

近海加强台风“威马逊”(1409) 环境条件及结构特征的数值研究*

林晓霞^{1,2}, 王硕甫^{2,3}, 冯业荣¹

- (1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所//广东省区域数值天气预报重点实验室, 广东 广州 510641;
2. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225;
3. 佛山市气象局, 广东 佛山 528000)

摘要: 利用新一代区域数值模式 GRAPES 对 1409 号超强台风“威马逊”强度急剧变化过程进行数值模拟试验, 模拟结果较好地再现了台风“威马逊”在南海的路径和强度的变化特征, 进一步利用数值模拟结果对“威马逊”发展的环境条件及其结构变化特征展开分析。分析结果表明, “威马逊”急剧发展期间高层辐散低层辐合同时增加, 且高层辐散明显强于低层辐合; 低层水汽流入增加, 主要的流入边界是东南边界, 且总水汽净流入量与台风强度变化有较好对应关系; 环境风垂直切变较弱, 且“威马逊”强度在深层和高层切变减小后 24 h 达到强盛。台风开始发展前动力和热力结构上均具有显著的不对称性结构, 对流运动东南强、西北弱。强盛期南强北弱, 东西方向趋于对称发展, 且台风低层眼壁迅速收缩, 高层有向外扩张趋势; 切向风迅速增大, 有很强的经向梯度, 中高层气旋性环流显著增强。温度场上具有显著的暖心结构, 强盛期台风中心正温度距平可达到 11 °C 以上, 集中于台风中心高空 300 ~ 200 hPa 之间, 并向高低层传播。低层不断有正涡度流入, 台风中心附近正涡度增大, 正涡度柱呈铅直发展并向对流层中上层传播。这些结构的变化都有利于“威马逊”强度的发展。

关键词: 天气学; 近海加强台风; 数值模拟; 环境条件; 结构变化

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2017) 05-0101-11

Numerical analysis on circulation features and structure of offshore intensified typhoon Rammasun (1409)

LIN Xiaoxia^{1,2}, WANG Shuofu^{2,3}, FENG Yerong¹

- (Institute of Tropical and Marine Meteorology // Guangdong Provincial Key Laboratory of
Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510641, China;
2. School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information
Technology, Chengdu 610225, China;
3. Meteorological Bureau of Foshan City, Foshan 528000, China)

Abstract: The GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction system) model was used to study the rapid intensification of Super Typhoon Rammasun (1409) offshore China in this paper. On the basis of successful simulation of the intensity change and track, the model output was further analyzed to determine the large-scale environmental condition of Typhoon Rammasun and the mechanism for its rapid intensity change. The results show that the favorable background field with low-level convergence and high-level divergence occurred during the rapid intensification, abundant water vapor transport at lower-levels

* 收稿日期: 2016-07-07

基金项目: 公益性行业专项基金 (GYHY201406009); 佛山市气象局科研项目 (201403); 广州市科技计划项目 (201604020012); 国家自然科学基金 (41675099)

作者简介: 林晓霞 (1991 年生), 女; 研究方向: 大气数值模拟; E-mail: d673793925@163.com

通信作者: 冯业荣 (1963 年生), 男; 研究方向: 大气数值模拟及灾害性天气临近预报研究; E-mail: yerong_feng@yahoo.com

provided favorable energy for Typhoon, which was mainly transported by the southeastern boundary. Besides, the weak vertical wind shear lower than 6 m/s was in favor of gathering the latent heat of condensation and maintaining the “warm heart” structure, and there was a time lag of about 24 hours between the vertical wind shear reduced and Typhoon’s increased sharply. Analyses on the structure showed that the dynamic and energetic fields were highly asymmetric during its strengthening stage but became structurally symmetric during its mature stage. Convection was stronger in the southeast of the typhoon than in the northwest during its strengthening stage. The range of eyewall was small in the low-level but extended in the high-level. Positive vorticity increased in the eye of the typhoon and expanded to the mid and upper-troposphere. Besides, the tangential-wind speeds increased with the increasing of typhoon intensity, especially during the process of rapid intensification. Furthermore, there was evidently warm-core structure in the lower and mid-upper level which highly concentrated to the center of Rammasun, and the positive temperature anomaly of the typhoon center exceeded 11 °C, while the warm-core extending towards to lower and higher layer. All above happened during the rapid intensification were the main reasons of the intensification of Rammasun.

Key words: synoptics; offshore intensified typhoon; numerical simulation; circulation features; structure change

近海突然加强的台风往往会给沿海地区人员和经济带来严重的威胁,随着各种精细化探测技术的应用、数值模式的发展,对台风路径的预报已有了稳步的提升,但台风登陆前强度突变的预报始终是业务预报和台风研究中的难点^[1]。此前对台风近海强度突增原因的主要研究结果认为其与西太平洋副高、南亚高压的强度位置、中低层水汽的输送、弱冷空气的入侵、近海高海温和弱的环境风垂直切变以及台风自身的结构等诸多因素相互作用有关^[2-5],对流层上部的环境流场与台风外流之间的相互作用在我国近海热带气旋强度突变过程中可能起着至关重要的作用^[6-8]。胡春梅等^[9]对华南沿海 TC 登陆前强度突增进行合成分析发现对于突增的热带气旋一般有明显的低空西南气流卷入气旋内部。

同时,有研究表明热带气旋变性发展是外部有利环境条件和自身涡旋结构动态相互作用的结果^[9-10]。因此,于世斌等^[11]、薛根元等^[12]均对超强台风“桑美”近海强度和结构的变化特征开展了数值模拟研究,提出“桑美”急剧发展过程中对流层高层动能下传是低层动能补充的重要途径。李江南等^[13]研究提出台风 Vongfong 在近海时低层最强的流入在其移动的前方,而流出区在后方,这些特征与大西洋飓风相反。

2014 年 7 月 18 日 11 时前后,超强台风“威马逊”登陆广东徐闻县沿海,为广东省带来严重风雨影响。“威马逊”具有显著的近海加强特征,研究“威马逊”在近海强度变化及机制具有重要

的意义。本文利用数值研究的方法,对“威马逊”进入南海之后进行模拟研究,分析其强度急剧发展阶段的环境条件及台风本身的结构变化特征,深入探讨台风急剧发展的物理机制,加深对结构变化的认识,为日常业务预报提供更加可靠的参考依据。

1 资料和模式简介

1.1 资料

2014 年第 9 号超强台风“威马逊”于 7 月 12 日 06 时(世界时,下同)在关岛以西洋面生成,14 日 03 时加强为强热带风暴,于 15 日下午登陆菲律宾后进入海南,一路以西北偏西路径移动,并逐渐加强,前后 3 次登陆海南、广东、广西沿海,登陆广东徐闻县沿海时中心附近最大风速为 60 m/s,中心最低气压 915 hPa,强度达到超强台风级别。利用中央气象台一天 4 次的台风定位资料,参考于玉斌等^[14]的标准:用 TC 中心海平面最低气压来表示 TC 强度,当 6 h 海平面气压差 $\Delta p < -7.78$ hPa 时刻为 TC 急剧增强时刻, $\Delta p > 8.30$ hPa 时刻为 TC 急剧减弱时刻;利用 TC 中心最大风速表示 TC 强度,当 12 h 最大风速差 $\Delta V > 7.91$ m/s 时刻为 TC 急剧增强时刻, $\Delta V < -12.98$ m/s 为 TC 急剧减弱时刻。表 1 给出“威马逊”台风强度变化的情况,综合考虑以上两种标准可见“威马逊”急剧增强时刻为 17 日 06 时至 18 日 06 时,其中,17 日 18 时至 18 日 00 时同时满足以上两个条件;18 日 12 时至 19 日 12 时则为台风急剧减弱时刻。

表 1 “威马逊”强度变化情况表¹⁾

Table 1 The basic information of Rammasun (1409)

时间 (UTC)	中心位置	中心气压 hPa	最大风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	6 h 变压 hPa	12 h 风速变化 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	说明
1612	117.8°E, 15.5°N	970	35	-	-	
1618	116.7°E, 16.0°N	970	35	0	0	
1700	115.8°E, 16.4°N	970	35	0	5	
1706	115.0°E, 16.8°N	960	40	-10	7	
1712	114.3°E, 17.5°N	955	42	-5	10	
1718	113.4°E, 18.5°N	940	50	-15	13	急剧增强时刻
1800	112.3°E, 19.1°N	930	55	-10	10	急剧增强时刻
1806	111.3°E, 19.9°N	915	60	-15	0	
1812	110.3°E, 20.3°N	915	55	0	-8	
1818	109.4°E, 21.0°N	940	52	25	-10	
1900	108.3°E, 21.7°N	960	45	20	-19	
1906	107.3°E, 22.1°N	975	33	15	-22	
1912	106.2°E, 22.9°N	990	23	15	-15	

1) 第 n 时次的 12 h 风速变化 = $V(n-1) - V(n+1)$

本文使用一天 4 个时次 NCEP-GFS (Globe forecast system) 产品作为模式运行的驱动场并提供 6 h 变化的侧边界条件, 利用新一代区域数值模式 GRAPES 对台风“威马逊”强度急剧变化过程进行数值模拟, 进一步分析台风急剧发展阶段的环境条件, 并探讨台风本身动力、热力特征的演变情况。

1.2 模式及物理过程参数简介

本文所用的是由中国气象局广州热带海洋气象研究所在 GRAPES 模式基础上研究发展的中国南海台风模式, 该模式评估全年路径平均误差突破 100 km 以下, 应用于日常业务预报, 已经具有较好的业务研究使用条件。此次模拟过程中采用非静力高度地形追随坐标, 移动单向嵌套网格, 其中粗网格范围固定, 格距为 36 km, 细网格根据台风位置变化, 格距为 9 km, 模式区域中心为台风中心, 垂直方向共 55 层, 6 h 更新侧边界条件, 模式共积分 72 h, 预报时效为 2014 年 7 月 16 日 12 时至 19 日 12 时。试验微物理过程采用 WSM6 方案 (水汽、雨、雪、云水、云冰、霰), 长波辐射过程采用 RRTM 方案, 短波辐射过程采用 Dudhia 方案, 积云参数化方案为简化的 SAS 方案, 近地面层采用 Monin - Obukhov 方案, 陆面过程采用 SLAB 热量扩散方案, 边界层采用 MRF 方案。

2 模拟结果分析

图 1 为“威马逊”路径和强度的实况和模拟结果, 总体上模拟路径与实况相近, 均以西北路径

移动。模式积分前 48 h 模拟结果与实况十分相近, 24、48 和 72 h 平均路径误差分别为 42.3、59.6 和 86.7 km, 更为成功的是模式模拟出了台风前后登陆海南和粤西沿海, 登陆时间与实况一致, 积分结束前模拟路径与实况差距较大 (图 1a)。从强度变化来看较好地模拟出 18 日 06 时前台风不断加强的过程, 尤其是 17 日 06 时至 18 日 06 时急剧增强时段, 模拟结果 6 h 气压差达 18.9 hPa, 与业务定强幅度基本一致, 此后台风强度减弱, 模拟开始和结束时差异稍大, 这可能与路径模拟结果偏差有关, 但总体变化趋势符合业务定强。上述结果与杨兆礼等^[15]对 GRAPES 模式的业务评估结果相符合, 因此认为所用的 GRAPES 模式具备模拟“威马逊”台风强度和路径的能力, 模拟结果较好地再现了其路径和强度急剧变化过程, 为下文进一步研究分析提供了较高的可信度。

3 台风近海加强过程环境条件与结构特征分析

3.1 影响“威马逊”强度发展的环境条件

由前面的对比可知, 此次模拟结果较好地再现了“威马逊”的发展特征, 下面将进一步利用数值模拟结果, 从大尺度辐合辐散、水汽输送和环境风垂直切变 3 方面分析大尺度环境条件在“威马逊”台风急剧发展过程中的作用。

3.1.1 散度场特征 从经过台风中心经向的散度垂直剖面随时间演变可以看到“威马逊”发展过程中高层辐散、低层辐合的加强过程, 且高层辐散

明显强于低层辐合。17 日 06 时 (图 2a) 台风上空形成明显低层辐合、中上层辐散的形势, 辐散中心位于 300 hPa 附近, 随着时间的变化, 高层辐散持续发展并移至 100 hPa 附近 (图 2b)。注意到 18 日 02 时 (图 2c) 高层辐散中心范围明显扩大, 500 hPa 以上以辐散为主, 加强了“威马逊”中高层的辐散强度, 同时高空辐散结构趋于对称发展, 在此期间“威马逊”发展达到强盛。

为了能够更直观的反映台风区域内总辐合辐散的情况, 本文以台风中心为中心东西南北向 30×30 格点数的正方形区域, 计算低层 925 hPa 和高层 100 hPa 散度面积平均值随台风移动的时间序列图 (图 3), 发现 17 日 06 时之前, 模式积分结果低层为负散度, 表明低层辐合, 但辐合强度在减弱, 而高层为正散度, 表明高层辐散, 且辐散强度逐渐增强。对应强度变化可以看到 17 日 06 时之前, 环境场高层辐散、低层辐合有利于“威马逊”强度发展, 但低层辐合强度逐渐减弱, 不利于“威马逊”的迅速发展。17 日 12 时至 18 日 06 时, 低层辐合

逐渐加强, 高层辐散也迅速增大, 在这种大尺度环境的配置下, “威马逊”强度迅速发展, 台风中心 6 h 气压差达 -18.9 hPa。未来 6 h 低层辐合虽然继续加强, 但高层辐散逐渐减弱, “威马逊”强度逐渐转为减弱趋势。以上分析可得从环境场的高层辐散、低层辐合的时间变化可以反映“威马逊”强度变化, 高层辐散和低层辐合同时增强有利于“威马逊”强度的迅速发展。

3.1.2 水汽输送特征 热带气旋的发生发展离不开对流层底层充足的水汽和能量供应 对流层底层暖湿水汽输入在热带气旋的上升运动中释放潜热, 有利于热带气旋暖心结构的维持, 同时为热带气旋的发展提供充足的能量。从水汽通量散度纬向剖面图 (图略) 可以看到台风发展至强盛时期水汽通量散度辐合区一直向上伸展至 400 hPa 附近, 且随高度向西倾斜, 强的水汽辐合中心主要位于 800 hPa 以下。由低层风场和水汽通量场可见“威马逊”发展过程中始终有明显的西南水汽向台风环流中输送, 主要来自南部越赤道偏南暖湿气流和西太平洋

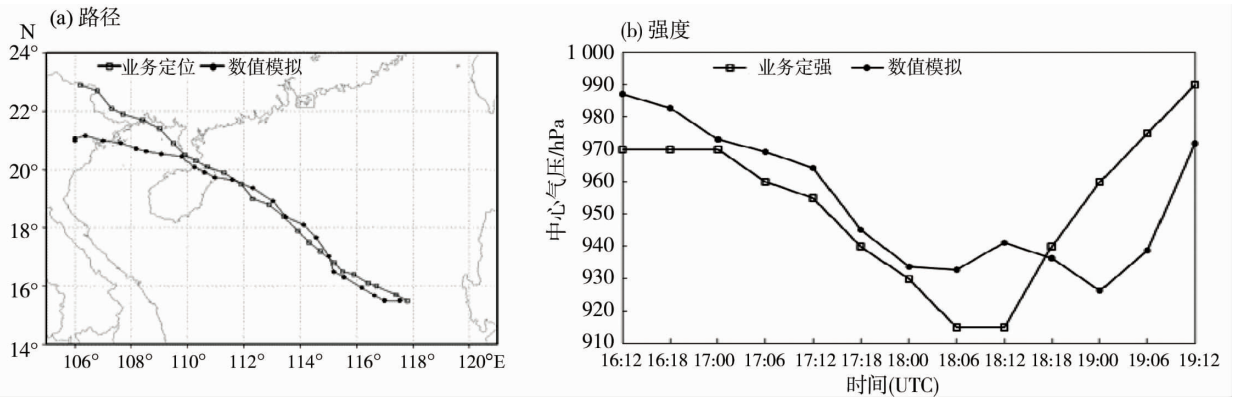


图 1 台风“威马逊”中央气象台业务定位和定强及模拟路径和强度

Fig. 1 The comparison between the observed and simulated path

(a) and central pressure depression (b) of Rammasun

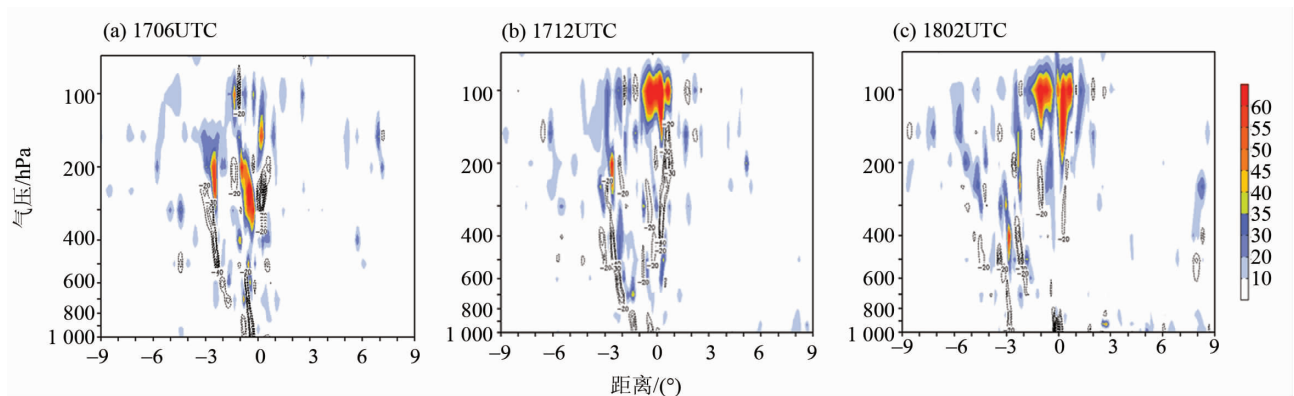


图 2 经过台风中心 (横坐标原点) 经向散度垂直剖面图

Fig. 2 The meridional vertical cross section of divergence

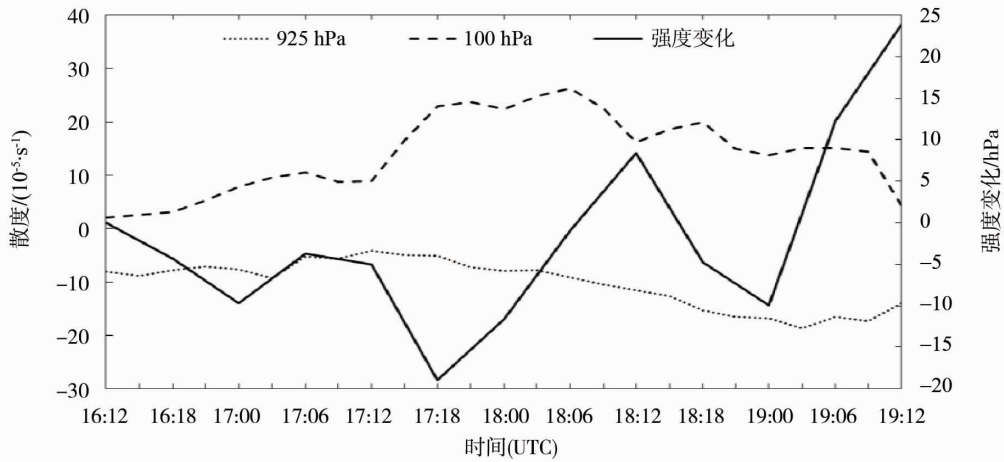


图 3 “威马逊”上空 100hPa、925hPa 平均散度场和模拟结果 6 h 变压时间演变图

Fig. 3 Regional average divergence at 100hPa and 925hPa, and 6h surface allobaric of Rammasun

东部偏东气流（图 4）。从 17 日 06 时起，“威马逊”南侧为强劲的西南气流，不断把水汽往台风环流中输送，18 日 02 时，南侧水汽输送带完全接通，台风中心大范围水汽通量值超过 $50 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ，同时台风北侧来自西太平洋的偏东气流也不断向台风中心输送。这种强大而稳定的水汽和能量输入是“威马逊”强度急剧发展的重要因素。

一般热带气旋发展都伴随着风速大、水汽充足，但这些现象在热带气旋发展的各个阶段都可能出现，单从这些现象很难判断出水汽对热带气旋的具体贡献是流入还是流出，无法判断其总体效果。为了定量地分析台风中水汽的来源及收支情况，本文选取以“威马逊”中心为中心、 100×100 格点数的正方形区域，利用公式^[16]： $q_s = \iint qv dldp$ ， $q_n = - \iint qv dldp$ ， $q_e = \iint qu dldp$ ， $q_w = - \iint qu dldp$ ，分别计算台风区域通过南、北、东、西各边界从环境中得到的水汽增加量，即水汽净流入，其值为各边界从地表至 200 hPa 垂直积分的水汽收支，正负值分别表示流入、流出（图 5a）。各边界水汽净流入量的算术和（ $q_s + q_n + q_e + q_w$ ）为台风区域内得到的总水汽净流入量（图 5b）。

分析发现，“威马逊”急剧发展之前南边界、东边界和西边界为水汽流入，北边界为水汽流出，区域通过南边界水汽流入量占了相当大的比例，超过了总流入量的 70% 以上，说明“威马逊”南侧的偏南气流将水汽通过南边界输入到台风环流中，为台风的发展提供了极有利的水汽条件，这与水汽输送特征的分析结果一致。17 日 06 时之后，南边

界和东边界水汽流入进一步加强，西边界流入稍有减小，之后维持收支平衡至“威马逊”强盛阶段，而北边界流出量逐渐减小，并在 18 日 06 时之后逐渐转为流入边界。整个过程中，台风的主要水汽来源是南边界，始终为台风环流输入大量的水汽，其次是东边界，变化幅度和输入量都较小，北边界在强盛阶段也逐渐转为流入边界，对于西边界则基本维持收支平衡。从区域内总水汽净流入量的变化可见 17 日 12 时前总水汽净流入稍有减弱，但仍然为正的净流入，“威马逊”处于发展阶段，增强幅度较小，此后总水汽净流入量迅速增加，台风显著增强，台风本身强度也在此阶段达到强盛（图略）。由此可见对台风区域而言，流入的水汽远大于流出，使台风环流得到充足的水汽供应，其强度迅速发展，总水汽净流入量与其强度变化及本身强度的大小有明显的对应关系。

3.1.3 环境风垂直切变 环境风垂直切变反映了台风扰动周围的“通风”条件，是影响台风强度变化重要环境条件之一。环境风垂直切变会使热带气旋中心出现倾斜现象，正压结构遭到破坏，切变越大，破坏程度越大，较小的环境风垂直切变有利于热带气旋暖心结构的生成和维持，是热带气旋强度发展的有利因素。本文用 850 和 200 hPa 分别代表低层和高层，选取以“威马逊”中心为中心 100×100 格点数的正方形区域，计算高低层间环境纬向风 u 之差代表环境风垂直切变，同时计算 200 和 500 hPa、500 和 850 hPa 的环境纬向风之差分别代表高层大气、低层大气的的环境风垂直切变。结果发现，模拟时段内“威马逊”环境风深层、高层、

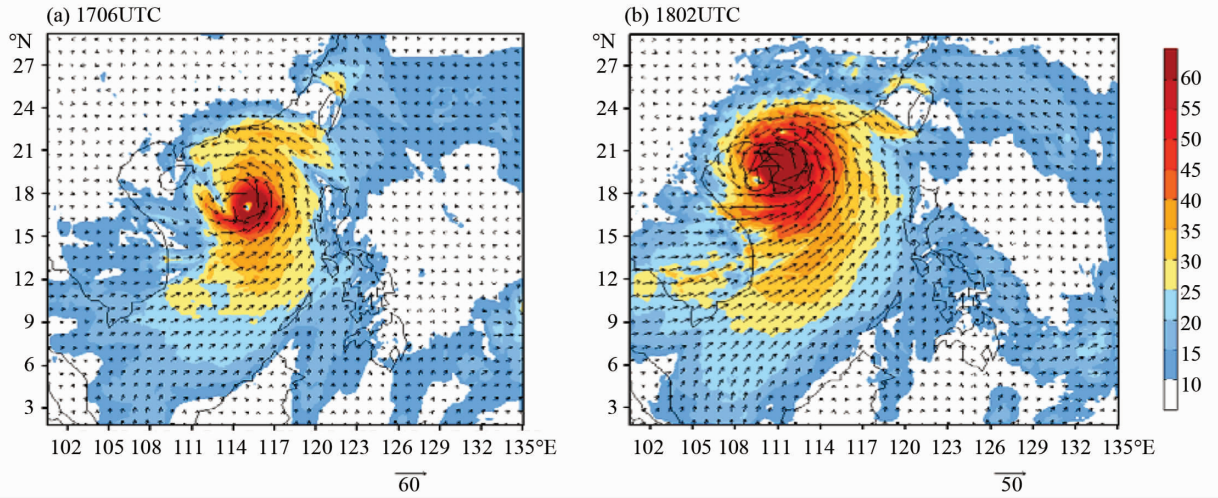


图 4 850 hPa 风矢量和水汽通量 (阴影部分, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 的变化

Fig. 4 The simulated wind and water vapor flux (shaded part, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa

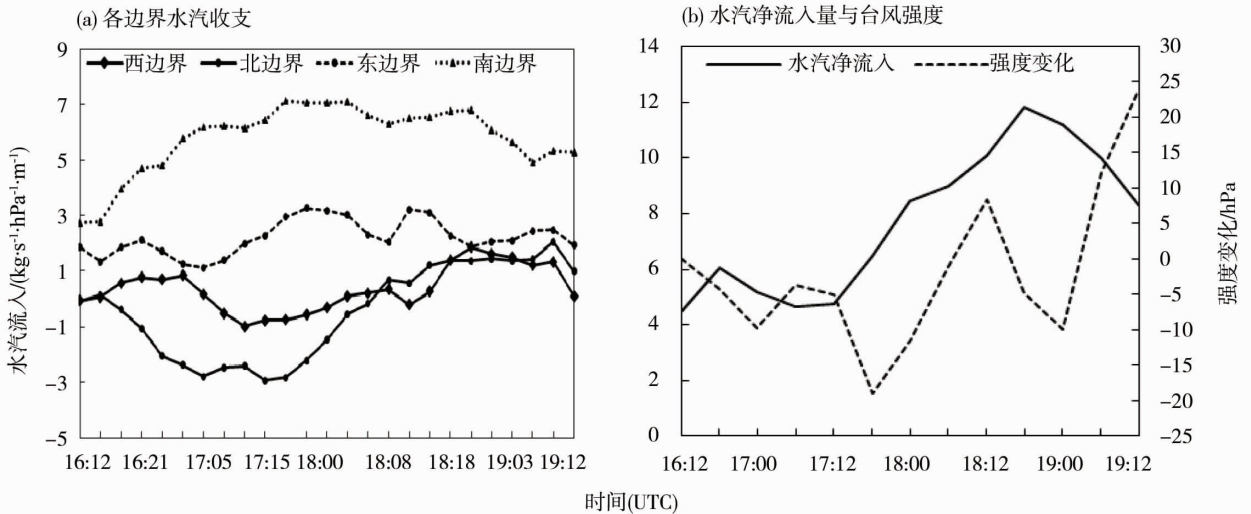


图 5 各边界水汽收支以及台风区域内总水汽净流入量与台风强度变化的时间序列图

Fig. 5 Water vapor budget of each boundary and Variation of net water vapor inflow in the column integrated from surface to 200 hPa in the square of 9×9 degree centered at TC Rammasun and 6 hour intensity change

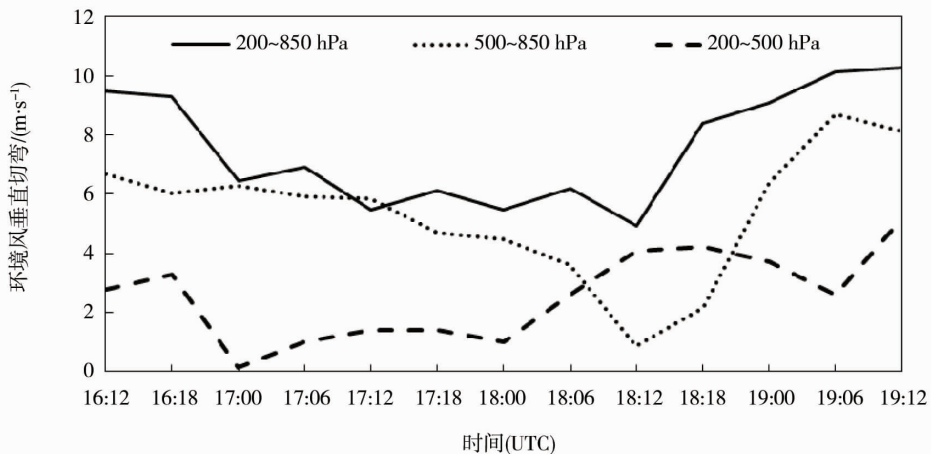


图 6 台风“威马逊”环境风垂直切变的时间序列图

Fig. 6 The simulated vertical shear of environment wind of Rammasun

低层垂直切变基本维持在 10 m/s 以下, 高层和低层切变明显小于环境风深层切变。深层和高层切变具有较一致的变化趋势, 在 17 日 00 时迅速降低至过程最低值, 并保持至“威马逊”强度达到最强后重新开始增大, “威马逊”强度在深层和高层切变迅速较小后 12 h 开始急剧增强; 低层切变则相对滞后 12 h 开始缓慢减小。“威马逊”迅速发展期间, 深层和低层环境风垂直切变降至 6 m/s 左右, 而高层切变始终维持在 $0 \sim 4 \text{ m/s}$ 之间, 在迅速加强期间更是下降到 2 m/s 以下, 可见“威马逊”环境风垂直切变足够小, 特别是高层较小的环境风垂直切变有效地阻止对流层上层空气的运动, 对台风正压结构和暖心结构的维持起保护作用。

3.2 动力和热力结构变化特征研究

台风强度发展的同时, 台风结构也会相应的发生变化, 具体可表现为台风眼壁的向内收缩、高空暖心结构的加强等^[17-19]。因此, 本部分对“威马逊”强度急剧变化阶段的动力和热力特征进行分析, 研究其结构的变化情况。

3.2.1 垂直运动和切向风

图 7 为“威马逊”中心附近垂直速度和切向风的演变情况, 可以看到“威马逊”强度开始急剧发展阶段, 南北方向上对流运动呈显著的不对称性(图 7a), 有南强北弱的特征。台风中心上升运动开始旺盛发展, 其北侧距离中心 1° 纬距范围以外基本没有对流运动的发展, 而台风南侧 4° 纬距范围内分布着两个带状的垂直速度大值区, 最大风速区随高度倾斜向外发展。东西方向上对流运动东强西弱的不对称结构也十分明显(图 7c), 对流运动基本分布在台风中心 2° 经距范围内, 东侧量级远大于西侧, 超过了 3 m/s 。从切向风上看, 台风急剧增长之前(图略)风速最大值不超过 25 m/s , 中心基本在对流层低层 900 hPa 以下, 到强度开始急剧增长阶段(图 7a、7c 阴影部分)大于 30 m/s 的最大切向风范围迅速扩大, 并逐渐向上传播。切向风在“威马逊”强度发展前也呈现不对称结构, 具有北强南弱、东强西弱的特征。

强盛阶段垂直速度南强北弱的不对称结构仍十分明显(图 7b), 南侧对流强烈发展, 出现多个对流中心; 东西方向上由台风中心向两侧垂直速度迅速增大(图 7d), 趋于对称化加强, 最大垂直速度中心位于 250 hPa 附近。从切向风垂直剖面的演变来看(图 7b、7d 阴影部分), 18 日 12 时台风中心南侧的中高层切向风速明显增大至 25 m/s 以上,

台风中心西侧的负速度区域向外扩展到 3° 经距范围以外, 大于 40 m/s 的最大切向风速区域向对流层中上层传播至 300 hPa 以上, 说明此时台风中低层切向风速的对称性明显加强, 并且台风高层开始出现气旋性环流特征。由台风中心向外有很强的径向梯度, 垂直方向上最大风速半径基本呈垂直向上, 显示出太平洋台风成熟阶段垂直剖面的结构特征^[20]。同时对对比切变风垂直剖面的时间演变图发现台风低层最大切向风速半径从 17 日 12 时开始显著缩小, 高层最大风速半径有向外扩张的趋势, 眼壁的收缩过程主要在 17 日 18 时之前完成, 对应图 3 “威马逊”在该时间段内迅速增强, 中心最低气压下降达 18.9 hPa 。

3.2.2 涡度特征

热带气旋是围绕中心快速旋转的涡旋系统, 涡度的大小在一定程度上反映热带气旋强度, 涡度的变化可以用来表征热带气旋强度的变化。从 850 hPa 流场和涡度场上可以看到台风中心附近为明显的正涡度区(图 8a), 北侧的偏北气流和来自南海的偏西气流在台风外围汇合, 台风的西南侧存在明显的带状正涡度区。随着时间的演变, 在台风低压的环境下, 外围的正涡度围绕着台风中心气旋性旋转, 不断向台风中心汇合(图 8b), 引起了台风中心附近中低层涡度的增长, 台风中心附近的正涡度区显著扩大, 中心最大值超过了 $36 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。进一步对台风涡度做纬向垂直剖面发现“威马逊”进入南海初期(图略), 台风中心上空东西两侧均存在正涡度大值中心, 大致呈纬向对称, 正涡度发展层次较低, 大值中心在 600 hPa 以下; “威马逊”强度开始急剧发展阶段(图 8c)中心存在一个明显的正涡度柱, 基本呈铅直分布延伸到 250 hPa 附近, 涡度 $12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以上区域在 250 hPa 以下; 从上节的分析中可知“威马逊”强度急剧发展期间, 台风东西方向上纬向风水平分布不均匀, 南风显著强于北风, 这种水平风的不均匀水平分布符合气旋性切变的特征, 其产生的正相对涡度也进一步为“威马逊”的发展提供动力机制。在“威马逊”达到强盛阶段(图 8d)正涡度大值中心迅速增大, 从 17 日 19 时起低层涡度有显著的增加, 涡度 $12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以上区域伸展至 100 hPa 附近, 最大正涡度中心集中在 600 hPa 以下, 中心最大值达 $42 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以上。由此可见“威马逊”发展过程中心正涡度的变化较好地反映了其强度的变化特征, 急剧发展阶段中低层不断有正涡度流入, 中心正涡度柱呈铅直发展并向对流层中上层传播。

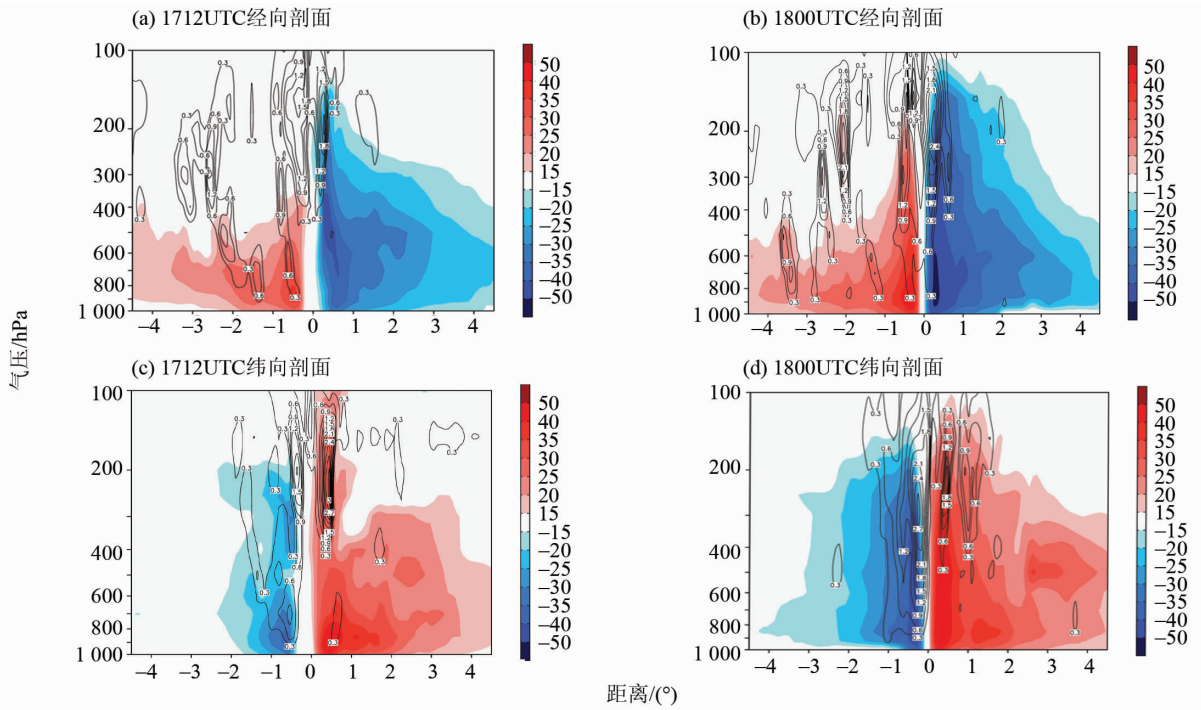


图 7 “威马逊”垂直速度 (等值线, 单位: m/s) 和切向风 (阴影区, 单位: m/s) 垂直剖面图
 Fig. 7 The vertical section of the simulated vertical velocity (contour part, unit: m/s) and tangential wind (shaded part, unit: m/s)

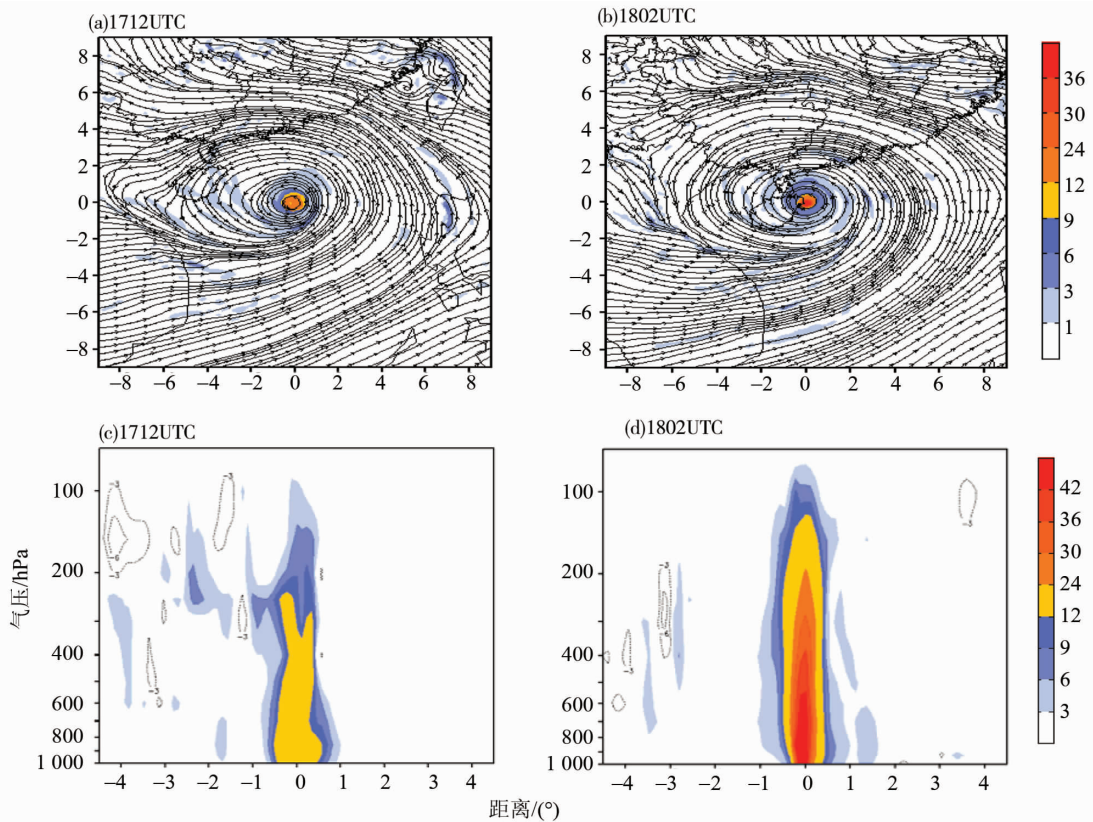


图 8 850 hPa 流场和涡度场 (a) (b) (阴影, 单位: $10^{-4} s^{-1}$) 与台风中心涡度纬向垂直剖面 (c) (d) (单位: $10^{-4} s^{-1}$, 阴影区为涡度 $\geq 3 \times 10^{-4} s^{-1}$)

Fig. 8 The stream field and vorticity (shaded part, unit: $10^{-4} s^{-1}$) and the meridional vertical cross section of vorticity (unit: $10^{-4} s^{-1}$, shaded parts mean greater than or equal to $3 \times 10^{-4} s^{-1}$)

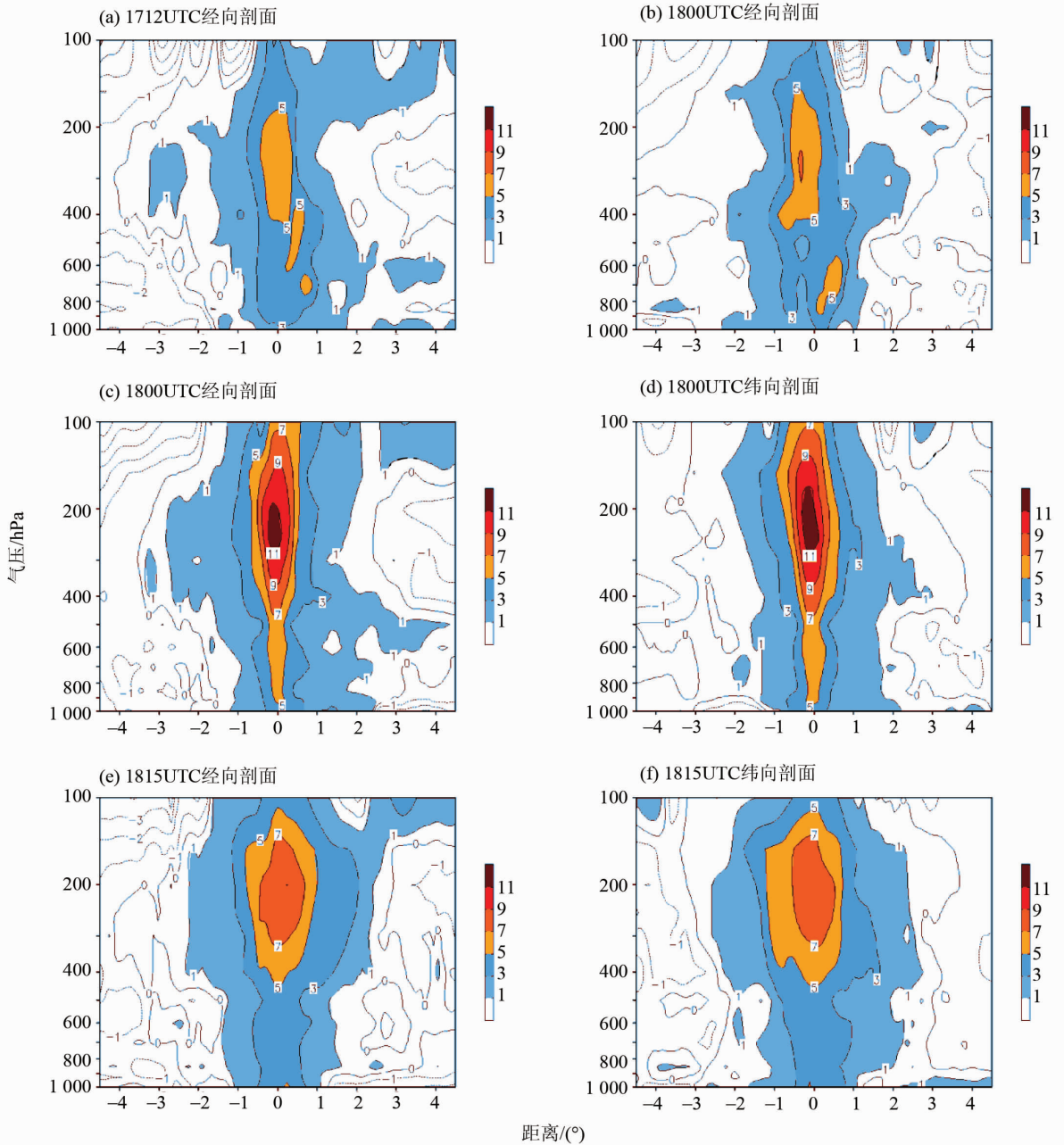


图9 台风暖心结构剖面图（阴影表示温度距平 $\geq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）

Fig.9 The vertical section of warm - core structure (shaded parts mean greater than or equal to $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, unit: $^{\circ}\text{C}$)

3.2.3 台风暖心结构特征 选取以台风中心为中心 100×100 格点数的正方形区域，计算每一层的温度面积距平，取纬向和经向剖面来研究“威马逊”发展过程的热力特征。分析发现“威马逊”进入南海初期（图略），台风暖中心主要集中在对流层中层，对流层低层眼区内外的差异相对较小，最大距平在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上， 150 hPa 上存在冷中心，暖中心位置与台风中心并不完全对应，在南北和东西向上均存在不对称结构。经向剖面上暖中心主要位于台风中心北侧 1° 纬距范围内 $700 \sim 400\text{ hPa}$ 高度

层，暖心结构随高度向北向东倾斜。“威马逊”强度开始发展阶段（图 9a、9b），暖中心向上发展，正距平高值中心向台风中心集中，不对称性减弱，此时最大温度正距平仍在 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下， 100 hPa 上在冷中心依然存在。至 18 日 00 时台风达到强盛（图 9c、9d），此时从 $900 \sim 100\text{ hPa}$ 均表现为暖心结构，暖中心范围和强度明显加强，最大正距平达到 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，暖心位置被抬升至 200 hPa 附近，高度集中于台风中心、呈上宽下窄的长锥形结构，经向和纬向上均表现为轴对称结构。18 日 15 时（图

9e、9f), 正距平向四周扩散, 低层正距平显著降低, 暖心强度减弱, 同时台风西侧和南侧开始出现负温度距平, 说明台风在登陆后可能受到冷空气的入侵, 此时台风的强度开始减弱。到 19 日 04 时对流层低层逐渐被负的温度距平所代替。

综上所述台风发展初期, 对流层顶附近存在弱的冷中心, 暖心首先在对流层中层建立并呈现向北向东倾斜、北强于南的不对称结构; 加强期间, 中层暖心加强并向高低层延伸, 结构不对称性趋于减弱; 强盛期暖心位于对流层高层, 高度集中于台风中心、以上宽下窄的长锥形结构贯穿整个对流层, 呈轴对称分布; 台风强度减弱时, 高层的暖心也明显减弱, 低层的暖心逐渐消失并被温度负距平代替。

4 结 论

本文应用 GRAPES 模式对超强台风“威马逊”进入南海后发展过程进行了数值模拟, 模拟结果能较好的再现了“威马逊”在南海的路径和强度的变化特征。并利用模拟结果对“威马逊”发展的环境条件以及台风本身的结构特征进一步分析。得到主要结论如下:

1) 强烈的高层辐散低层辐合、充足的水汽流入、弱的环境风垂直切变有利于“威马逊”近海快速加强。“威马逊”急剧发展期间高层辐散和低层辐合同时增加, 且高层辐散明显强于低层辐合, 高层辐散的抽吸作用有利于台风中心附近垂直上升运动的发展; 来自越赤道暖湿气流和西太平洋气流的强劲输入是“威马逊”强度急剧的重要因素, 台风区域内水汽流入始终大于流出, 总水汽净流入量与台风强度变化及本身强度的大小有明显的对应关系, 主要的流入边界是南边界, 其次是东边界和西边界, 北边界从流出边界逐渐转为流入边界; 强度急剧发展期间环境风垂直切变较弱, 深层和低层环境风垂直切变维持在 6 m/s 以下, 高层切变降至 2 m/s , 使“威马逊”的发展没有受到明显的抑制作用, 且“威马逊”强度在深层和高层切变减小后约 24 h, 低层切变减小后约 12 h 达到强盛。

2) 伴随着“威马逊”强度的急剧发展, 其结构也发生显著的变化。在“威马逊”开始迅速发展时, 热力场和动力场都具有显著的不对称结构; 在急速发展期间, 台风结构逐渐趋向对称。加强期间垂直上升运动东南强、西北弱, 强盛期南强北弱, 东西方向趋于对称发展; 台风急剧发展期间, 台风中低层切向风速的对称性明显加强, 并且大风

区向对流层中上层传播至 300 hPa 以上, 台风高层出现气旋性环流特征; 强度达到强盛期前台风低层眼壁迅速收缩, 高层有向外扩张趋势。过程中低层不断有正涡度流入, 台风中心附近正涡度增大, 正涡度柱呈铅直发展并向对流层中上层传播, 为“威马逊”的迅速发展提供动力机制。温度场上具有明显的暖心结构, 随着“威马逊”台风的不断加强, 暖心强度不断加强, 台风中心附近温度正距平增大到 $11 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 暖心主要集中在 $300 \sim 200 \text{ hPa}$ 之间, 高度集中于台风中心并向高低层传播, 结构不对称性趋于减弱; 台风强度减弱时, 高层的暖心也明显减弱, 低层的暖心逐渐消失并被温度负距平代替。

参考文献:

- [1] 胡姝, 李英, 许映龙. 登陆台湾岛热带气旋强度和结构变化的统计分析[J]. 热带气象学报, 2012, 28(3):300-310.
HU S, LI Y, XU Y L. A statistical analysis on intensity and structure changes of tropical cyclones making landfall on Taiwan Island [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(3):300-310.
- [2] 林良勋, 梁巧倩, 黄忠. 华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J]. 气象, 2006, 32(2):14-18.
LIN L X, LIANG Q Q, HUANG Z. Analysis of circulation pattern of rapidly intensified offshore tropical cyclones of south China [J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(2):14-18.
- [3] 季亮, 费建芳, 黄小刚. 副热带高压对登陆台风影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2010, 68(1):39-47.
JI L, FEI J F, HUANG X G. Numerical simulations of the effect of the subtropical high on landfalling tropical cyclones [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(1):39-47.
- [4] 黄荣成, 雷小途. 环境场对近海热带气旋突然增强与突然减弱影响的对比分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(2):129-137.
HUANG R C, LEI X T. Comparative analysis of the influence of environment field on rapid intensifying and weakening of tropical cyclones over offshore waters of China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 26(2):129-137.
- [5] WU G, LIU H. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 1998, 27(1):715-743.
- [6] 余晖, 费亮, 端义宏. 8807 和 0008 登陆前的大尺度

- 环境特征与强度变化[J]. 气象学报, 2002, 60(增刊):78-87.
- YU H, FEI L, DUAN H Y. The large scale environmental and intensity characteristics of No. 8807 and 0008 Typhoon before landing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(Supp): 40-55
- [7] 梁建茵, 陈子通, 万齐林, 等. 热带气旋“黄蜂”登陆过程诊断分析[J]. 热带气象学报, 2003, 19(Supp): 45-55.
- LIANG J Y, CHEN Z T, WAN Q L, et al. Diagnostic analysis of the landfall process tropical cyclone “Vongfong” [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2003, 19(Supp):45-55.
- [8] CHEN P, YU H, CHAN J C. A western North Pacific tropical cyclone intensity prediction scheme [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 25(5):611-624.
- [9] 胡春梅, 端义宏, 余晖, 等. 华南地区热带气旋登陆前强度突变的大尺度环境诊断分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(4):377-382.
- HU C M, DUAN Y H, YU H, et al. The diagnostic analysis of the rapid change in tropical cyclones intensity before landfall in south China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(4):377-382.
- [10] 舒锋敏, 罗森波. 台风“海高斯”过程及登陆减弱后再次加强的影响因素分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(3):317-324.
- SHU F M, LUO S B. The process analysis of “Higos” and the influencing factors of reinforcing again after landing to weaken [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, 26(3):317-324.
- [11] 于玉斌, 段海霞, 炎利军, 等. 超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强过程数值模拟试验[J]. 大气科学, 2008, 32(6):1365-1378.
- YU Y B, DUAN H X, YAN L J, et al. Numerical simulation of rapid intensification change of super typhoon Saomai (2006) over the coastal water of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(6):1365-1378.
- [12] 薛根元, 张建海, 陈红梅, 等. 超强台风 Saomai (0608)加强成因分析及海温影响的数值试验研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3):311-321.
- XUE G Y, ZHANG J H, CHEN H M, et al. Analysis on causes of strengthening of super strong typhoon Saomai(0608)and numerical experiments of the impact of SST on its intensity [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3):311-321.
- [13] 李江南, 吴国强, 王刚, 等. 南海台风 Vongfong (2002)登陆前后内核结构和近海加强原因的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5):441-448.
- LI J N, WU G Q, WANG G, et al. Numerical study of the inner-core structures and the mechanism for inshore strengthening during the landfalling of typhoon Vongfong (2002)in the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2008, 24(5):441-448.
- [14] 于玉斌, 陈联寿, 杨昌贤. 超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强特征及机理分析[J]. 大气科学, 2008, 32(2):405-416.
- YU Y B, CHEN L S, YANG C X. The features and mechanism analysis on rapid intensity change of super typhoon Saomai (2006) over the offshore of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(2):405-416.
- [15] 杨兆礼, 陈子通, 张诚忠, 等. 2012年中国南海台风模式预报情况[J]. 热带气象学报, 2014, 30(2):392-400.
- YANG Z L, CHEN Z T, ZHANG C Z, et al. The forecast of South China Sea TC model in 2012 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(2):392-400.
- [16] 丁一汇, 刘月贞. 7507号台风中水汽收支的研究[J]. 海洋学报, 1986(3):291-301.
- DING Y H, LIU Y Z. The study of moisture budget of typhoon 7507[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986(3):291-301.
- [17] 钱燕珍, 张胜军, 黄奕武, 等. 强台风“海葵”(1211)近海急剧增强的数值研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(6):1069-1079.
- QIAN Y Z, ZHANG S J, HUANG Y W, et al. The numerical simulation study on rapid intensification of typhoon Haikui (1211) over the offshore area of China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(6):1069-1079.
- [18] LIU Y, ZHANG D, YAU M K. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and inner-core structures[J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(11):2597-2616.
- [19] 李忆平. 南海台风暖心结构形成的个例研究及台风登陆前后暖心结构变化的初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- LI Y P. Case study on the formation of warm core structure of typhoon in South China Sea and preliminary analysis on the changing character of warm core structure of typhoon before and after landing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007.
- [20] 丁一汇, 陈联寿. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.