

“浣熊”强度变化的环境背景和卫星观测分析

李 勋¹ 李泽椿² 赵声蓉² 王 勇¹ 赵大军³

(1. 南京信息工程大学, 南京 210044; 2. 国家气象中心; 3. 93762 部队气象台)

提 要: 利用实况观测定位和强度资料、NCEP 的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 全球最终分析资料、NOAA 周平均 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 海温再分析资料和 FY 卫星水汽图像, 分析台风浣熊(0801)的环境背景条件和内核结构演变与强度变化的关系。结果表明: (1) 环境风垂直切变增大至 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右与南海北部海表温度逐步减小导致最大可能强度不断降低是“浣熊”快速发展过程中断并减弱的重要外部条件; (2) 卫星水汽图像显示内核结构存在眼壁破裂和复原现象, 该现象精确地反映其强度变化。眼壁破裂(复原)过程导致“浣熊”减弱(增强)。

关键词: 热带气旋 强度变化 观测分析 卫星水汽图像 眼壁破裂

Analysis of Environment Background and Satellite Observations About Intensity Changes of Typhoon Neoguri

Li Xun¹ Li Zechun² Zhao Shengrong² Wang Yong¹ Zhao Dajun³

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;

2. National Meteorological Center, China Meteorological Administration;

3. Meteorological Observatory of PLA, No. 93762)

Abstract: The role played by environmental background and inner core in the changes of intensity of Typhoon Neoguri is documented by using observed track data, NCEP Final Analysis, NOAA OI SST weekly means and FY satellite water vapor images. The results show that (1) the storm weakening is closely related to the vertical wind shears and sea surface temperature. The vertical wind shears increase in magnitude to about 10m/s , and the Maximum Potential Intensity (MPI) decreases when the system moves over a cool tongue of water, the intensification comes to an end; (2) The breakdown and recovery of eyewall revealed by vapor images, are consistent with intensity changes. The breakdown (recovery) of eyewall leads to the storm weakening (deepening).

Key Words: tropical cyclones intensity changes observational study satellite water vapor images eyewall breakdown

引言

热带气旋(简称 TC)是来自海洋的重要天气系统,带来明显的风雨天气。目前,TC 路径预报比强度和风雨分布的预报遥遥领先。TC 强度变化和风雨分布与很多因素有关^[1]。研究表明,中尺度对流系统发展^[2]以及南下的底层冷空气入侵^[3]可导致登陆 TC 强降水的发生,并常伴有中尺度特征^[4]。影响 TC 强度变化的关键外部动力因子是环境风垂直切变大小^[5]。在 TC 内核传播的涡旋罗斯贝波(简称 VRWs)通过影响内核结构^[6-7]以及内螺旋雨带与眼壁的相互作用^[8]等内部动力过程也能引起 TC 强度变化。此外,台湾山脉地形破坏 TC 内核低层结构,导致干舌出现,TC 发展受到抑制^[9]。除了内、外部动力过程,海面温度(简称 SST)则是影响 TC 强度变化最重要的热力因子^[5]。Emanuel^[10]把 TC 当成受 SST 和边界层热力条件驱动的卡诺热机,并推算出理论最大可能强度(简称 MPI)。然而,DeMaria 和 Kaplan^[11]对大西洋飓风的统计分析发现大多数 TC 只能达到 MPI 值的 55%,只有 20%的 TC 能达到 MPI 值的 80%以上。在实际情况下,TC 受诸多影响因子共同作用,使得强度预报变得较为复杂。

0801 号台风浣熊(Neoguri)是 1949 年以来一年中登陆华南地区最早的一个台风,对当地造成严重影响。“浣熊”进入南海以后快速发展,此后出现强度变化。本文利用热带气旋定位和强度资料、NCEP 全球最终分析资料、NOAA 周平均海温再分析资料和卫星水汽图像分析“浣熊”的环境背景条件及其结构演变与强度变化的关系,发现环境风垂直切变逐渐增大和南海北部海表温度逐步减小是“浣熊”停止进一步加强的重要外部因素,而内核眼壁破裂和复原现象能精确地反

映其强度变化。

1 资料及分析方法

热带气旋定位和强度资料取自国家气象中心(简称 BABJ)和联合台风警报中心(简称 JTWC,根据文献[12],1min 平均风速需乘以系数 0.871 转换为 10min 平均)。

使用 NCEP 全球最终分析资料(水平分辨率 1°,间隔 6h)计算环境风垂直切变(简称 VWS),中心定位取自 JTWC,对于 U 、 V 分量,首先减去风暴移动速度,然后将格点数据根据双线性方法插值到柱坐标,计算式^[13]如下:

$$\langle U \rangle = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^5 \left\{ \frac{\bar{U}_{i-1} + \bar{U}_i}{2} \right\} A_i \quad (1)$$

$$\langle V \rangle = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^5 \left\{ \frac{\bar{V}_{i-1} + \bar{V}_i}{2} \right\} A_i \quad (2)$$

其中符号 $\langle \rangle$ 表示距 TC 中心 500km 半径圆域内各层面积平均, i 表示半径索引, A_i 表示 Δr 圆环面积, $\Delta r=100\text{km}$, $\bar{U}$ 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 VWS 大小。

使用 NOAA 提供的周平均海温资料(水平分辨率 1°)^[14] 计算 TC 最大可能强度(MPI),计算式^[15]如下:

$$MPI = \min[X, 85] \quad (3)$$

其中, $X = A + B(\exp)[C(SST - SST_0)]$, $A = 34.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $B = 55.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $C = 0.1813^\circ\text{C}$ 和 $SST_0 = 30^\circ\text{C}$ 。

FY 卫星水汽图像产品处理依据 MICAPS 系统灰度值对照表,可按照 256 个灰阶对应的亮温值数字化显示水汽图像,为了方便并且不失真地显示图像,采用 26 级渐变灰度表示水汽图像中的亮温值,效果与文献[16]相似(见图 5),其中 256 个灰阶归类为 4 个等级,即深灰暗区 $54.69 \sim -27^\circ\text{C}$,灰色暗区 $-31 \sim -40^\circ\text{C}$,浅灰区 $-43 \sim -52^\circ\text{C}$,白亮

区 $-55 \sim -95.0^{\circ}\text{C}$, 并特别划分 $-15 \sim -27^{\circ}\text{C}$ 亮温值暗区表示眼壁破裂特征, 方便下文分析。

2 “浣熊”过程概况和强度变化特征

“浣熊”于 2008 年 4 月 15 日 06 时(世界时,下同)离开苏禄海后增强为热带风暴,并向西北方向移动,16 日 00 时增强为强热带风暴,12 时增强为台风,受副热带高压南缘偏东气流引导,向西偏北方向移动。该时期“浣熊”发展较为迅速,中心附近最大风速(简称 MaxSW)在 30h 内增加 $18\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右(BABJ 记录值为 $18\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 至 $35\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, JTWC 记录值为 $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 至 $34\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(图 1)。此后“浣熊”发展缓慢,强度略微增大(BABJ 记录 MaxSW 增加 $3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。18 日 14 时 30 分,“浣熊”在海南省文昌市龙楼镇登陆,成为 1949 年以来一年中登陆华南地区最早的一个台风。登陆时中心附近最大风速 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 受其影响,海南全省陆地普降暴雨到大暴雨。19 日减弱为强热带风暴,稍后减弱为热带风暴后,在下午于广东省阳江市附近的东平镇再次登陆。其雨带横扫珠江口和粤东,对广东西部乃至珠三角和更大范围造成较严重的影响。JTWC 记录的 MaxSW 比 BABJ 的略为偏大(图 1),且在 17 日 06—18 时之间前者出现强度波动,即 $40\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减弱至 $38\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 随后重新加强为 $43\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

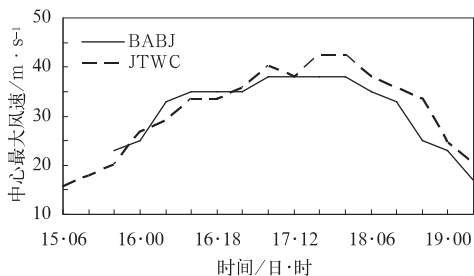


图 1 中心附近最大风速(单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
15·06 表示 15 日 06 时,下同

南方刚进入汛期就迎来台风,台风来得如此之早、强度如此之大都是前所未有的。在“浣熊”发展过程中,达到台风强度级别后即不再明显加强,并出现强度变化过程,鉴于此,下文将对其强度变化作出分析。

3 环境背景与“浣熊”强度变化

3.1 环境风垂直切变

VWS 大小是研究环境流场对 TC 强度影响的重点。由于 JTWC 未提供中心最低气压(简称 MSLP),因此图 2 只显示 BABJ 记录的 MSLP 和计算得到的 VWS 进行对比。可见,在“浣熊”发展为热带风暴以后,随着 MaxSW 增大,VWS 也逐渐增大,由 15 日 06 时的 $2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右增加到 16 日 06 时 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,该时期 MSLP 从 998hPa 下降至 975hPa,降幅 23hPa;6h 后 VWS 出现波动,减小至 $7.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;16 日 18 时,VWS 再次增大至 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;17 日 00 时 VWS 达到极值($10.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),6h 后 VWS 逐渐减小,MSLP 仅下降了 5hPa,达到极值(965hPa),说明“浣熊”停止发展;24h 后 VWS 减小至 $3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,此后 VWS 维持在 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,“浣熊”在 VWS 低值情况下维持强度并逐渐减弱。

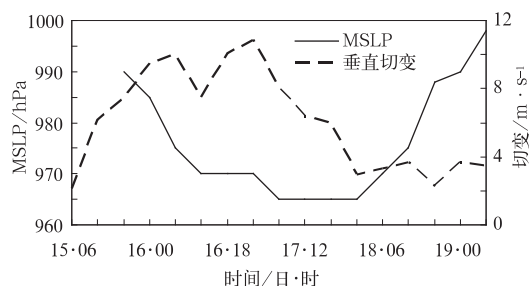


图 2 “浣熊”中心风垂直切变和
中心最低气压(MSLP)

一般认为,由于“通风流”作用,较大的 VWS 值不利于 TC 发生发展^[17-18]。Zhu

等^[17]根据飓风 Bonnie(1998)的数值模拟发现当 VWS 增大的同时 Bonnie 也在迅速加强,当 VWS 达到极大值时,Bonnie 停止加强。Wu 等^[18]数值研究飓风 Erin(2001)时也发现类似现象,当 VWS 达到极值并开始减弱后,Erin 才停止加强。Zhu 等^[17]认为该现象体现了 VWS 影响 TC 发展的时间差效应,随着 VWS 逐步增大至 $17\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,该时间差效应可能为 24~36h。

可见,“浣熊”MaxSW 和 VWS 演变验证上述研究的观点,即随着 VWS 增大,TC 发展逐步受到抑制,体现一定的时间差效应。

3.2 海表面温度

TC 在发展和维持过程中不断地从处于其下的海表面获取能量,它的强度与 SST 紧密相关^[10]。为了考察“浣熊”与 SST 的关系,绘制“浣熊”生命史内周平均 SST(图 3)。可见热带低压发展为台风(16 日 12 时)之前均在 $\text{SST} > 28.5^\circ\text{C}$ 的洋面活动。“浣熊”继续北上并略微加强,而周围 SST 逐渐降低,18 日 00 时以前“浣熊”在 SST 为 $27\sim 28^\circ\text{C}$ 的洋面上活动。18 日 00 时以后“浣熊”活动区域 SST 由 27°C 逐渐降低到 25°C ,强度减

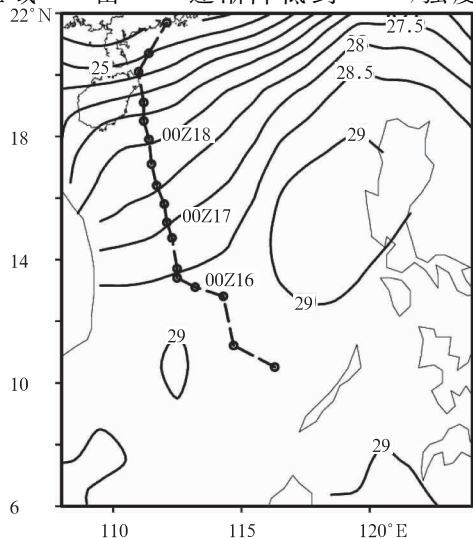


图 3 “浣熊”移动路径(间隔 6 小时)和周平均海温(等值线,单位: $^\circ\text{C}$)

弱明显,24h 之内即减弱为热带风暴。

DeMaria 和 Kaplan^[11]建立了 SST 和 MPI 的定量关系,即 SST 增大时,MPI 也增加。为了进一步考察“浣熊”强度与 SST 的关系,图 4 给出 MPI 和 MaxSW 的时间剖面,可见随着 SST 逐步降低,在 16 日 12 时以后,其所能支持的 MPI 呈近似线性递减,这也说明 SST 所能提供的热力条件在逐步减弱,因此 SST 降低是“浣熊”在 17 日以后强度逐步减弱的主要原因之一。

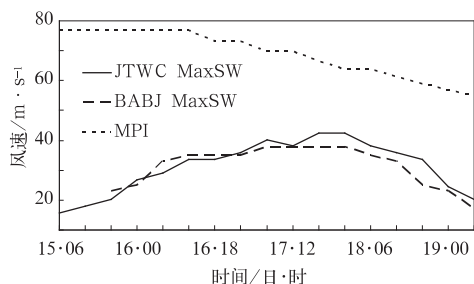


图 4 “浣熊”最大可能强度与中心附近最大风速

4 FY-2C 卫星观测与强度变化

以上分析表明,VWS 大小和南海北部 SST 趋冷是“浣熊”加强趋缓并减弱的重要原因,但不能精确反映其加强趋缓以及 MaxSW(JTWC 记录)所体现的强度变化。陈联寿等^[1]指出,TC 内部中小尺度系统的发展能显著影响强度变化。Zeng 等^[5]和 Wu 等^[18]认为,TC 强度与内部动力过程有密切关系。由于水汽图像可以很好地表征云团垂直运动,近年来,水汽图像常被用于中纬度天气系统的研究和预报^[19],对于侵入的研究^[16]表明,水汽图像在研究天气系统演变过程中有着形象直观、时间分辨率高的特点,能够显示出精细的特征。通常,水汽图像的白亮区为水汽区域或云团所在,与大气中的上升运动区域相匹配^[19],反之,灰暗区为较干区,对应下沉运动。

本文试图以 FY 卫星水汽图像产品演示“浣熊”内核的演变过程。16 日 00 时是“浣

熊”加强为强热带风暴的情形(图5),南海中

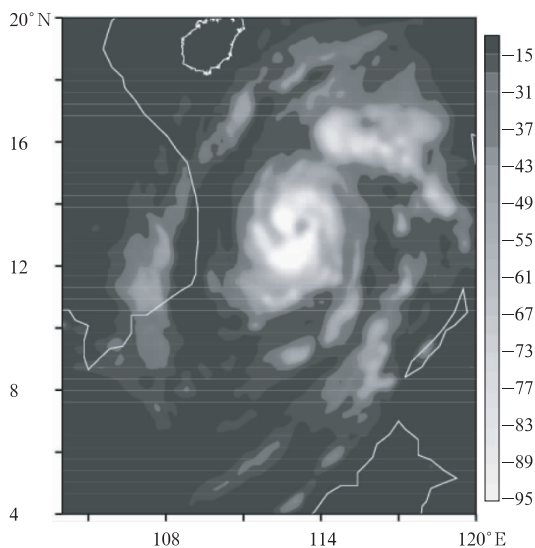


图 5 2008 年 4 月 16 日 00 时 FY-2C 卫星水汽图像(单位:℃)

部的风暴云团已较为紧密,中心温暖,眼区稍微暗淡,从中心区域旋出的是白亮的深厚对流云团,对流旺盛,反映了 TC 的内核区域所在。内核以外,亮温趋暖,云团高度降低,对流减弱,表现为卷云特征。1 小时后,“浣熊”内核云团可以模糊地辨识眼心(图 6),Max-SW 进一步加大,风暴增强。东北象限分离出来的云团由于失去水汽输送等外部条件的支持,逐渐消散。

16 日 12 时,“浣熊”加强为台风,可见主体云团收缩明显。1 小时后,在内核东北象限(图 6,黑实线方框)云团趋暖,原本闭合的眼壁云团破裂出现暖的“缺口”。随后 2 小时内冷的眼壁云团逐渐填补该“缺口”,趋于闭合。16 时“缺口”扩大,1 小时后“缺口”处亮温增暖至 -27°C 以上,该亮温值暗区表明存

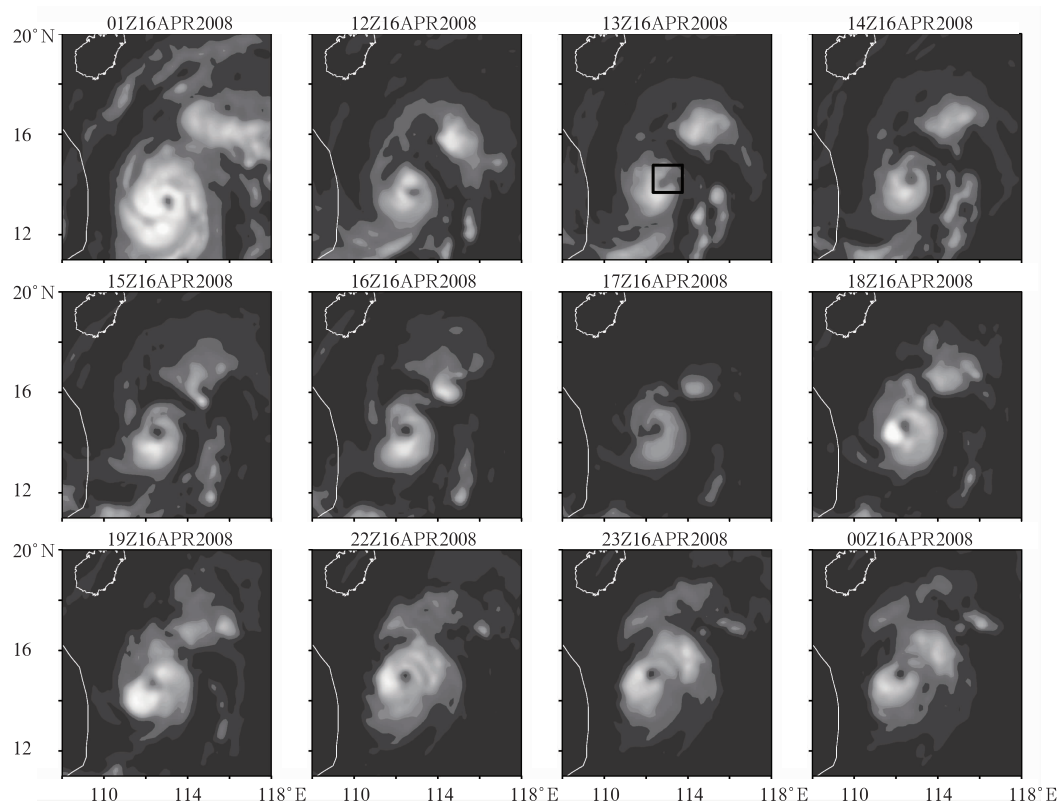


图 6 2008 年 4 月 16 日 FY-2C 卫星水汽图像

时间见每幅小图题图,黑色方框表示眼壁破裂区域。

00Z16APR2008 表示 2008 年 4 月 16 日 00 时(世界时,下同)

在着眼壁破裂现象。18 时,“缺口”被冷云团填补,眼壁闭合。至 22 时,可以发现风暴中心有小而清晰的眼,同时东北象限逐渐开始分离出另一块白亮云团。

17 日 00 时,东北象限云团完成分离,内核再次出现稍暖的“缺口”,2 小时后闭合(图 6)。10 时,内核眼壁出现明显的亮温值暗区暖“缺口”,在随后的 3h,随着外部气流卷入,暗区“缺口”不断扩大。至 14—15 时,“缺口”闭合。

17 日 21 时起,风暴主体逼近海南岛,外围螺旋云带受到地形影响,云团变得松散,覆盖范围扩大,亮温趋暖,“浣熊”逐渐减弱。

对照 JTWC 记录的 MaxSW(图 1),可以发现存在某种对应关系:15 日 12 时至 16 日 12 时 MaxSW 增加明显,“浣熊”发展迅速;16 日 13 时内核眼壁破裂,加强趋缓,16 时“缺口”扩大,18 时完全闭合,MaxSW 随后

增大到 $34\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;17 日 00 时眼壁再次破裂,02 时闭合,MaxSW 随后(17 日 06 时)增大到 $40\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;17 日 10 时第三次破裂,出现较大的暖“缺口”,15 时闭合,MaxSW 先是在 12 时减弱到 $38\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,闭合后增加至 $43\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (17 日 12 时)。即第一次眼壁破裂中止加强过程,眼壁闭合之后强度都略有增加。

近年来,在理想数值试验^[8],卫星云图以及雷达观测分析^[20]均发现眼壁破裂现象,均认为眼区和眼壁区发生了某种涡旋混合。由于南海洋面上观测站的地理位置受限,不能反映“浣熊”破裂和复原时眼区的物理参数,因此无法根据更详细的实况观测资料进一步分析。但是,我们可以从近期研究找到可能的解释,关于 TC 内核结构演变如何影响强度变化主要有以下两方面:

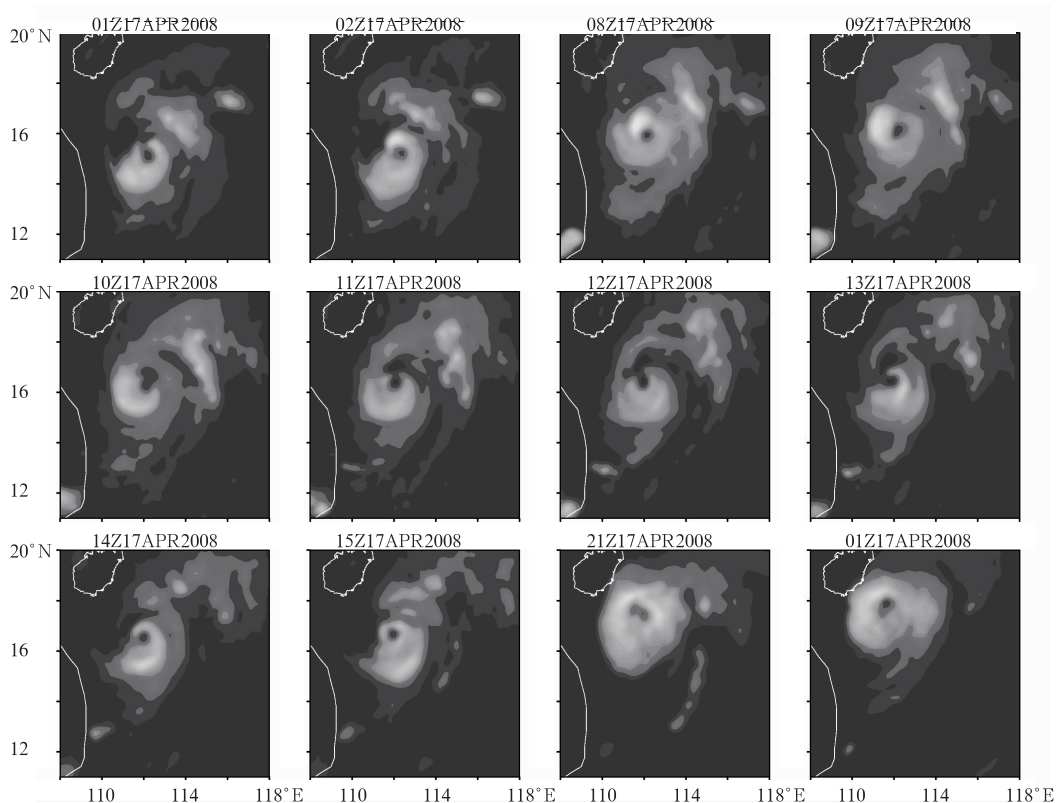


图 7 2008 年 4 月 17 日 FY-2C 卫星水汽图像
(时间见每幅小图题)

(1) 眼壁破裂意味着非对称涡旋混合过程^[20]。Kossin 等^[21]认为当涡度和相当位温(θ_e)从眼壁向眼心混合,眼壁 θ_e 梯度减小,正压稳定度将增加,这种混合过程起到中断 TC 快速发展过程的作用。反之,如果 TC 眼壁附近 θ_e 面陡立,则湿斜压性增强诱发倾斜涡度发展,导致中心附近大部分区域垂直涡度显著增长,TC 则会迅速发展^[22]。因此,眼壁破裂(16 日 13 时)可能起到中断“浣熊”迅速发展过程的作用。

(2) Wang^[8]认为,在成熟 TC 眼壁传播的 VRWs(涡旋罗斯贝波)受到外螺旋雨带的扰动可导致眼壁破裂,同时眼壁和眼区出现明显的干性涡旋混合,眼壁位涡向眼心输送,导致最大风速半径处切向风减弱,眼区风速增大,并通过轴对称化过程恢复眼壁。这种眼壁破裂(复原)过程导致 TC 减弱(增强)。总结已有研究,虽然“浣熊”发展过程缺少更为详细的观测资料确认其中的 VRWs 传播特征,但根据卫星水汽图像揭示其经历三次眼壁破裂和复原过程,对应着 MaxSW 强度变化,尤其是 17 日 06—18 时之间“浣熊”出现的强度波动,在一定程度上验证了 Wang 的观点。

5 其他南海发展的 TC 个例卫星观测特征

为了避免由个例分析所引起的特殊性,更好地揭示某些普遍意义,根据异常路径强台风珍珠(0601)急翘过程^[23]和台风派比安(0606)在北抬期间^[24]的卫星微波亮温水平结构也显示类似眼壁破裂过程,加强趋缓并逐步减弱。

另外,注意到以上 3 个台风都是在转向过程(“浣熊”16 日 12 时左右转为偏北)出现眼壁破裂,加强趋缓。Riehl^[25]曾根据 1957—1968 年 66 个转向台风统计强度变化,这类台风一般先西行,随后转向为北和东

北行,大部分台风都在转向点或稍微提前一些达到其强度的极值。依据前文分析,卫星图像显示的 TC 转向期间出现内核结构变化可能是其强度变化的重要原因。

另外,选取同样给海南带来严重灾害性天气的 0518 号台风达维(Damrey)作为研究对象。根据 BAJ 和 JTWC 资料(图 8)发现“达维”在登陆前 6h 出现加强过程中断的情况。FY 卫星水汽图像显示由于外围云团受到地形摩擦作用,导致内核眼壁破裂,对应着加强中断(图 9),这也表明近海 TC 也可以依据卫星水汽图像进行强度变化评估。

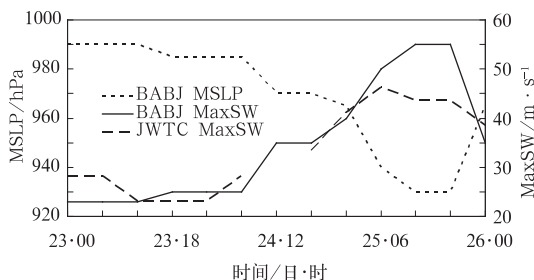


图 8 中心附近最大风速(MaxSW)和中心最低气压(MSLP)

6 结语

TC 强度变化受到外部环境背景的动力和热力过程影响,以及内部动力过程的制约。实际情况下,诸多影响因子的共同作用使得 TC 强度预报变得较为复杂^[26]。通过分析表明:环境风垂直切变增大至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,与南海北部海表温度逐步减小导致最大可能强度不断降低等环境背景条件是“浣熊”迅速发展过程中断和减弱的重要因素,但是环境背景影响强度变化都有一定的时间差响应,使得 TC 强度预报不够精确。

FY 卫星水汽图像具有较高的时空分辨率,显示“浣熊”内核结构存在眼壁破裂和复原现象,该现象精确地反映其强度变化,即眼壁破裂(复原)过程对应“浣熊”减弱(增强),

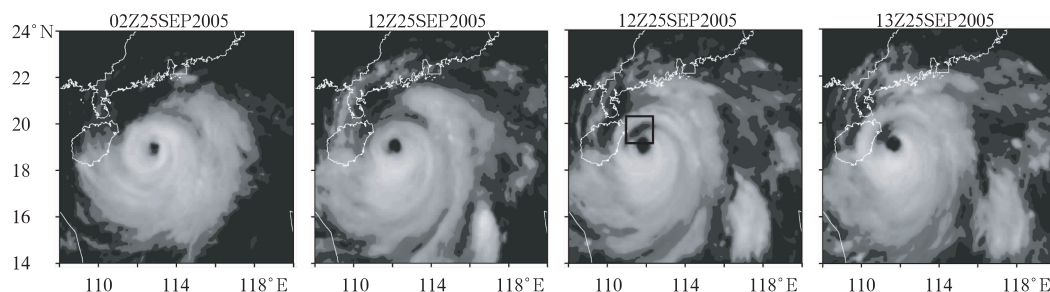


图 9 2005 年 9 月 25 日台风达维水汽图像
时间见每幅小图题,黑色方框表示台风眼壁破裂区域

表明 TC 内部动力过程,即可能存在内核非对称涡旋混合过程和涡旋罗斯贝波(VRWs)传播影响“浣熊”强度变化。

诚然,要验证“浣熊”内核是否确实存在非对称涡旋混合过程和 VRWs 传播需要时空分辨率较高的观测资料,如飞机探空资料^[21]或者雷达观测^[6,20],南海尚缺少上述观测。本文仅是可供参考的观测事实,即可能由 VRWs 传播引起的内核结构演变和强度变化。更细致的分析有待于数值模拟研究。

通过卫星图像观测其他南海发展的 TC 个例如“达维”、“珍珠”和“派比安”,也发现类似内核结构演变与强度变化的关系,表明加强 TC 内核的卫星和其他加密观测对于强度预报有着重要意义。

TC 的内部动力过程较为复杂。在 TC 发展过程中,眼壁环流和外螺旋雨带的波一流相互作用仍处于探索阶段,难以确定眼壁破裂与复原的时刻。研究表明^[7],即使台风涡旋始终处于环境风场和柯氏力场的非轴对称的强迫下,叠加在 TC 圆形基流上的扰动能量仍然会稳定地向基流输送,而导致扰动减弱,体现了轴对称化趋势。然而在“浣熊”演变过程中,眼壁破裂与复原的周期长短不一,这也给实际预报带来一定的不确定性。总之,通过 FY 卫星水汽图像探讨 TC 强度变化只是初步尝试,未来需要通过更详细观测资料加以分析,如内核热力与动力因子的

观测。TC 强度变化受诸多因素的影响,仍然有进一步深入研究的必要。

参考文献

- [1] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 672-681.
- [2] 钱传海, 路秀娟, 陈涛. 引起“碧利斯”强降水的 MCS 数值模拟研究[J]. 气象, 2009, 35(4): 11-19.
- [3] 刘晓波, 邹兰军, 夏立. 台风罗莎引发上海暴雨大风的特点及成因[J]. 气象, 2008, 34(12): 72-78.
- [4] 冯文, 许向春, 黄耀怀, 等. 登陆海南的热带气旋中尺度降水分布变化特征[J]. 气象, 2009, 35(3): 15-20.
- [5] 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.
- [6] Montgomery M T, Kallenbach R J. A theory for vortex Rossby waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1997, 123: 435-465.
- [7] 陈光华, 裘国庆. 对南海热带气旋近海加强机理个例模拟研究[J]. 气象学报, 2005, 63(3): 359-364.
- [8] Wang Y. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part II: The role in tropical cyclone structure and intensity changes[J]. J Atmos Sci, 2002, 59: 1239-1262.
- [9] 张长安, 郑秀专, 潘娅婷. 台风圣帕的空心现象分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 48-52.
- [10] Emanuel K A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: steady-state maintenance[J]. J Atmos Sci, 1986, 43: 585-605.
- [11] DeMaria M, Kaplan J. Sea surface temperature and

- the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones [J]. *J Climate*, 1994, 7: 1324-1334.
- [12] 余晖, 胡春梅, 蒋乐怡. 热带气旋强度资料的差异性分析[J]. *气象学报*, 2006, 64(3): 357-363.
- [13] 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.
- [14] Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate[J]. *J Climate*, 2002, 15: 1609-1625.
- [15] Kaplan J, DeMaria M. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic Basin [J]. *Wea Forecasting*, 2003, 18: 1093-1108.
- [16] 姚秀萍, 吴国雄, 赵兵科, 等. 与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2007, 37: 417-428.
- [17] Zhu T, Zhang L D, Weng F. Numerical simulation of hurricane Bonnie(1998). Part I: Eyewall evolution and intensity changes [J]. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 225-241.
- [18] Wu L, 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.
- [19] Santurette P, Georgiev C G 著, 方翔等译, 卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用[M], 北京: 科学出版社, 2008: 155.
- [20] Corbosiero K L, Molinari J, Aiyyer A R, et al. The structure and evolution of hurricane Elena (1985). Part II: Convective asymmetries and evidence for vortex Rossby waves[J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 3073-3091.
- [21] Kossin J P, Eastin M D. Two distinct regimes in the kinematic and thermodynamic structure of the hurricane eye and eyewall[J]. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 1079-1090.
- [22] 余晖, 吴国雄. 湿斜压性与热带气旋强度突变[J]. *气象学报*, 2001, 59(4): 440-449.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Riehl H. Intensity of recurved typhoons[J]. *J Appl Meteor*, 1972, 11: 613-615.
- [26] 端义宏, 余晖, 伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展[J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 636-645.