

陈锺, 徐海明, 余晖, 等. 2010. 台风“桑美”(0608) 登陆前后降水结构的时空演变特征 [J]. 大气科学, 34 (1): 105–119. Chen Lei, Xu Haiming, Yu Hui, et al. 2010. Temporal and spatial variations in precipitation of typhoon Saomai (0608) before and after its landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 105–119.

台风“桑美”(0608) 登陆前后降水结构的 时空演变特征

陈锺^{1, 2, 3} 徐海明^{1, 2} 余晖³ 漆梁波⁴ 骆兴江⁵ 许晓林³

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

3 上海台风研究所, 上海 200030

4 上海中心气象台, 上海 200030

5 无锡 94926 部队, 无锡 214141

摘 要 利用雷达-雨量计联合测量降水技术得到的 1 小时雨量分布资料, 分析了台风“桑美”登陆前后距台风中心 111 km 以内的降水结构及其时空演变特征, 尤其是登陆前双眼墙循环过程中, 降水结构的变化特征。研究发现: 在登陆前“桑美”经历了双眼墙循环过程, 在此期间, 其内、外眼墙和雨带降水均以强降水为主, 内、外眼墙平均降水率均随时间增强, 而外眼墙增长幅度更大, 且平均降水率始终大于内眼墙, 但并没有伴随外眼半径减小的过程。而雨带平均降水率随时间变化很小, 略有下降。在登陆后, “桑美”内核和外围区仍是以强降水为主, 登陆前三小时左右内核区平均降水率有一个迅速增长的趋势, 登陆后随着台风强度的减弱, 其平均降水率迅速下降。“桑美”降水的空间分布特征显示, 其登陆前后降水结构有明显的非对称性, 在登陆前内、外眼墙和雨带最大降水均出现在台风移动路径的右侧, 且雨带的最大降水率始终位于内、外眼墙的右方; 登陆后, 内核区和外围降水更多地出现在移动路径的后方, 而不是登陆前的右侧。

关键词 登陆台风 双眼墙 降水时空分布

文章编号 1006–9895 (2010) 01–0105–15

中图分类号 P444

文献标识码 A

Temporal and Spatial Variations in Precipitation of Typhoon Saomai (0608) before and after Its Landfall

CHEN Lei^{1, 2, 3}, XU Haiming^{1, 2}, YU Hui³, QI Liangbo⁴, LUO Xingjiang⁵, and XU Xiaolin³

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

4 Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030

5 Wuxi 94962 Army, Wuxi 214141

Abstract A new hourly rainfall dataset is formed using variational method, based on raingauge and radar-retrieved

收稿日期 2008–10–07, 2009–04–20 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301, 国家自然科学基金重点项目 40830958, 国家科技部科研院所社会公益研究专项 2005DIB3J104, 国家自然科学基金资助项目 40730948

作者简介 陈锺, 女, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事热带气旋动力学方面的研究。E-mail: yuhuashi19840414@163.com

rainfall intensity. The new data are used to investigate temporal and spatial variations of precipitation structure within 111-km radius centered the typhoon, especially the evolution of rainfall structure during the concentric eyewalls cycle before Saomai landfall. The authors find that typhoon Saomai had concentric eyewalls before it landed, and the mean radii of the inner and outer eyewalls were 24 km and 59 km, respectively. The radius of the outer eyewall did not diminish due to the rapid landfall of typhoon Saomai after the concentric eyewalls combination. During concentric eyewalls circulation, the precipitation in the inner and outer eyewalls and rainband regions was very heavy. In the outer eyewall region, the time series of mean rainfall rate was more variable than that in the inner eyewall and rainband regions. And in the inner and outer eyewalls regions, the mean rainfall rate increased with time, but in the rainband region it decreased. The precipitation in the inner-core and outer regions was also heavy, and the mean rainfall rate in the inner-core region increased abruptly about the three hours before Saomai landed, and then it decreased, accompanied with the reduction of the typhoon intensity after Saomai landed. The distribution of precipitation of typhoon Saomai was asymmetric. Before Saomai landfall, the maximum rainfall rates in the inner eyewall, outer eyewall, and rainband regions occurred in the right quadrant relative to the storm moving track, and the azimuth in the rainband region was always to the right of those in the inner and outer eyewalls regions. The azimuth of the maximum precipitation in outer eyewall and rainband regions varied with time during the concentric circulation. After typhoon Saomai landfall more precipitation in the inner-core and outer regions appeared in the back quadrant relative to the storm track.

Key words landfall typhoon, concentric eyewall, precipitation distribution

1 引言

我国是世界上台风登陆最多、灾害最重的国家之一。台风灾害的主要部分往往是台风引发的暴雨造成的,台风暴雨会造成洪涝爆发、农田受淹、耕地流失、城市内涝和路毁车阻等灾害。为了降低灾害,至今为止,国内外学者已经利用各种观测资料对台风降雨进行了大量的研究。一般来说台风降水的分布可分为轴对称分布和非对称分布。在轴对称降水研究方面,Rodgers et al. (1994)在用专业遥感微波成像仪(SSM/I)的观测资料研究1987年到1989年西北大西洋18个台风的降水特征时发现,台风强度越强,其降水率就越大。Lonfat et al. (2004)利用TRMM卫星的降水资料来定量研究1998到2000年间的260个热带气旋的降水空间分布时也发现,台风降水的环状平均值与风暴强度有关,风暴越强,其最大环状平均降水率越大,且出现位置到台风中心的距离越近。何会中等(2006)利用TRMM资料研究台风“鲸鱼”时,发现最大平均降水出现在距台风中心30~40 km处,然后降水量随距离的增加迅速减小。丁伟钰等(2004)利用TRMM资料分析2002年3个登陆广东的热带气旋降水分布特征,研究发现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的变化,且发现外围降水加强会导致热带气旋中心附近

降水减弱。Burpee et al. (1989)研究发现,台风Alicia和Elena雨带中的平均降水率与眼墙相比随时间变化较小,并且平均降水率从眼墙到外围第一条螺旋雨带处有明显减弱。

在非对称降水研究方面,当台风已经登陆或将要登陆时,在台风右前方向岸风的地形抬升比较显著,最大雨量往往出现在台风右前象限或前半部(陶诗言,1980,斯公望,1990)。Lonfat et al. (2004)研究1998年到2000年间的260个热带气旋发现,台风非对称降水随风暴强度和地理位置有显著变化。一般来说,强度较低的台风最大降水发生在左前象限,而强度强的则出现在右前象限,且强度较低的台风显示出更大的非对称性。Marks (1985)研究发现,台风Allen降水分布也是非对称的,更多的降水发生在风暴的前方而不是后方。张建海等(2007)在对台风Rananim登陆后引发强降水成因和暴雨分布进行诊断分析时发现,台风登陆后,台风环流本身产生的降水呈现明显的非对称分布,最大降水中心主要出现在台风登陆点的东北侧,这与台风自身结构、水汽条件、地形等因素有关。冀春晓等(2007)在用非静力平衡中尺度模式MM5研究台风Rananim时,也发现地形的影响会造成台风中心南北雨区和雨量的不对称分布。岳彩军(2009)在用WRF模式研究台风“海棠”降水分布时发现垂直上升运动条件可能是造成降水非对称

分布特征的主要因素。

虽然国内外学者对台风降水已经有了相当的研究, 但对登陆台风降水的研究则相对较少, 尤其是具有双眼结构的台风, 其登陆前后降水的分布特征还没有非常细致的研究。“桑美”(0608, Saomai) 是 2006 年第 7 个登陆我国大陆的台风, 登陆前具有双眼结构, 登陆时中心附近最大风力达 17 级 (60 m/s), 中心附近最低气压为 920 hPa。台风“桑美”不仅是建国以来登陆我国大陆最强的台风, 而且属于百年一遇, 比 2005 年登陆美国的“卡特里娜”飓风还要略强。“桑美”的登陆给浙江苍南和福建福鼎的部分地区带来了毁灭性的破坏, 两省因台风共造成 447 人死亡, 失踪 138 人, 直接经济损失高达 190.8 亿元 (中国气象局, 2008)。因此, 分析“桑美”登陆前后的降水结构及其时空变化特征对于提高台风降雨预报能力有重要意义。本文将利用雷达-雨量计联合测量降水技术得到的 1 小时雨量分布资料, 来分析台风“桑美”登陆前后降水结构的演变特征, 尤其是登陆前双眼墙循环过程中降水结构的变化特征。

2 资料及其估测降水的检验

本文是对台风“桑美”登陆前后降水时空分布特征的分析, 分析时间从 2006 年 8 月 10 日 05 时到 17 时 (国际协调时, 下同), 即登陆前 5 小时到登陆后 8 小时。所用降水资料为利用雷达-雨量计联合测量降水技术得到的 1 小时雨量分布资料, 台风位置资料来自于北京主观预报 (BABJ) 的每小时的定位, 雷达资料为我国气象局新一代天气雷达温州站资料 [位于 (27.895°N, 120.74°E), 海拔 734 m]。

文中使用的雷达-雨量计联合测量降水技术是基于最优插值法的初步估测结果, 进行变分分析后得到的逐小时台风降水分布。雷达估测降水的相关文献较多 (张培昌等, 1992, 官莉等, 2004, 郑媛媛等, 2004), 本文的步骤也参考这些文献的工作, 具体方法如下: (1) 先对雷达反射率因子资料进行质量控制和混合仰角处理 [即离雷达中心 50 km 以内, 用仰角为 2.4° 的 PPI (Plane Position Indicator) 资料, 50~100 km 用仰角为 1.5° 的 PPI 资料, 100 km 以外, 使用仰角为 0.5° 的 PPI 资料]; (2) 先利用 2006 年两个台风的反射率因子和地面降水资料, 针对不同的降水等级 (每小时大于 1 mm, 每

小时大于 5 mm 及每小时大于 10 mm), 分别用最优插值法建立 $Z-I$ 关系; (3) 再利用其他独立的 4 个台风样本进行检验, 并选择检验结果最好的方程作为后续降水估测的 $Z-I$ 关系 (本文最终选择的是根据每小时大于 5 mm 的降水资料和对应的雷达反射率因子所建立的 $Z-I$ 关系, 其中系数 a 取 119, 系数 b 取 1.7, 该方程对较强降水的估测最好, 这也正好符合台风降水的估测要求); (4) 选定上述 $Z-I$ 关系作为最优插值的估测方程, 并作为变分法的初始估测 $Z-I$ 关系。

为了检验该降水估测资料的可靠性, 将最优插值方法 (Opt) 和变分法 (Var) 进行比较。将上述估测资料分别与自动站的 1 小时一次的降水资料作距平相关系数 C (Anomaly Correlation Coefficient) [公式 (1)] 和均方根误差 E (standard error) [公式 (2)]。由于桑美在登陆前后在陆上引起的降水主要集中于浙江、福建两省, 因而选取 (23°N~31°N, 115°E~122.5°E) 范围内的自动站降水资料 (图 1c), 选择其中每小时降水量大于 5 mm 的资料与估测资料作 C 和 E 。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A}_i) (A_0 - \bar{A}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (A_0 - \bar{A}_0)^2}}, \quad (1)$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - A_0)^2}, \quad (2)$$

式中, A_i 是估测的降水资料, A_0 是自动站降水资料, N 是站点数。

图 1 给出估测的降水资料与自动站资料的 C (图 1a) 和 E (图 1b), 从图上可以看到, 无论是 C 还是 E , 用 Var 资料反映实际降水的能力均强于另一种方法。图 2 为台风“桑美”2006 年 8 月 10 日 11 时 Var 资料和雨量计资料的 1 小时雨量分布图, 对比图 2a、b 可以看到 Var 资料反映的雨量分布状况与雨量计资料是一致的。因此, 利用雷达-雨量计联合测量降水技术得到的 1 小时雨量分布资料可以很好地反映出台风“桑美”登陆前后降水的时空变化特征, 是可以满足分析要求的。

3 “桑美”概况

0608 号热带风暴“桑美”于 2006 年 8 月 5 日 12 时在西太平洋关岛附近洋面生成, 生成后一直

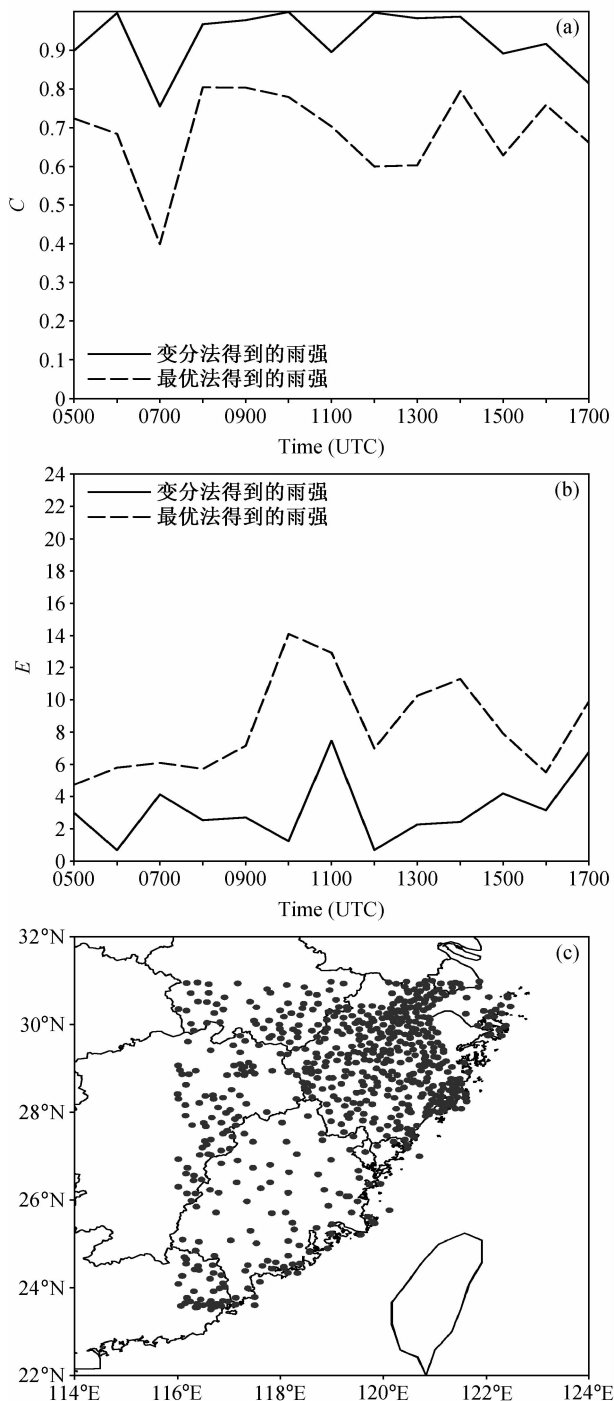


图1 两套降水资料与自动站降水资料的距平相关系数(a)以及均方根误差(b);(c)所用自动站的分布图

Fig. 1 (a) C and (b) E between two kinds of rainfall data and the automatic meteorological observing station rainfall data; (c) the distribution of the automatic weather stations

稳定向西北偏西方向移动,7日06时加强为台风,9日03时增强为强台风,10时继续增强为超强台风,9日晚中心强度达到极值,一直到登陆前4小

时,其近中心附近最低气压都维持在915 hPa,并于10日09时25分在浙江省苍南县马站镇登陆。登陆时强度仍维持在超强台风,其近中心附近气压为920 hPa,近中心最大风力为17级(60 m/s)。“桑美”登陆后在陆地维持超强台风强度1小时,强台风强度2小时,维持台风强度2.5小时,并最终于11日03时在江西境内减弱为低气压。由卫星云图(图3)可以看到,“桑美”登陆前后(10日05时到17时),受副热带高压的影响,并没有与中纬度西风带产生相互作用,其产生的降水主要是由台风环流本身引起的。

台风“桑美”在登陆前后其结构经历了重要的变化过程。图4给出了“桑美”雷达反射率因子PPI时间序列图和对应时刻新的降水资料的1小时累积降水分布图。10日05时(图4a),台风眼非常清晰,眼墙成圆环状,比较对称,半径约为24 km,可以看到在眼墙外部有一条近似圆形的大于40 dBZ的高雷达回波带围绕着眼墙,在眼墙和外围高雷达回波带之间有明显的低反射率带,此时“桑美”已组织成同心眼墙。而在台风中心北部到东部的雨带区也有一条螺旋状的高雷达回波带向外眼墙卷入。以台风中心为原点,每隔1 km做雷达反射率的环状平均值,得到雷达回波径向平均图(图5a),也可以清楚地看到,在距台风中心18 km和50 km附近有两个雷达反射率峰值,60 km以外,反射率随距离逐渐减小,没有明显的峰值,但在60 km到100 km以内雷达回波径向平均值仍然较高,基本在35 dBZ以上。05时到06时,雨带区的高雷达回波带逐渐卷入外眼墙,与之合并,外眼墙强度不断增强(如图4c所示),一条40 dBZ以上的圆环状的高雷达回波带环绕着内眼墙,此时外眼墙对流非常旺盛,较之05时双眼墙结构更为清楚明显。从06时往后,外眼墙云系开始向内涌入内眼墙,并逐渐与内部眼墙合并,内眼墙中强回波范围不断加大,到09时12分双眼墙消失(图4e和图5b),内眼墙云系被外眼墙云系合并。由于09时25分“桑美”就登陆了,登陆后,受陆地影响“桑美”强度迅速减弱,台风眼也迅速被堵塞,到10时48分(图4g)台风眼完全消失,因而“桑美”没有出现明显的外眼墙半径收缩的现象。从图4中1小时累积降水分布图可以看到,“桑美”的雨量分布与对应时刻雷达反射率分布图有很好地对应,降水大值

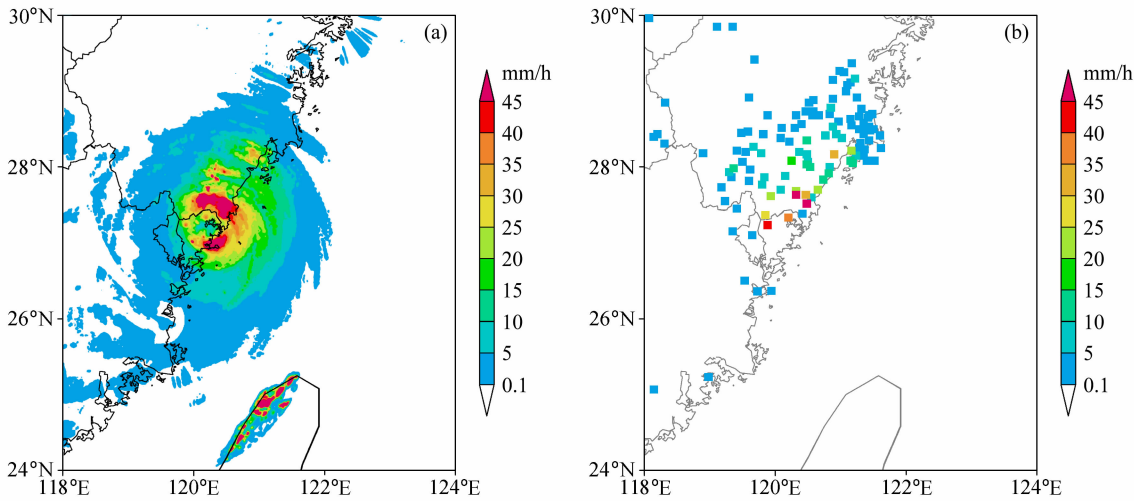


图 2 2006 年 8 月 10 日 11 时台风“桑美”1 小时雨量分布图：(a) 雷达-雨量计新资料；(b) 雨量计资料
Fig. 2 The distribution of rainfall rate of typhoon Saomai at 1100 UTC 10 Aug 2006: (a) The new radar-raingauge rainfall rate; (b) the raingauge rainfall rate

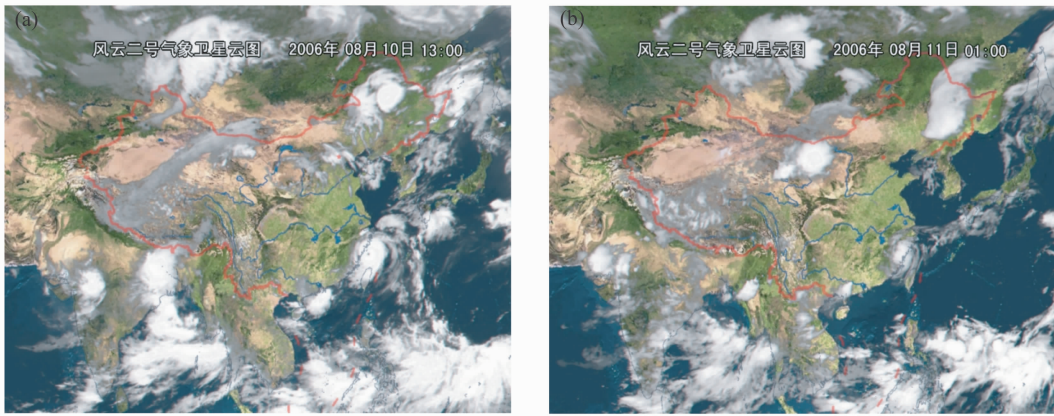


图 3 2006 年 8 月 10 日卫星云图：(a) 05 时；(b) 17 时
Fig. 3 The satellite cloud images on 10 Aug 2006: (a) 0500 UTC; (b) 1700 UTC

区都落在雷达反射率的高值区。

图 6 为沿台风“桑美”移动路径方向做的雷达反射率因子垂直剖面图，可以看到台风眼两侧从眼墙到雨带对流都比较旺盛，眼墙回波达到 10~12 km，59 km 以外的雨带区也达到 8~12 km。由图 6a 和 6b 可以发现，59 km 附近的外眼墙区比 24 km 附近的内眼墙区雷达回波更强，外眼墙区内 40 dBZ 以上的区域向上伸展到 4 km 附近，而内眼墙仅达到 3 km 左右，说明外眼墙对流比内眼墙更为旺盛。而 59 km 以外的雨带内，对流也比较活跃，4 km 以下大部分区域雷达回波都达到 35 dBZ 以上。

观测的雷达反射率的水平和垂直结构表明，

“桑美”在登陆前经历了双眼墙循环过程，但由于双眼墙合并后“桑美”迅速登陆，强度减弱，台风眼填塞，因而没有出现外眼墙半径收缩的现象。王新利等（2007）通过分析 TRMM-TMI 捕捉的云图，也推断出“桑美”在临近登陆时存在双云墙结构。“桑美”登陆前后，其对流都比较活跃，即使是在雨带区，也存在大范围的 35 dBZ 以上的区域。

4 “桑美”降水的时空分布特征

本文主要研究台风“桑美”登陆前后（10 日 05 时到 17 时）降水的演变特征，由于“桑美”在登陆前，即 05 时到 09 时 12 分，经历了双眼墙维持到消亡的过程，而登陆以后眼墙合并，台风眼迅速被填

塞。因此，为了能够真实清楚地反映“桑美”降水的演变过程，05 时到 09 时将“桑美”分为三个区：内眼墙、外眼墙和雨带来进行分析，而登陆后即 10 时到 17 时，则分为内核区和外围进行分析。本文将内眼墙定义为从台风中心向外到雷达反射率高值区外缘的区域，外眼墙定义与内眼墙相同，是从内眼墙向外到第二个雷达反射率高值区外缘的圆环区，而雨带则定义为外眼墙与 111 km（经纬度 1 度半径）之间的圆环区。表 1 是根据上述定义基于雷达回波径向平均分布时间序列图（图略）给出的 05

表 1 台风“桑美”内、外眼墙半径
Table 1 The radii of the inner eyewall and the outer eyewall from 0500 UTC to 0900 UTC

时间	内眼墙半径/km	外眼墙半径/km
0500UTC	24	56
0600UTC	23	61
0700UTC	24	60
0800UTC	23	59
0900UTC	26	59
平均	24	59

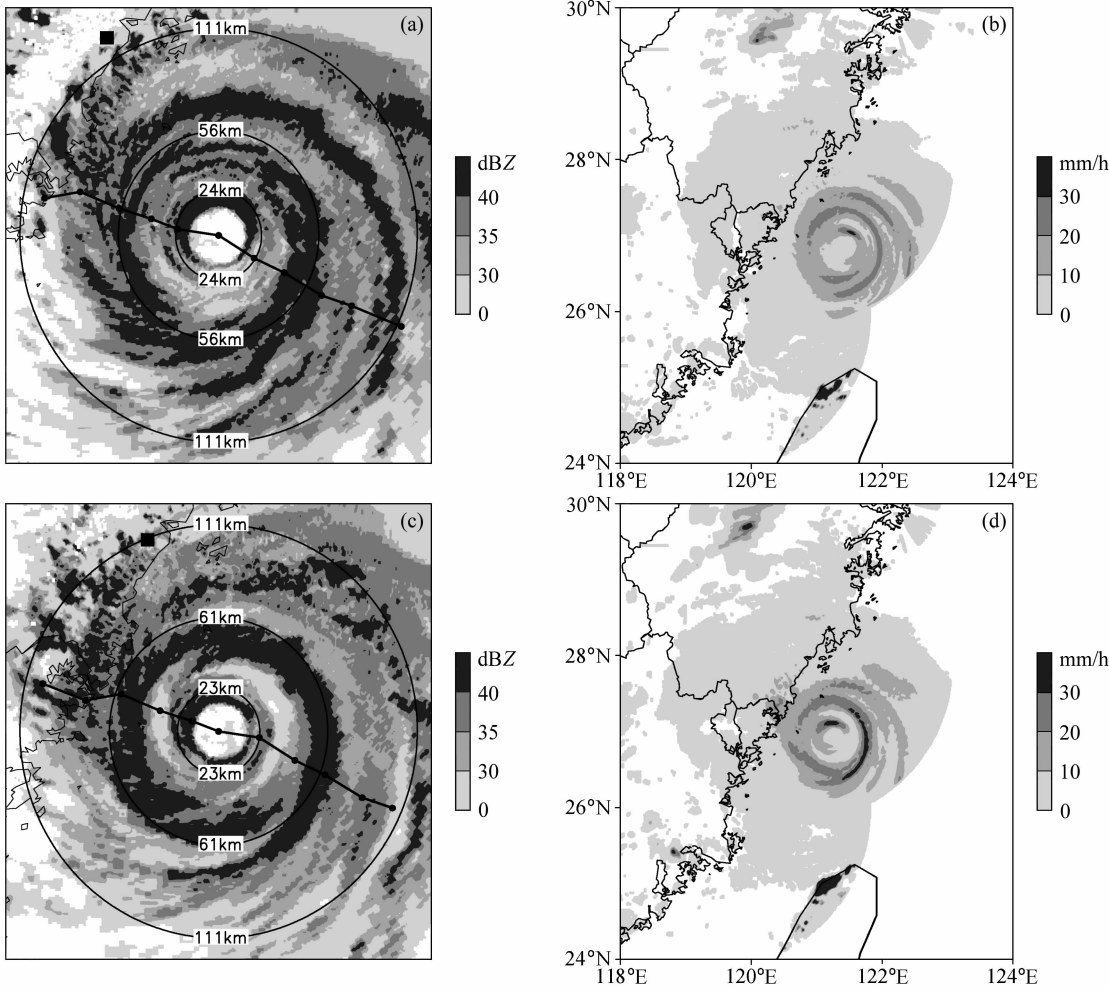


图 4 2006 年 8 月 10 日台风“桑美”(a、c、e、g) 雷达反射率因子 PPI 图(仰角为 0.5°)和(b、d、f、h) 雷达-雨量计新资料的 1 小时累积降水图：(a、b) 05 时；(c、d) 06 时；(e) 09：12；(f) 09 时；(g) 10：48；(h) 11 时。方块：雷达位置；粗实线：台风路径；黑圆点：每小时台风中心的位置；内圆环：内眼墙半径，中间的圆环：外眼墙半径，外圆环：雨带区
Fig. 4 (a, c, e, g) The radar reflectivity of typhoon Saomai (The antenna elevation angle is 0.5°) and (b, d, f, h) the distribution of the precipitation from the new radar-raingauge data on 10 Aug 2006: (a, b) 0500 UTC; (c, d) 0600 UTC; (e) 0912 UTC; (f) 0900 UTC; (g) 1048 UTC; (h) 1100 UTC. Square: radar location; thick real line: typhoon track; black points: hourly locations of the typhoon centers. The first solid circle marks the outer edge of the high reflectivity in the inner eyewall, the second solid circle marks the outer edge of the high reflectivity in the outer eyewall, and the solid circle at 111 km is the boundary of the rainband region

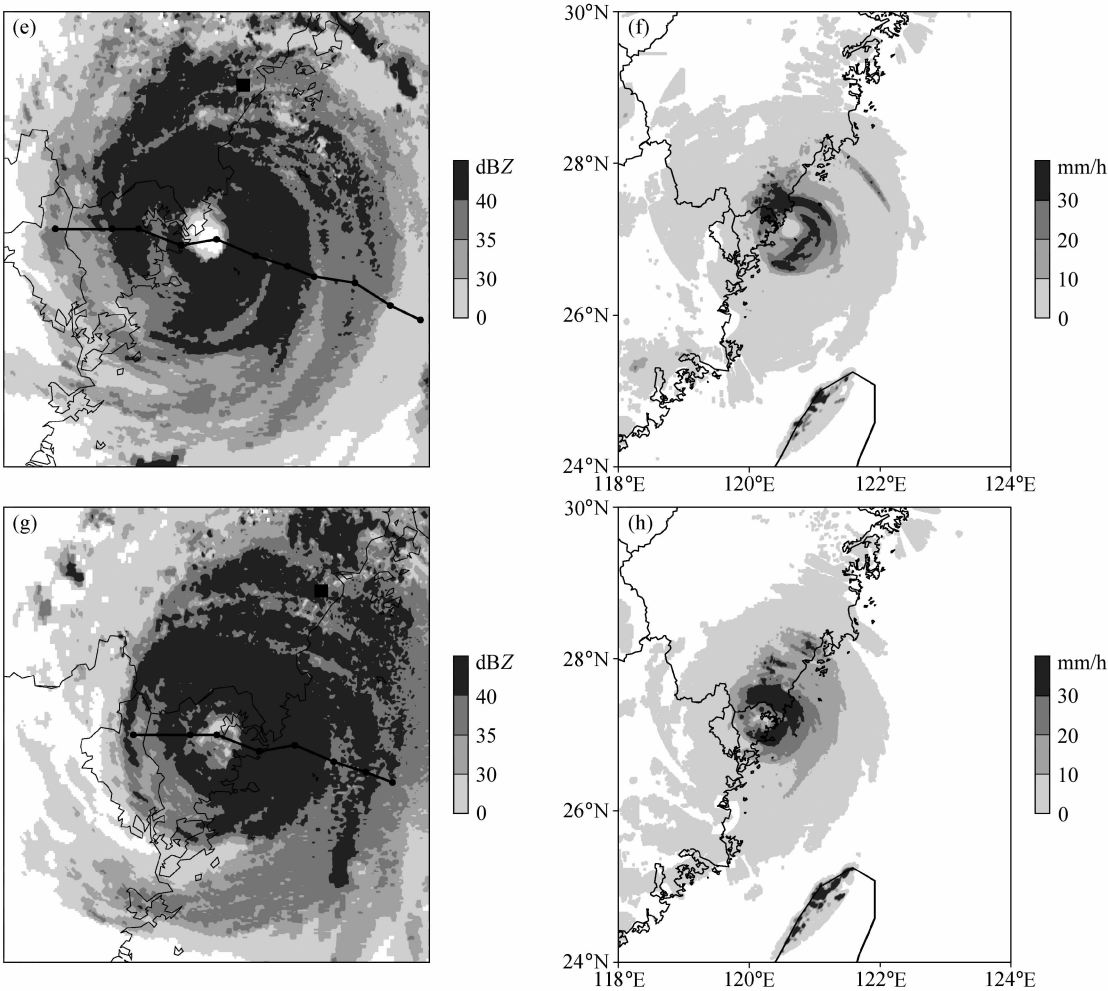


图 4 (续)
Fig. 4 (Continued)

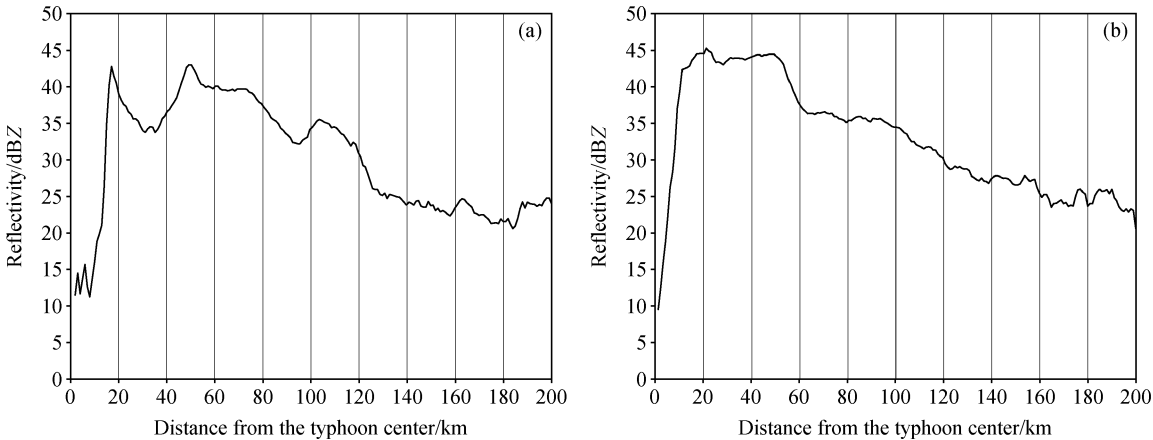


图 5 2006 年 8 月 10 日台风“桑美”雷达回波径向平均图: (a) 05 时; (b) 10 时。横坐标: 距台风中心的距离
Fig. 5 Azimuthally averaged reflectivity distribution on 10 Aug 2006; (a) 0500 UTC; (b) 1000 UTC

时到 09 时内、外眼墙的半径, 可以看到内、外眼墙半径随时间变化不大, 平均分别为 24 km 和 59 km。文中对于内核区的定义则参照 Willoughby et al. (1984) 的定义。Willoughby et al. (1984) 根据台

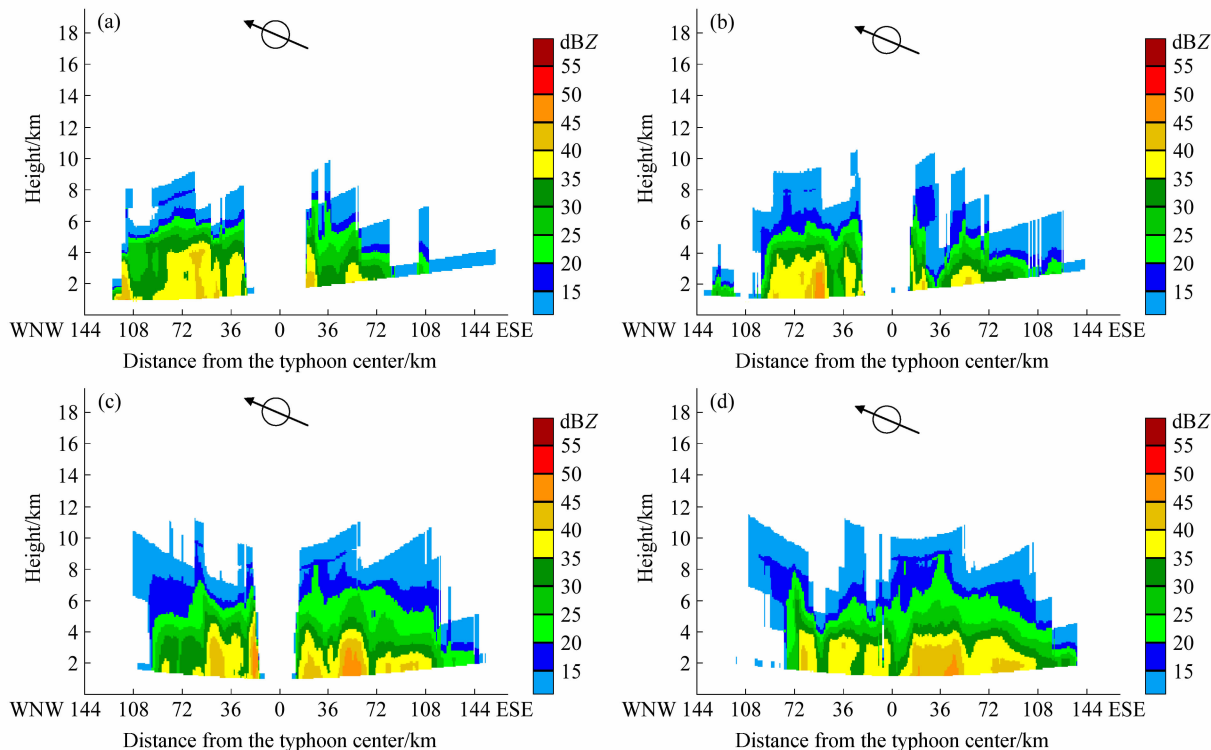


图6 2006年8月10日台风“桑美”雷达反射率因子沿台风移动方向的垂直剖面图：(a) 05时；(b) 06时；(c) 09:12；(d) 10:48。圆圈：台风；圆圈上的箭头：沿箭头方向作垂直剖面；横坐标：距台风中心的距离

Fig. 6 The vertical cross sections of radar reflectivity for typhoon Saomai on 10 Aug 2006 along the typhoon moving direction (arrow): (a) 0500 UTC; (b) 0600 UTC; (c) 0912 UTC; (d) 1048 UTC. The circle represents the typhoon symbol

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雨带, 代表台风内核区的边界。本文将台风中的主雨带作为内核区的外边界, 因而根据雷达平面回波图将“桑美”内核区的外边界定义为 59 km, 为了便于与登陆前相比较, 将外围区定义为从 59 km 到 111 km 的圆环区。

4.1 降水的时间分布特征

4.1.1 登陆前 (双眼墙循环过程 05~09 时)

表 2 给出登陆前“桑美”内、外眼墙和雨带区以及整个区域 111 km 以内降水率的时空平均值。其内、外眼墙、雨带的平均降水率分别为 12.6、20.1、9.8 mm/h, 内眼墙降水是雨带降水的 1.3 倍, 而外眼墙则是雨带的 2.1 倍。“桑美”内、外眼墙所占区域是整个区域的 28.5%, 对 111 km 内总降水的贡献为 42.7%。其中, 内眼墙的贡献随时间基本变化不大, 但外眼墙的贡献随时间则不断增加, 尽管在此过程中, 外眼墙的半径变化不大, 基

本维持在 59 km 左右。

为了便于比较, 表 2 同时还给出了“桑美”整个内、外眼墙区的时空平均降水率以及飓风 Alicia (Burpee and Black, 1989) 和 Allen (Marks, 1985) 的眼墙和雨带的平均降水率。Marks (1985) 也是将眼墙向外至 111 km 的圆环作为飓风 Allen 的雨带区, 而 Burpee et al. (1989) 则将眼墙外到 75 km 的圆环区作为飓风 Alicia 的雨带。对比发现, “桑美”内、外眼墙平均降水率是飓风 Alicia 和 Allen 的 3.6 倍和 1.7 倍; 而在雨带区, “桑美”的平均降水率则明显高于飓风 Alicia 和 Allen, 分别是它们的 3.5 倍和 5.4 倍。

表 3 为内、外眼墙和雨带中五个级别降水率覆盖区域百分数的时间平均和对平均降水贡献的百分数。可以看到, 大于 10 mm/h 的降水对平均降水率的贡献以及所占区域内、外眼墙都达到 50% 以上, 且外眼墙要大于内眼墙, 分别是 93% 和 86%, 说明“桑美”内、外眼墙区以强降水为主, 尤其是在外眼墙绝大部分区域为强降水区。在雨带中, 大

表 2 台风“桑美”内外眼墙和雨带的时空平均降水率及台风 Alicia (Burpee et al., 1989) 和 Allen (Marks, 1985) 眼墙和雨带的时空平均降水率

Table 2 Mean rainfall rate for the inner eyewall, the outer eyewall, and the rainband areas of typhoon Saomai, and the corresponding results for hurricanes Alicia (Burpee et al., 1989) and Allen (Marks, 1985)

台风	平均降水率/mm·h ⁻¹				
	眼墙	内眼墙	外眼墙	雨带	平均
Saomai	18.8 (11.0)	12.6 (2.0)	20.1 (9.0)	9.8 (27.8)	12.3 (38.7)
Alicia	5.2 (3.3)	/	/	2.8 (14.4)	3.2 (17.7)
Allen	11.3 (3.8)	/	/	1.8 (34.9)	2.7 (38.7)

注: 括号内的数值表示对应区域的面积 (单位: 10³km²) (下同)。

表 3 台风“桑美”内、外眼墙和雨带中五个级别的降水对相应区域平均降水率的贡献和覆盖区域

Table 3 Areal coverage percent and contribution percent of time- and area-averaged rainfall rate for five rainfall rate classes to that for the total area, the inner eyewall region, the outer eyewall region, and the rainband region of typhoon Saomai

降水率/mm·h ⁻¹	覆盖区域				平均降水率			
	总区域	内眼墙	外眼墙	雨带	总区域	内眼墙	外眼墙	雨带
<2.5	6%	10%	0%	8%	1%	1%	0%	1%
2.5~5.0	10%	9%	1%	12%	3%	3%	0.2%	5%
5.0~10.0	32%	22%	13%	40%	19%	14%	7%	31%
10.0~25.0	43%	50%	59%	37%	55%	62%	56%	54%
>25.0	9%	9%	27%	3%	22%	20%	37%	9%

于 10 mm/h 的降水也占到其区域的 40%，对平均降水的贡献率达到 63%。而小于 5 mm/h 的降水对平均降水率的贡献在内、外眼墙区和雨带中仅分别为 4%、0.2%和 6%，所占区域也很小。Burpee et al. (1989) 在研究飓风 Alicia 时发现，雨带中小于 5 mm/h 的降水率对平均降水率的贡献达到 51%。Marks (1985) 也发现大于 12.2 mm/h 的降水率占飓风 Allen 眼墙区的 25%，而在雨带中却不到 1%。上述结论与本文对于台风“桑美”雨带中的降水分析结果不一致，在登陆前“桑美”的雨带中降水强度也是比较大的。“桑美”是超强台风，从 10 日 05 时到 09 时一直维持在超强台风的级别，由雷达反射率垂直剖面图可以看到 (图 6) 即使是在雨带区，雷达回波也达到 8~12 km 高度，由低层到 4 km 高度处存在大范围的 35 dBZ 以上区域，因而在雨带中，对流也是比较活跃的，这可能是导致“桑美”雨带也以强降水为主的原因。

为了更加清楚地揭示“桑美”内、外眼墙和雨带中平均降水率随时间的变化情况，图 7 给出了这三个区域内平均降水率随时间的变化曲线，可见，从 05 时到 09 时即同心眼墙从维持到消亡过程中，

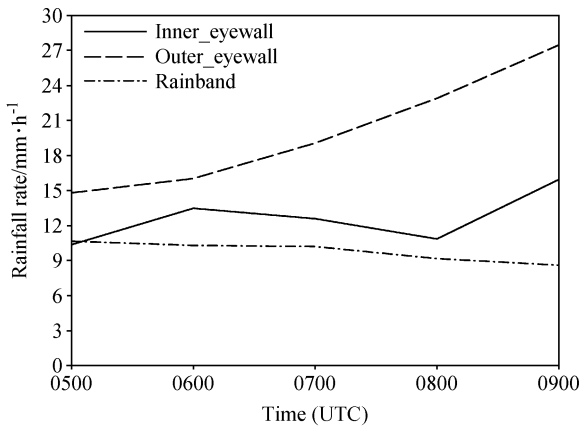


图 7 2006 年 8 月 10 日台风“桑美”登陆前内、外眼墙和雨带中的平均降水率随时间的变化

Fig. 7 Time series of area-averaged rainfall rate for the inner eyewall, the outer eyewall, and the rainband regions of typhoon Saomai before landfall

外眼墙的平均降水率始终大于内眼墙，外眼墙比内眼墙有更强的降水，且其平均降水率随时间一直是一个上升的趋势，从 06 时开始有一个迅速增强的过程。由雷达反射率因子 PPI 图 (图 4) 和垂直剖面图 (图 6) 可以看到，从 05 时到 09 时“桑美”外

表 4 同表 3, 但为不同时段
Table 4 As in Table 3, but for different periods of time

0500UTC~0600UTC								
降水率/mm·h ⁻¹	覆盖区域				平均降水率			
	总区域	内眼墙	外眼墙	雨带	总区域	内眼墙	外眼墙	雨带
<2.5	5%	13%	0%	6%	1%	1%	0%	1%
2.5~5.0	9%	11%	2%	11%	3%	3%	1%	4%
5.0~10.0	31%	20%	20%	35%	20%	13%	10%	25%
10.0~25.0	52%	46%	72%	46%	69%	59%	79%	65%
>25.0	3%	9%	6%	2%	8%	23%	10%	5%

0700UTC~0900UTC								
降水率/mm·h ⁻¹	覆盖区域				平均降水率			
	总区域	内眼墙	外眼墙	雨带	总区域	内眼墙	外眼墙	雨带
<2.5	7%	7%	0%	10%	1%	1%	0%	1%
2.5~5.0	10%	8%	0.02%	14%	3%	2%	0.004%	6%
5.0~10.0	33%	22%	8%	42%	19%	14%	3%	34%
10.0~25.0	37%	53%	51%	31%	45%	64%	42%	47%
>25.0	13%	9%	42%	4%	32%	19%	55%	12%

眼墙区内雷达回波要强于内眼墙,且反射率大值区上升高度要比内眼墙高,因而外眼墙内对流更加活跃,从而导致了外眼墙比内眼墙产生更强的降水。而内眼墙的平均降水率在 06 到 08 时却略有下降,08 时到 09 时为一个上升过程,但上升幅度明显要小于外眼墙。雨带中的平均降水率变化很小,为一个缓慢下降的过程,下降幅度约为 2 mm/h。Marks (1985) 注意到在同心眼墙循环过程中飓风 Allen 眼墙中平均降水率在增加的同时伴随着眼墙半径的减小。如果 Allen 眼墙平均降水率的增加是典型的同心眼墙循环,那么,在“桑美”这里并不会观测到同样的情况,因为在出现显著的外眼墙收缩前“桑美”就登陆了。

本文将登陆前 05 时到 09 时分成了两个时段,分别是同心眼墙维持时期(05 时~06 时)及合并时期(07 时~09 时)。分析不同时期内、外眼墙和雨带中五个级别降水率覆盖区域百分数的时间平均和对平均降水贡献的百分数。如表 4 所示,随着同心眼墙的发展,内、外眼墙大于 10 mm/h 的降水对平均降水率的贡献不断增加,所占区域也不断增加,到双眼墙合并阶段,其对平均降水率的贡献分别达到 83%和 97%,所占区域达到 62%和 93%,其中外眼墙大于 25.0 mm/h 的降水率对平均降水率的贡献增加的最为显著,从之前的 10%迅速增长

表 5 台风“桑美”内核区及外围的时空平均降水率
Table 5 Mean rainfall rate in the inner core and the outer areas of typhoon Saomai

	降水率/mm·h ⁻¹		
	内核	外围	平均
1000 UTC~1700UTC	18.1(10.9)	8.9(27.8)	11.5(38.7)
0500 UTC~0900UTC	18.8(10.9)	9.8(27.8)	12.3(38.7)

到 55%,说明到合并阶段,外眼墙的对流较之前更加旺盛。小于 5 mm/h 的降水率,则是正好相反的趋势,是一个减小的过程。在雨带区,大于 10 mm/h 降水的贡献率和所占区域随时间则是一个减小的趋势,而小于 5 mm/h 的降水,随时间略有增加。

4.1.2 登陆后(10 时~17 时)

为了便于对“桑美”登陆前后内核区和外围平均降水率进行比较,表 5 给出了登陆前后这两个区域的平均降水率。可以看到,登陆后内核和外围的平均降水率均有所减小,分别为 18.1 mm/h 和 8.9 mm/h,内核降水是外围的 2 倍。表 6 为内核和外围区中五个级别的降水覆盖区域百分数的时间平均和对平均降水贡献的百分数。由表 6 可见,登陆后,内核区小于 5 mm/h 的降水对平均降水率的贡献及所占区域均有所增加,而大于 10 mm/h 的降水对总降水的贡献则变化不大,但其中大于

25.0 mm/h的降水对总降水的贡献却有所增大,而10.0~25.0 mm/h 的降水率无论是对平均降水率的贡献还是所占区域均有减小。在外围区,小于5 mm/h 的降水及>25.0 mm/h 的降水在登陆前后的变化与内核区一致。“桑美”在登陆前后,其内核区和外围降水以强降水为主。由雷达反射率因子垂直剖面图(图6)也可以看出,在“桑美”登陆前后,其内核和外围区对流一直都很活跃,即使是在外围区雷达回波仍能达到8 km 以上,35 dBZ 以上的较强回波上升高度也比较高,这可能是导致“桑美”登陆前后降水强度都较大的原因。

图8是登陆前后内核区和外围平均降水率随时间的变化曲线,从图中可以看到,内核区平均降水率随时间先是一个增长的过程,其中从06时(即登陆前3小时左右)开始,有一个迅速增强的趋势,增加了1.8倍,到10时达到最大值27.1 mm/h。之后,随着台风强度的迅速减弱,内核区降水随时间呈现快速下降的趋势。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)。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,所以强降水朝内

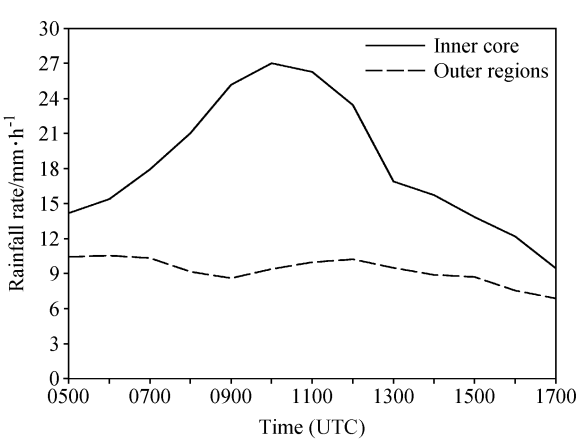


图8 2006年8月10日台风“桑美”登陆前后内核区和外围平均降水率随时间的变化
Fig. 8 Time series of area-averaged rainfall rate for the inner core and the outer regions of typhoon Saomai after landfall

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,地表粗糙的增加及地形爬升所产生的额外气流辐合结果,而非台风强度增强所造成。外围区平均降水率随时间的变化则明显小于内核区,总体上是一个缓慢下降的过程。

4.2 降水的空间分布特征

对于台风降水空间分布的非对称性已经有不少关于这方面的研究。Cline (1926) 指出登陆时最大

表6 台风“桑美”内核和外围区中五个级别的降水对相应区域平均降水率的贡献和覆盖区域
Table 6 Areal coverage percent and the contribution percent of time- and area-averaged rainfall rate for five rainfall rate classes to that for the total area, the inner core and the outer regions of typhoon Saomai

登陆后 (1000UTC~1700UTC)						
降水率/ mm·h ⁻¹	覆盖区域			平均降水率		
	总区域	内核	外围	总区域	内核	外围
<2.5	16%	3%	21%	2%	0.4%	3%
2.5~5.0	15%	11%	16%	5%	3%	7%
5.0~10.0	24%	20%	25%	16%	11%	20%
10.0~25.0	35%	40%	32%	46%	40%	52%
>25.0	12%	26%	5%	31%	46%	18%

登陆前 (0500UTC~0900UTC)						
降水率/ mm·h ⁻¹	覆盖区域			平均降水率		
	总区域	内核	外围	总区域	内核	外围
<2.5	11%	2%	8%	1%	0.1%	1%
2.5~5.0	11%	2%	12%	4%	0.6%	5%
5.0~10.0	32%	14%	40%	23%	7%	31%
10.0~25.0	41%	58%	37%	58%	57%	54%
>25.0	5%	24%	3%	13%	35%	9%

降水发生在台风的右前象限。Frank (1977) 通过分析小岛屿上雨量计降水资料, 发现台风降水分布没有明显的非对称性, 并提出之前的研究发现最大降水发生在右前象限可能是由于台风在向岸移动过程中受到地形的影响。Shapiro (1983) 在研究大洋上的飓风的移动对其边界层气流的作用时, 发现风暴移动会使边界层气流辐合加强, 从而接着使飓风移动路径前的降水增强。当风暴以 10 m/s 的速度移动时, 眼墙中最大辐合发生在风暴路径的前方偏右 (北半球); 而当风暴以 5 m/s 的速度移动时, 最大辐合则发生在涡旋前方宽广的弧形部分。

“桑美”在登陆前以平均 5.6 m/s 的速度向西北偏西方向移动。以台风移动方向为 y 轴正方向, 将内、外眼墙及雨带分为四个象限, 分别计算它们在四个象限内的平均降水率 (如图 9 所示)。内眼墙的最大空间平均降水率出现在台风移动路径的右前象限, 是出现在左后象限最小空间平均降水率的 2.2 倍; 在外眼墙, 最大空间平均降水率所在象限与内眼墙一致, 但最小空间平均降水率则出现在左前象限, 且与最大平均降水率相差较小。因而, 在内眼墙区的非对称性是前后要强于左右, 而外眼墙区则是左右要强于前后。雨带中, 最大和最小空间平均降水率分别出现在右后和左前象限, 它们相差达到 2.6 倍。图 9 中, 虚线、点虚线和点线箭头分别表示内、外眼墙和雨带区中最大降水率所在方位。内眼墙最大降水率出现在台风路径右侧 16° 的位置上, 而外眼墙最大降水率则出现在内眼墙的左边, 雨带则在其右侧。

“桑美”外眼墙和雨带的最大降水率从双眼墙维持期到合并期位置有明显变化。图 10 给出内、外眼墙及雨带沿移动路径的四个象限的空间平均降水分布的时间序列图 (作法如图 9)。可以看到, 内眼墙最大降水率位置变化不大, 而外眼墙较前一时段位置朝右偏移, 雨带则朝左偏移, 其中外眼墙偏移更为明显。图 10a 和 10b 中外眼墙的最大降水率从距台风移动路径右侧 11° 的方位向右转到 111° 。因此, 图 9 中内、外眼墙和雨带的最大降水的位置并不能代表图 10a、b 分时段的最大降水的位置。在此过程中, 内、外眼墙和雨带中的最大空间平均降水率随时间没有变化, 一直在右前象限和右后象限。内眼墙的非对称性始终是前后大于左右, 而外眼墙在双眼墙维持期是前后大于左右, 但在双眼墙

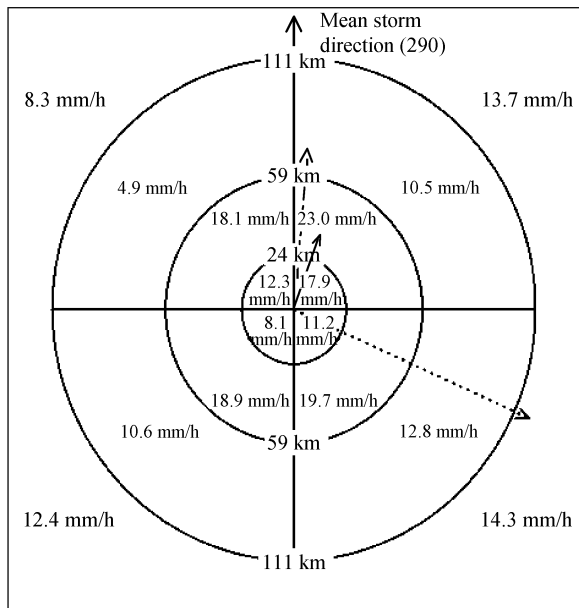


图 9 2006 年 8 月 10 日台风“桑美”登陆前内、外眼墙和雨带区相对于风暴移动路径的四个象限的平均降水率。最大圆环之外的数值表示 111 km 以内总区域的四个象限的平均降水率; 括号内数字: 风暴移动路径的方位角; 虚线箭头: 内眼墙最大降水的方位, 点虚线箭头: 外眼墙最大降水的方位, 点线箭头: 雨带最大降水的方位

Fig. 9 Mean rainfall rate in the four quadrants, relative to the typhoon moving track, for the inner eyewall, the outer eyewall, and rainband regions of typhoon saomei before landfall. The numbers outside the largest circle are mean rainfall rates for the total area; the number in the brackets is the azimuth of the storm moving track; dashed, dash-dotted and dotted arrows indicate the azimuths of the maximum rainfall rate in the inner eyewall, the outer eyewall and rainband regions, respectively

合并期, 除了左前象限降水略少外, 其余象限空间平均降水率均达到 20 mm/h 以上。目前, 导致外眼墙和雨带最大降水位置发生转变的因子还不清楚, 以后将进行更深入的研究。

“桑美”在登陆前, 其内、外眼墙最大降水始终在移动路径的右侧。飓风 Allen (Marks, 1985) 眼墙中平均最大降水发生在移动路径右侧 $10^\circ \sim 15^\circ$, 而 Burpee et al. (1989) 研究飓风 Elena 则发现, 其眼墙中平均最大降水发生在移动路径右侧 45° 的位置上, 比 Allen 飓风的最大降水位置偏右, 这两个台风的移速分别为 10 m/s 和 4.9 m/s。从图 9 可以看到登陆前“桑美”内、外眼墙最大降水在移动路径右侧的 16° 和 4° , 整个眼墙范围内最大降水位于移动路径右侧的 16° , 在飓风 Elena 的左边, 而在

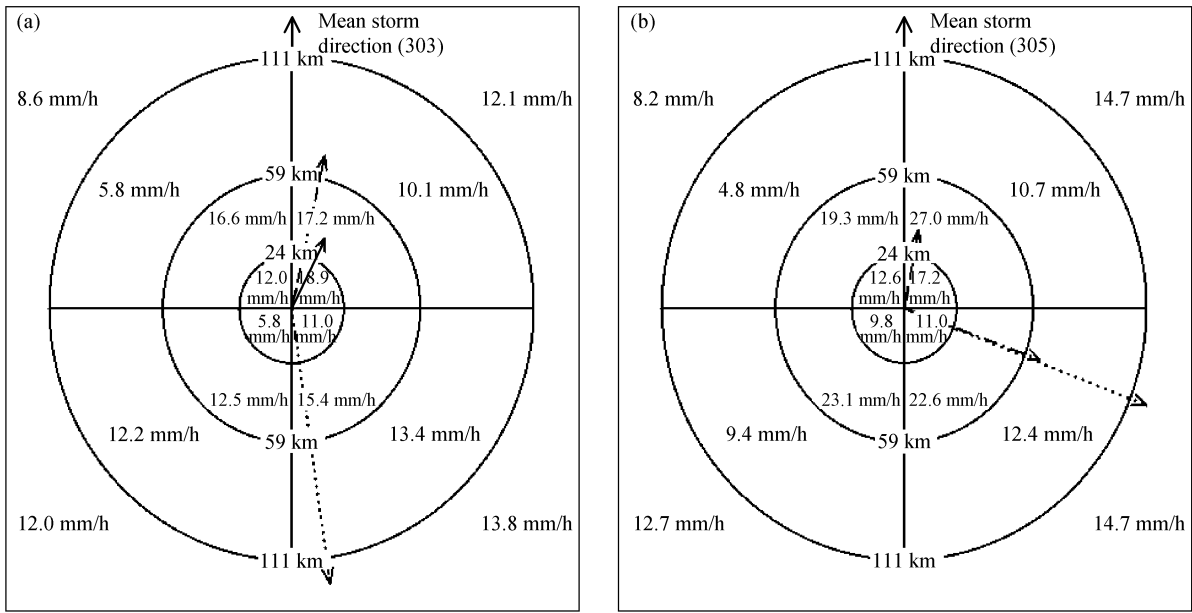


图 10 同图 9，但为：(a) 05~06 时；(b) 07~09 时
Fig. 10 As in Fig. 9, but for (a) 0500-0600 UTC, (b) 0700-0900 UTC

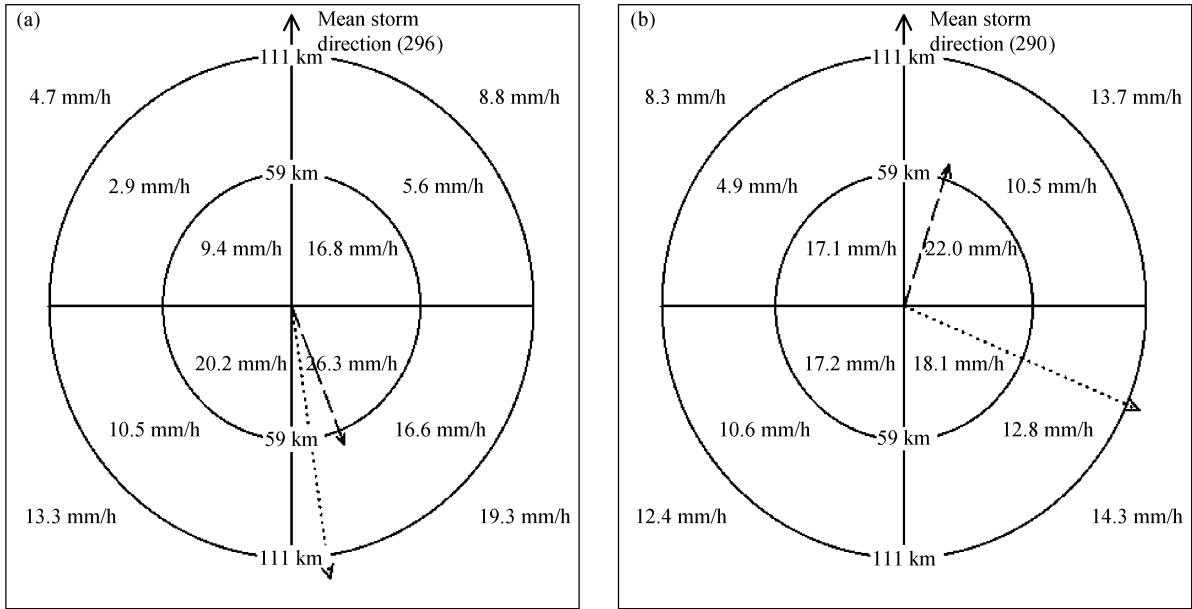


图 11 2006 年 8 月 10 日台风“桑美”登陆前 (a)、后 (b) 内核和外圈区相对于风暴移动路径的四个象限的平均降水率。最大圆环之外的数值表示 111 km 以内总区域的四个象限的平均降水率；括号内数字：风暴移动路径的方位角；虚线箭头：内核最大降水的方位，点线箭头：外圈区最大降水的方位
Fig. 11 Mean rainfall rate in the four quadrants, relative to the typhoon moving track, for the inner core and outer regions of typhoon saomei (a) before and (b) after landfall. The numbers outside the largest circle are mean rainfall rates for the total area; the number in the brackets is the azimuth of the storm moving track; dashed and dotted arrows indicate the azimuths of the maximum rainfall rate in the inner core and outer regions, respectively

飓风 Allen 的右侧，然而“桑美”的移速为 5.6 m/s。由此可见，尽管 Shapiro (1983) 的模式中风暴移速

会影响边界层辐合的位置，但这里移速的变化并没有影响这三个台风眼墙最大降水的相对位置。因

而,移速仅是决定眼墙降水分布的一个因子,风暴强度、地理位置、环境垂直风切等都会对台风降水结构产生影响。

“桑美”登陆后,继续沿着西北偏西方向移动,移速比登陆前略快,由图 11(做法如图 9)可以看到,登陆后内核区和外围更多的降水是落在移动路径的后方而不是登陆前的右侧,其非对称性均是前后大于左右。登陆后内核和外围区最大平均降水率比登陆前均向右偏移,其中内核区偏移的更为明显,由登陆前路径右侧 16° 偏移到 160° 。由雷达回波图也可以看到,在“桑美”登陆后强回波主要集中在台风中心的东北部到东部,从而导致登陆后最大空间平均降水往右转移。

5 结论与讨论

本文利用雷达-雨量计联合测量降水技术得到的 1 小时雨量分布资料,分析了台风“桑美”登陆前后的降水结构及其时空演变特征,尤其是登陆前双眼墙循环过程中降水结构的变化特征。分析时,在登陆前将“桑美”分为内、外眼墙和雨带区;登陆后分为内核和外围区进行研究,研究结果表明:

(1)“桑美”在登陆前经历了双眼墙循环过程,从 05 时到 06 时为双眼墙维持阶段,07 时到 09:12 为双眼墙合并阶段。在整个过程中,内、外眼墙半径变化很小,平均分别为 24 km 和 59 km,且由于在双眼墙合并后“桑美”就迅速登陆了,因而没有出现外眼墙半径收缩的现象。

(2)对“桑美”的降水分析表明,“桑美”在登陆前内、外眼墙和雨带大于 10 mm/h 的降水对平均降水率的贡献均达到 50%以上,以强降水为主。尽管内、外眼墙整个区域的平均降水率是雨带的 2 倍,但对距台风中心 111 km 半径内区域的降水贡献仅为 42.7%。随着双眼墙的维持、合并,内眼墙对总降水的贡献变化不大,但外眼墙对总降水的贡献则随时间不断增加,尽管外眼墙的半径变化不大维持在 59 km 左右。在此过程中,内、外眼墙大于 10 mm/h 的降水对平均降水的贡献不断增加,而小于 5 mm/h 的降水对平均降水率的贡献则不断减小,外眼墙的平均降水率随时间始终大于内眼墙,比之内眼墙有更强的降水;雨带区大于 10 mm/h 的降水和小于 5 mm/h 的降水对平均降水的贡献则与内、外眼墙正好是一个相反的趋势,其平均降水率

随时间的变化明显小于内、外眼墙,是一个缓慢下降的过程。

(3)“桑美”登陆后,内核区和外围降水仍以强降水为主,但对比登陆前,内核区和外围小于 5 mm/h 的降水对平均降水率的贡献有所增加。登陆前后,内核区平均降水率随时间是一个先增加后减小的过程,在登陆前 3 小时左右,有一个迅速增强的过程,增加了 1.8 倍,到 10 时达到最大值。

(4)对于“桑美”登陆前后降水的空间分布研究发现,登陆前内、外眼墙和雨带的最大降水率始终在台风移动路径的右侧,雨带总是在内、外眼墙的右方。从双眼墙维持到合并阶段,外眼墙和雨带最大降水率随时间有一个变化,外眼墙最大降水率随时间向右偏移,且偏移较大,从台风移动路径右侧 11° 的方位向右转到 111° ;而雨带则是向左偏移。而在登陆后,“桑美”内核区和外围更多的降水落在了移动路径的后面而不是登陆前移动路径的右侧。对比飓风 Elena (Burpee et al., 1989) 和飓风 Allen (Marks, 1985) 发现,风暴移速仅是决定眼墙降水分布的一个因子,其变化对这三个台风眼墙最大降水的相对位置没有影响。影响台风眼墙降水分布不对称性的因子还有很多,如风暴强度、地理位置、环境垂直风切变等都会对台风降水结构产生影响。此外,本文所用降水资料并未考虑到强风对雨量计和雷达测量降水的影响,而强风也是台风“桑美”致灾的主要原因之一,台风移动速度过快及导致的强风也会导致降水估测的强度误差和偏移,对台风降水结构的分析也会有一定影响,这些均需要在今后作进一步研究。

参考文献 (References)

- Burpee R W, Black M L. 1989. Temporal and spatial variations of rainfall near the centers of two tropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 2204–2218.
- Cline I M. 1926. *Tropical Cyclones* [M]. Macmillan, 301pp.
- 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 [J]. *应用气象学报*, 15 (4): 436–444.
- Ding Weiyu, Chen Zitong. 2004. Using TRMM data to analyse the precipitation distributions of landfall tropic cyclones in Guangdong in 2002 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (4): 436–444.
- Frank W M. 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone. Part I: Storm structure [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 105:1119–1135.

- 官莉, 王振会, 裴晓芳. 2004. 雷达估测降水集成方法及其效果比较 [J]. 气象科学, 24 (1): 4-11. Guan Li, Wang Zhenhui, Pei Xiaofang. 2004. The consensus methods and effects of estimating rainfall using radar [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 24 (1): 4-11.
- 何会中, 程明虎, 周凤仙. 2006. 0302 号(鲸鱼) 台风降水和水粒子空间分布的三维结构特征 [J]. 大气科学, 30 (3): 293-305. He Huizhong, Cheng Minghu, Zhou Fengxian. 3D structure of rain and cloud hydrometeors for typhoon Kujira (0302) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 293-305.
- 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 2007. 台风 Ranim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验 [J]. 大气科学, 31 (2): 433-442. Ji Chunxiao, Xue Genyuan, Zhao Fang, et al. 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Ranim during landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 433-442.
- 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 [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 1645-1660.
- Marks F D Jr. 1985. Evolution of the structure of precipitation in Hurricane Allen (1980) [J]. Mon. Wea. Rev., 113: 909-930.
- Rodgers E B, Chang S W, Pierce H F. 1994. A satellite observational and numerical study of precipitation characteristics in western North Atlantic tropical cyclone [J]. J. Appl. Meteor., 33: 129-139.
- 斯公望. 1990. 暴雨和强对流环流系统 [M]. 北京: 气象出版社, 128pp. Si Gongwang. 1990. Rainstorm and Severe Convection Circulation System (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 128pp.
- Shapiro L J. 1983. The asymmetric boundary-layer flow under a translating hurricane [J]. J. Atmos. Sci., 40: 1984-1998.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 132pp. Tao Shiyang. 1980. The Torrential Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 132pp.
- 王新利, 唐传师, 刘显通, 等. 2007. 利用 TRMM 卫星资料分析“桑美”台风云系特征 [J]. 气象与减灾研究, 30 (3): 7-11. Wang Xinli, Tang Chuanshi, Liu Xiantong, et al. 2007. Cloud characters of typhoon Saomai on the TRMM satellite data [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 30 (3): 7-11.
- Willoughby H E, Marks F D, Feinberg R J. 1984. Stationary and moving convective bands in hurricanes [J]. J. Atmos. Sci., 41: 3189-3211.
- 岳彩军. 2009. “海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析 [J]. 大气科学, 33 (1): 51-70. Yue Caijun. 2009. A quantitative study of asymmetric characteristic genesis of precipitation associated with typhoon Haitang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 51-70.
- 郑培昌, 戴铁丕, 傅胜德, 等. 1992. 用变分方法校准数字化天气雷达测定区域降水量基本原理和精度 [J]. 大气科学, 16 (2): 248-256. Zhang Peichang, Dai Tiepi, Fu Shengde, et al. 1992. Principle and accuracy of adjusting the area precipitation from digital weather radar through variational method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (2): 248-256.
- 郑媛媛, 谢亦峰, 吴林林, 等. 2004. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验 [J]. 热带气象学报, 20 (2): 192-197. Zheng Yuanyuan, Xie Yifeng, Wu Linlin, et al. Comparative experiment with several quantitative precipitation estimator techniques based on Doppler radar over the Huaihe valley during rainy season [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (2): 192-197.
- 张建海, 薛根元, 诸晓明, 等. 2007. 台风 Ranim 登陆后引发强降雨成因和暴雨分布的诊断分析 [J]. 海洋学研究, 25 (2): 1-12. Zhang Jianhai, Xue Genyuan, Zhu Xiaoming, et al. 2007. Analysis of heavy rain causes and distribution caused by the landfall typhoon “Ranim” [J]. Journal of Marine Sciences (in Chinese), 25 (2): 1-12.
- 周仲岛, 颜建文, 赵坤. 2004. 台湾地区登陆台风降雨结构之雷达观测 [J]. 大气科学(台湾), 32 (3): 183-204. Zhou Zhongdao, Yan Jianwen, Zhao Kun. 2004. The radar observation of the precipitation structure of the landfall typhoons in Taiwan [J]. Atmospheric Sciences (Taiwan) (in Chinese), 32 (3): 183-204.
- 中国气象局. 2008. 热带气旋年鉴 2006 [M]. 北京: 气象出版社, 101pp. China Meteorological Administration. 2008. Yearbook of Tropical Cyclone 2006 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 101pp.