane Allen (1980). *Mon Wea Rev*, 113: 909-930
- Marks F D, Kappler G, DeMaria M D. 2003. Development of a tropical cyclone rainfall climatology and persistence (r-cliper) model
- Parrish J R, Burpee R W, Marks F D Jr, et al. 1982. Rainfall pattern observed by digitized radar during the landfall of Hurricane Frederic(1979). *Mon Wea Rev*, 110: 1933-1944
- Rodgers E B, Adler R F. 1981. Tropical cyclone rainfall characteristics as determined from a satellite passive microwave radiometer. *Mon Wea Rev*, 109: 506-521
- Rodgers E B, Pierce H F. 1994. A satellite observation and numerical study of precipitation characteristics in western North Pacific tropical cyclones. *J Appl Meteor* 33: 129-139
- Willoughby H E, Marks F D, Feinberg R J. 1984. Stationary and moving convective bands in hurricanes. *J Atmos Sci*, 41: 3189-3211