

许娈, 高守亭, 崔晓鹏, 等. 2014. 登陆台风“凡亚比”(1011)合力散度分布及演变特征研究 [J]. 大气科学, 38 (1): 110–120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12175. Xu Luan, Gao Shouting, Cui Xiaopeng, et al. 2014. Study on total force divergence distribution and evolution features of landfalling typhoon Fanapi (1011). [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 110–120.

登陆台风“凡亚比”(1011)合力散度分布及演变特征研究

许娈^{1,2,3} 高守亭² 崔晓鹏² 何金海¹

¹ 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

² 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

³ 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008

摘要 本文利用 1011 号台风“凡亚比”高分辨率数值模拟资料及合力散度方程, 诊断分析了“凡亚比”台风的合力散度水平分布及演变过程。首先将模拟的“凡亚比”生命史划分为五个阶段, 然后计算各阶段整层垂直积分的合力散度, 得到以下发现: 在“凡亚比”快速增强阶段, 台风中心附近首先出现合力辐合区, 外围为合力辐散区; “凡亚比”成熟期和鼎盛期, 合力辐合区呈现出以台风中心为圆心, 半径约 150 km 的近似圆形分布, 且中心附近辐合强度最大, 向外逐渐减弱, 外围合力辐散区呈螺旋云带状分布, 宽度约 200 km; “凡亚比”第一次登陆过程中, 台风中心与合力辐合极值中心发生偏离, 合力散度强度逐渐减小, 对称结构被破坏; 二次登陆后, 辐散区迅速衰减甚至消失, 但台风中心附近仍存在比较明显的合力辐合。“凡亚比”整个生命史中, 合力辐合的平均强度普遍大于辐散的平均强度, 前者与台风强度有显著的正相关关系。总体上, 合力散度的强信号始终与台风环流系统相伴随, 其演变能较好地反映出台风强度及结构的发展和演变。

关键词 台风 合力散度特征 模拟诊断

文章编号 1006-9895(2014)01-0110-11

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12175

Study on Total Force Divergence Distribution and Evolution Features of Landfalling Typhoon Fanapi (1011)

XU Luan^{1,2,3}, GAO Shouting², CUI Xiaopeng², and HE Jinhai¹

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

Abstract Using high-resolution simulation data for the landfalling typhoon Fanapi (1011) and the total force divergence equation, the horizontal distribution and evolution of the total force divergence/convergence of Fanapi are diagnosed. The lifespan of Fanapi is divided into five stages, and the vertical integration of the total force divergence/convergence is then calculated. During the initial rapid intensification stage, a convergence zone of the total force appears. In the mature and vigorous period, the total force convergence area appears as a roughly circular shape with a radius of about 150 km

收稿日期 2012-10-21, 2013-05-08 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421505, 国家自然科学基金项目 41175056、40921160379, 中国科学院重点部署项目 KZZD-EW-05-01, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD), 江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划项目 CXLX12_0493

作者简介 许娈, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 研究领域: 登陆台风数值模拟和动力诊断。E-mail: xu.luan@yahoo.com.cn

通讯作者 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

centered on the typhoon location. The convergence intensity is strongest around the typhoon center and decreases outward. On the periphery of the convergence zone lies the divergence zone, appearing analogous to the spiral cloud bands with a width of about 200 km. The convergence intensity decreases gradually, and its maximum deviates from the typhoon center when Fanapi makes its first landfall and the symmetrical structure is destroyed. After the second landfall, the divergence region shrinks rapidly, whereas the convergence area is relatively significant. Throughout the life history of Fanapi, the average convergence intensity is generally higher than that of divergence and has a significant positive correlation with the typhoon intensity. In summary, a distinct signal of the total force divergence/convergence always accompanies typhoon circulation, and its evolution is also capable of identifying the development of the typhoon intensity and structure.

Keywords Typhoon, Total force divergence/convergence features, Numerical simulation and diagnosis

1 引言

热带气旋(Tropical Cyclone, 简称 TC)灾害伤亡人数之多在十大自然灾害中高居首位, 其造成的大灾都是在其登陆前后发生的, 而我国是世界上热带气旋(台风)登陆最多的国家之一, 深受其影响(陈联寿和孟智勇, 2001; 陈联寿等, 2004)。西北太平洋台风影响地区占我国国土面积的 1/2 左右, 南到海南省, 北到黑龙江省, 最西可至西南部 100°E 以西地区(程正泉等, 2007), 其带来的暴雨、大风和风暴潮等灾害对国家经济和人民生命财产安全造成严重威胁。台风登陆前后的强风可摧毁船只, 拔树倒屋; 而台风暴雨灾害往往超过其强风带来的灾害。我国 24 小时累积降水记录中, 排在前六位的极端强降水均是由台风引发的(Chen et al., 2010)。强降水及其带来的次生灾害, 如水库垮塌、江河泛滥、泥石流爆发等, 都是造成人员伤亡和财产损失的最直接因素。登陆热带气旋还会引发风暴潮, 如 9417 号强台风 Fred, 其引发的潮位打破历史最高纪录; 1991 年 4 月 29 日登陆孟加拉沿岸的热带气旋引发的强大风暴潮夺走了 13.9 万人的生命。登陆热带气旋带来如此严重的灾害, 引起了广泛关注, 其登陆过程研究成为气象学者最为关注的热点和难点之一。

近年来随着观测技术和高速计算机的快速发展, 在观测资料的基础上结合高分辨数值模拟成为台风研究的一种重要手段, 尤其是数值模拟, 由于可以很好地弥补海上观测资料稀缺以及观测资料时空分辨率较低等问题, 成为台风(包括登陆台风)研究不可或缺的重要手段之一。国内外气象学者利用各种数值模式针对(登陆)台风开展了大量研究工作, 内容涉及台风发生和发展、移动和路径预报方法、结构和强度变化、登陆和变性过程、登陆后的衰减和维持机制及其引起的暴雨分布等, 有效推

动了台风科研与预报水平的提高。Kasahara (1961) 利用静力平衡模式, 研究了潜热在轴对称热带气旋切向运动及暖心径向环流发展中的作用。Ooyama (1969) 成功模拟出典型的热带气旋生命史。Anthes (1972) 首次利用分辨率 30 km 的三维静力模式对飓风结构进行了模拟, 指出飓风的非对称特征。Kurihara and Tuleya (1974) 成功地构造了一个三维原始方程模式(垂直方向 11 层)用于海上热带气旋的结构模拟研究, 中心附近分辨率达到 20 km。随后又将该模式用于热带气旋登陆的理想试验中(Tuleya and Kurihara, 1978), 揭示了热带气旋登陆前后的结构以及能量、角动量收支的变化, 并指出热带气旋登陆后蒸发减少是造成其迅速减弱填塞的首要原因。Chang (1981) 在轴对称热带气旋模式基础上同化了卫星风场资料, 发现同化整个对流层低层(600 hPa)以及流出层的风场观测资料均可显著改进热带气旋的强度预报。另外, Chang (1982) 还运用原始方程模式开展理想试验, 重现了台湾的岛屿地形影响台风路径的一些观测事实, 并通过对比试验发现, 山脉附近存在气旋式环流是由积云对流释放出大量潜热引起的。20 世纪 90 年代中期以来, 随着中尺度模式分辨率的明显提高以及模式物理过程的不断改进(陈德辉和薛纪善, 2004), 热带气旋高分辨率数值模拟方面也开展了很多有意义的工作。张福青等(1996)利用中尺度模式 MM4 成功模拟了 8805 号台风登陆前后的演变及其伴随的特大暴雨过程。陈联寿等(1997)运用数值模式研究了台风外区热力不稳定非对称结构对其异常路径的影响问题, 发现台风外区不同热力非对称分布特征会导致台风移动轨迹的显著差异。Zhang and Bao (1996) 利用 MM4 模式对一次引发暴雨过程的中尺度对流系统(MCS)开展了长达 90 小时的模拟试验, 发现陆地上的中尺度对流系统

(MCS) 在向海岸移动过程中, 可在其后部激发出新的 MCS, 并在对流强迫作用下引发洋面上热带气旋的生成。Liu et al. (1997) 利用 MM5 模式很好地再现了飓风 Andrew (1992) 的发展、急剧加强以及登陆过程, 其路径、强度、结构、螺旋雨带都与观测十分吻合, 模拟的最高分辨率达到 6 km。在此模拟结果基础上, 重点关注了 Andrew 迅速增强阶段内核区的轴对称和非对称结构特征, 提出了热带气旋轴对称结构的概念模型 (Liu et al., 1999)。Wu et al. (2002) 利用 MM5 模式, 采用四层嵌套对 1996 年登陆台风 Herb 的移动路径、强度演变和降水分布开展了最高分辨率达 2.2 km 的数值模拟, 取得了令人鼓舞的模拟结果, 并指出, 提高模式网格和地形的分辨率对于成功模拟出此次强降水过程具有重要作用。钮学新等 (2005) 和冀春晓等 (2007) 用 MM5 模式分别对 0216 号台风和 0414 号台风开展了模拟, 发现地形对降水分布和强度有较大影响。周冠博等 (2012) 利用 WRF 模式对 0808 号台风“凤凰”登陆过程开展了高分辨率数值模拟, 最高分辨率 3 km, 较好的再现了整个 120 小时模拟过程中“凤凰”台风的路径、强度演变和主要的雷达回波特征等。尽管 (登陆) 台风的科研和预报水平有了较大提高, 但提高得不快 (陈联寿, 2006), 目前仍不能满足公众需求和防灾需求, 与 (登陆) 台风相关的许多基础性、关键性科学问题仍亟待解决。

大气是一个流体动力学和热力学系统, 可以由运动方程、连续方程、状态方程、热力学方程和水汽方程等来描述 (寿绍文等, 2009)。其中运动学方程表明, 当空气质点受力不同时, 其运动方式也是不同的。台风作为一种运动系统, 同样也受到各种力的支配, 包括气压梯度力、地球引力、浮力、摩擦力、科氏力、惯性离心力等。要一一计算出各个力, 不仅计算量大, 而且不容易计算准确甚至有的力无法计算。以往的研究工作中, 关于科氏力对台风结构和移动影响的研究较多, 比较集中地探讨了台风中的 β 效应 (Chan and Gray, 1982; Holland, 1983; Chan and Williams, 1987; Fiorino and Elsberry, 1989; Carr and Elsberry, 1997; Peng et al., 1999; Liang and Chan, 2005), 而涉及台风系统所受合力状况的研究还极少。天气系统发生变化时, 受力不再为零, 即出现合力的辐合辐散 (高守亭等, 2011)。台风作为一种强烈的涡旋运动系统, 其受力特征必然与周围环境大气有着显著的区别,

研究台风系统的合力状况及其演变特征能够更加详细地了解台风的发展和演变过程。

本文选取的个例为 2010 年西北太平洋和南海地区生成的超强台风, 也是 2010 年唯一两次登陆我国的台风——“凡亚比”。“凡亚比”带来的强降水给台湾, 福建和广东造成严重灾害。刘海军等 (2013) 利用 WRF 模式对“凡亚比”台风的发展、演变及登陆过程开展了高分辨率 (三层嵌套, 最高分辨率为 3 km)、长达 5 天 (120 小时) 的数值模拟, 并利用搜集到的多种观测资料 [卫星云图, MICAPS 降水资料, 上海台风所最佳路径资料, NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction-Final) 再分析资料] 对模拟结果进行了验证, 验证结果表明, WRF 模式较好地模拟再现了“凡亚比”台风的发展演变及两次登陆过程, 模拟的台风路径与观测路径比较一致, 路径差基本稳定在 120 km 以内; 台风中心最低气压与最大风速的演变与观测吻合地很好, 趋势基本一致; 同时较好地再现了“凡亚比”登陆前后大尺度环流的演变特征以及台风与周围环流系统的相互作用等, 模拟取得了成功。本文将在以上模拟工作的基础上, 利用模拟资料, 对“凡亚比”所受合力状况及其演变特征开展研究, 增进对台风系统环流所受合力状况及其演变特征的理解和认识。

2 合力散度方程

参照高守亭等 (2011) 的研究工作, 利用局地直角坐标系下的大气运动方程 (沈桐立等, 2003):

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv - \tilde{f} w + F_x, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + F_y, \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \tilde{f} u - g + F_z, \quad (3)$$

式中, $d/dt = \partial/\partial t + u \partial/\partial x + v \partial/\partial y + w \partial/\partial z$ 为局地直角坐标系中的微分算子, $f = 2\Omega \sin \varphi$ 、 $\tilde{f} = 2\Omega \cos \varphi$ 为科氏参数, u 、 v 、 w 分别为局地直角坐标系中沿坐标轴 x 、 y 、 z 方向的风速, p 为气压, ρ 为密度, g 为重力加速度, F_x 、 F_y 、 F_z 为摩擦力 (湍流粘性力与分子粘性力之和) 在 x 、 y 、 z 三个方向的分量。

对 (1) ~ (3) 式分别取 $\partial/\partial x$ 、 $\partial/\partial y$ 和 $\partial/\partial z$,

并相加得到:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ & \quad (A) \qquad \qquad \qquad (B) \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ & \quad (C) \qquad \qquad \qquad (D) \\ & \nabla \cdot \mathbf{F}_t. \end{aligned} \quad (4)$$

由 $\mathbf{V} = vi + vj + wk$, (4) 式可进一步写为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) = \nabla \cdot \mathbf{F}_t, \quad (5)$$

其中, ∇ 为三维微分算子, \mathbf{F}_t 为气压梯度力、科氏力、重力、摩擦力之和, 即合力, $\nabla \cdot \mathbf{F}_t < 0$ 代表合力辐合, $\nabla \cdot \mathbf{F}_t > 0$ 代表合力辐散。式中 $\nabla \mathbf{V}$ 为风的三维梯度, 反映了质点本身所具有的速度与周围环境质点速度的相互作用情况。我们将(5)式称为合力散度方程, 下面将基于“凡亚比”台风个例模拟结果, 利用上述方程, 对“凡亚比”生命史中合力特征及其发展、演变开展诊断分析。

3 “凡亚比”台风概况

“凡亚比”台风是 2010 年西北太平洋和南海地区生成的超强台风, 9 月 14 日 18 时开始编号, 18 日 18 时达到超强台风级别(协调世界时, 下同), 随后登陆台湾, 约 24 小时后登陆福建。“凡亚比”给台湾局部带来超过 1000 mm 的过程累积降水, 最大阵风达到 17 级; 广东、福建沿海部分地区过程降水达 120~250 mm, 造成了严重的人民生命和财产损失。

根据热带气旋等级国家标准(GB/T 19201—2006)将模拟时段(2010 年 9 月 16 日 00 时至 21 日 00 时)的“凡亚比”台风进行强度分级。其中 16 日 00 时至 17 日 00 时, “凡亚比”台风中心附近最大风速由 18.8 m s^{-1} 增长到 29.9 m s^{-1} , 强度由热带风暴增强到强热带风暴, 我们将该阶段定义为“凡亚比”的快速增强阶段; 17 日 03 时至 21 时, “凡亚比”达到并维持台风强度, 定义为发展成熟阶段; 此后, “凡亚比”继续增强, 达到强台风级别, 该阶段定义为鼎盛阶段; 之后逐渐靠近并登陆台湾岛, 为首次登陆减弱阶段; 19 日 15 时至 21 日 00 时, “凡亚比”减弱为强热带风暴, 登陆我国大陆后持续减弱, 将该阶段确定为二次登陆消亡阶段。图 1 给出了“凡亚比”生命史中的这五个阶段及强度等级的时间演变。下面就根据划分的这五个阶段来诊断分析“凡亚比”所受合力的散度分布特征及演变。

4 “凡亚比”不同发展阶段整层垂直积分的合力散度特征分析

4.1 快速增强阶段

由(5)式可知, 合力散度可用(5)式左端两项之和来代替, 利用模拟资料(刘海军等, 2013)计算出(5)式左端两项之和, 并对所有模拟层次(共 27 层)进行垂直积分, 即得到整层积分的合力散度。图 2 给出“凡亚比”快速增强阶段的合力散度分布及其演变。模拟开始时刻(2010 年 9 月 16 日 00 时), “凡亚比”强度等级为热带风暴(TS), 在其中心附近已经出现明显的合力辐合(图

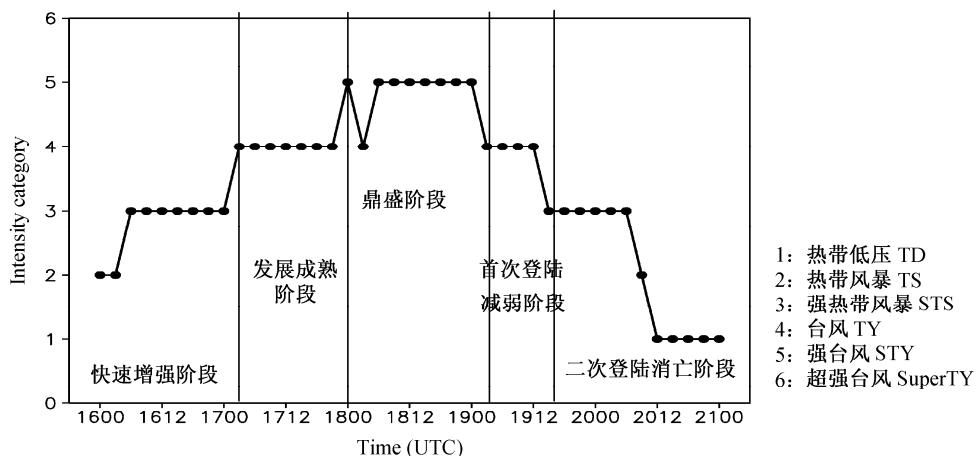


图 1 模拟的“凡亚比”台风五个阶段及强度等级的时间演变(2010 年 9 月 16 日 00 时至 21 日 00 时)

Fig. 1 The five stages throughout the life time of simulated typhoon Fanapi and the evolution of intensity category from 0000 UTC 16 Sep to 0000 UTC 21 Sep, 2010

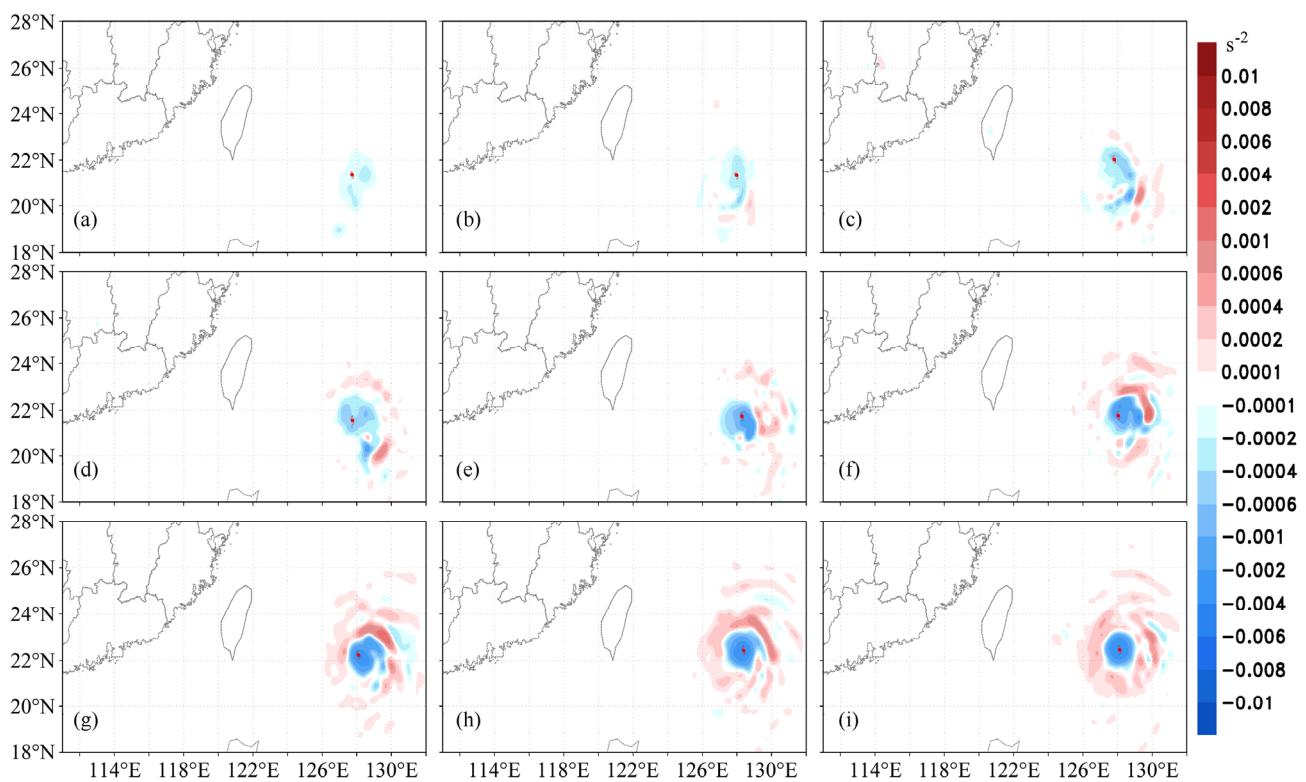


图2 “凡亚比”快速增强阶段整层垂直积分的合力散度分布(16日00时至17日00时,间隔3小时,蓝色阴影为合力辐合,红色阴影为合力辐散,单位: s^{-2} ,红色台风符号标出台风中心所在位置):(a) 16日00时;(b) 16日03时;(c) 16日06时;(d) 16日09时;(e) 16日12时;(f) 16日15时;(g) 16日18时;(h) 16日21时;(i) 17日00时

Fig. 2 The total force divergence/convergence distribution during the rapid intensification stage of Fanapi from 0000 UTC 16 Sep to 0000 UTC 17 Sep with 3-h interval: (a) 0000 UTC 16 Sep; (b) 0300 UTC 16 Sep; (c) 0600 UTC 16 Sep; (d) 0900 UTC 16 Sep; (e) 1200 UTC 16 Sep; (f) 1500 UTC 16 Sep; (g) 1800 UTC 16 Sep; (h) 2100 UTC 16 Sep; (i) 0000 UTC 17 Sep. The blue (red) shaded area indicates total force convergence (divergence), and typhoon center is marked by the red typhoon symbol

2a), 强度(绝对值,下同)约 $2.0 \times 10^{-4} s^{-2}$,其中东部和南部辐合较强。03时(图2b), TC中心及其南侧辐合加强,强度为 $6.0 \times 10^{-4} s^{-2}$,其外围出现合力的辐散,大小为 $4.0 \times 10^{-4} s^{-2}$ 。06时(图2c),模拟的“凡亚比”增强为强热带风暴(STS),TC中心附近及其东南侧的辐合区强度迅速增大,最大达到 $1.0 \times 10^{-3} s^{-2}$ 以上。外围合力的辐散区也显著增强,其极值区与最强辐合区相呼应,均位于TC中心东南侧。16日09时(图2d),TC中心附近的合力辐合区有比较明显的扩展,东南侧的合力散度大值区逐渐向TC中心靠近。辐散区基本呈半环状分布于辐合区外围。3 h后(图2e),强辐合区域已经合并,TC中心位于辐合区中心附近,辐散区较为分散,但仍主要分布于TC东侧。16日15时(图2f),合力辐散区域较前一时刻有明显的扩展和增强,大值带位于TC东侧和北侧,最强达到 $1.0 \times 10^{-3} s^{-2}$ 以上,TC西侧也出现弱的合力辐散区。“凡亚比”中心附近的辐合强度达到 $2.0 \times 10^{-3} s^{-2}$ 以

上,仍然大于辐散最大强度。随着TC不断发展,到21时(图2h),合力辐合区基本呈对称圆形分布,TC中心与辐合中心位置几乎重叠。北侧辐散强于南侧,极值略有降低,但整体上趋于环状分布。17日00时(图2i),合力散度的强度基本维持,其分布进一步趋向对称。可见,在“凡亚比”快速增强阶段,前期合力散度主要体现为台风中心附近的合力辐合,非对称结构较为明显;随着台风强度的不断增强,合力散度强度也呈增强趋势,其分布的对称性不断增加。

4.2 发展成熟阶段

图3为“凡亚比”发展成熟阶段的合力散度分布及演变。“凡亚比”不断西移并于17日03时增强为台风(图3a),中心附近合力辐合强度达 $4.0 \times 10^{-3} s^{-2}$ 以上,合力辐散区在已形成的环状分布基础上,强度亦有所增强,最大值位于东南侧,达到 $1.0 \times 10^{-3} s^{-2}$ 以上。06时(图3b),台风附近的合力辐合高值区(强度 $>4.0 \times 10^{-3} s^{-2}$)的范围较

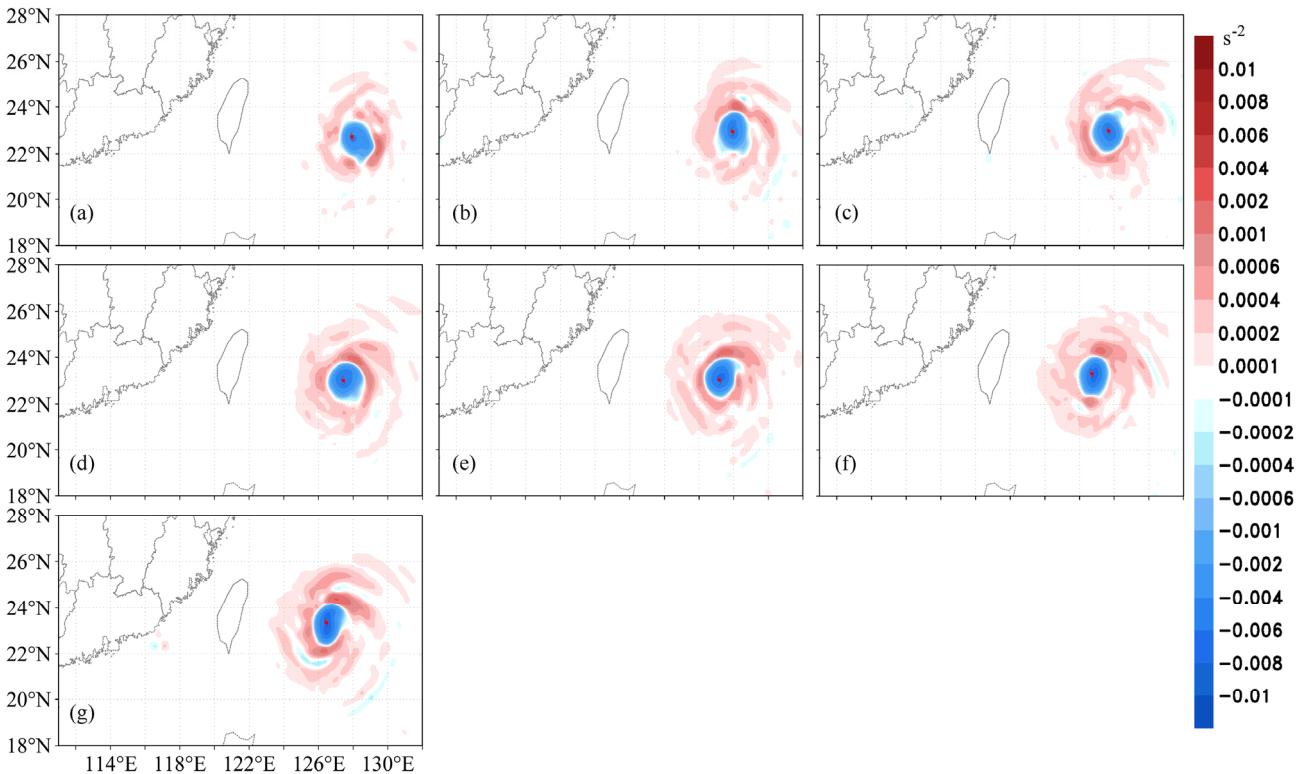


图3 “凡亚比”发展成熟阶段整层垂直积分的合力散度分布(17日03时至21时,间隔3小时,蓝色阴影为合力辐合,红色阴影为合力辐散,单位: s^{-2} ,红色台风符号标出台风中心所在位置):(a) 17日03时;(b) 17日06时;(c) 17日09时;(d) 17日12时;(e) 17日15时;(f) 17日18时;(g) 17日21时

Fig. 3 The total force divergence/convergence distribution during the mature stage of Fanapi from 0300 UTC to 2100 UTC, 17 Sep with 3-h interval: (a) 0300 UTC 17 Sep; (b) 0600 UTC 17 Sep; (c) 0900 UTC 17 Sep; (d) 1200 UTC 17 Sep; (e) 1500 UTC 17 Sep; (f) 1800 UTC 17 Sep; (g) 2100 UTC 17 Sep. The blue (red) shaded area indicates total force convergence (divergence), and typhoon center is marked by the red typhoon symbol

上一时刻扩大,强辐散区移动到TC北侧。此后,“凡亚比”合力散度分布继续保持较高的对称性,强度逐渐增强(图3c-f)。17日21时(图3g),辐合强度极值已超过 $6.0 \times 10^{-3} s^{-2}$,辐合区外围的辐散强度也普遍达到 $4.0 \times 10^{-4} s^{-2}$ 以上,最强达到 $2.0 \times 10^{-3} s^{-2}$ 。从17日06时开始,与台风环流相伴随的合力辐散呈现出较明显的类似螺旋云雨带形式的分布特征。

4.3 鼎盛阶段

18日00时(图4a),模拟的“凡亚比”台风中心附近最大风速达到 $42.5 m s^{-1}$,升级为强台风,达到其生命史中的鼎盛阶段(图4)。强度超过 $6 \times 10^{-3} s^{-2}$ 的合力辐合高值区较前一时刻扩大,合力辐散平均强度也有所增强。18日03时(图4b),TC中心附近最大风速略有降低($40.4 m s^{-1}$),辐散极值区(带)位于中心辐合区域东西两侧,接近对称分布。06时(图4c),合力辐合进一步增强,台风中心附近超过 $8.0 \times 10^{-3} s^{-2}$ 。18日09时至19日00时(图4d-i),

台风合力辐合区一直保持近似圆形分布。此时段内模拟的“凡亚比”基本维持在强台风级别,合力散度基本保持不变,辐合强度接近 $10^{-2} s^{-2}$ 量级,辐散强度为 $10^{-3} s^{-2}$ 量级。从18日15时开始(图4f),台风外围合力散度区开始明显受到台湾地形的影响,靠近台湾岛一侧的外围合力散度区的结构逐渐被破坏,出现了一些可能与局地地形有关的尺度更小的合力辐合和辐散结构,而内部辐合区还未受到影响。

4.4 首次登陆减弱阶段

由于台风环流受到下垫面影响,19日03时,“凡亚比”由强台风降至台风(图5a),合力散度强度明显减弱。原来较对称、较均匀的辐散区结构明显被破坏,变为零散的更小尺度的极值中心,西侧的辐散区位于台湾地形之上,辐散与辐合的相间分布特征较上一时刻(图4i)更加显著。同时,台风中心附近合力辐合强度也受到明显影响,绝对值极值降低,接近对称分布的状况变化较大,靠近台

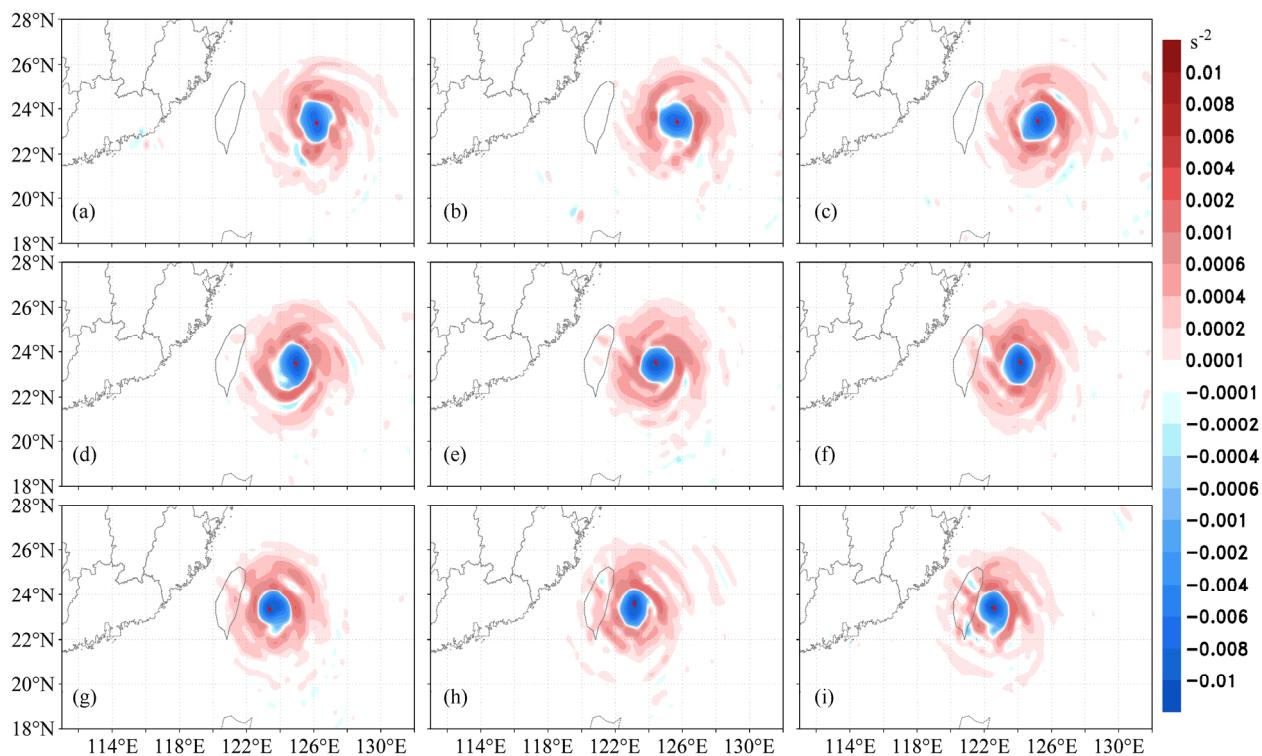


图4 “凡亚比”鼎盛时期整层垂直积分的合力散度分布（18日00时至19日00时，间隔3小时，蓝色阴影为合力辐合，红色阴影为合力辐散，单位： s^{-2} ，红色台风符号标出台风中心所在位置）(a) 18日00时；(b) 18日03时；(c) 18日06时；(d) 18日09时；(e) 18日12时；(f) 18日15时；(g) 18日18时；(h) 18日21时；(i) 19日00时

Fig. 4 The total force divergence/convergence distribution during the vigorous stage of Fanapi from 0000 UTC 18 Sep to 0000 UTC 19 Sep with 3-h interval. The blue (or red) shaded area indicates total force convergence (or divergence) (unit: s^{-2}), and typhoon center is marked by the red typhoon symbol. (a) 0000 UTC 18 Sep; (b) 0300 UTC 18 Sep; (c) 0600 UTC 18 Sep; (d) 0900 UTC 18 Sep; (e) 1200 UTC 18 Sep; (f) 1500 UTC 18 Sep; (g) 1800 UTC 18 Sep; (h) 2100 UTC 18 Sep; (i) 0000 UTC 19 Sep

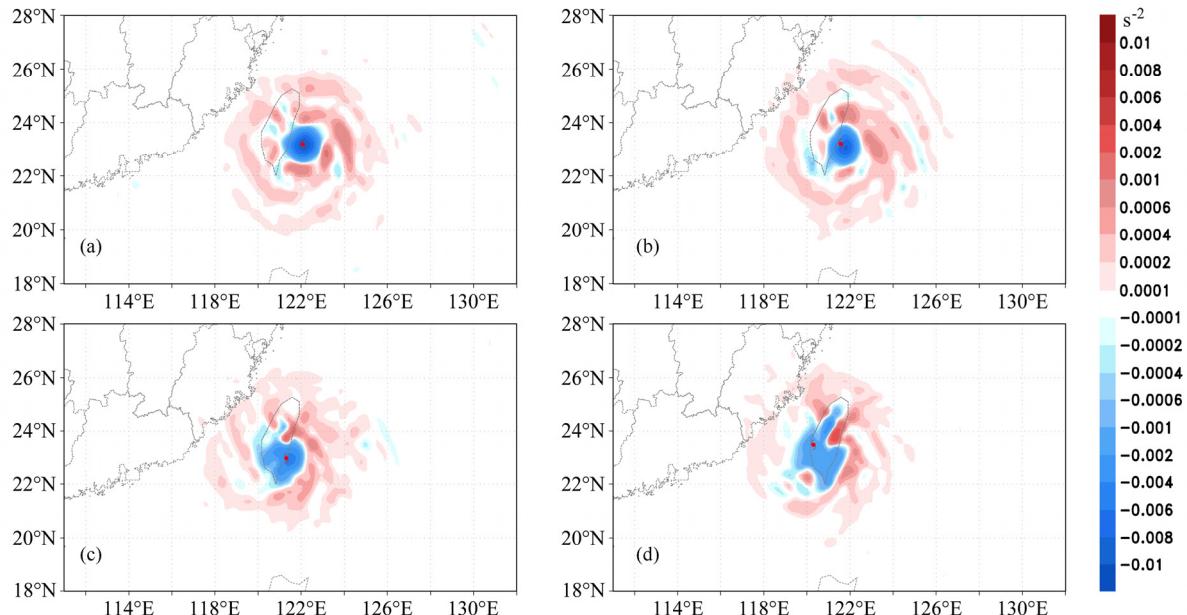


图5 “凡亚比”首次登陆减弱阶段整层垂直积分的合力散度分布（19日03时至19日12时，间隔3小时，蓝色阴影为合力辐合，红色阴影为合力辐散，单位： s^{-2} ，红色台风符号标出台风中心所在位置）：(a) 19日03时；(b) 19日06时；(c) 19日09时；(d) 19日12时

Fig. 5 The total force divergence/convergence distribution during the weakening stage due to Fanapi's first landfall from 0300 UTC to 1200 UTC, 19 Sep with 3-h interval: (a) 0300 UTC 19 Sep; (b) 0600 UTC 19 Sep; (c) 0900 UTC 19 Sep; (d) 1200 UTC 19 Sep. The blue (red) shaded area indicates total force convergence (divergence), and typhoon center is marked by the red typhoon symbol

湾岛一侧的合力散度梯度减小。随着台风中心逼近台湾岛, 19日06时(图5b), 台风中心超前于合力辐合极大值中心, 两个中心不再重合, 平均辐合强度进一步减弱。由于中央山脉北段和雪山的地形影响, 台湾岛中北部的合力辐散区异常加强, 山脉西侧地形较低处出现辐合区。19日09时(图5c), 模拟的“凡亚比”台风已登陆台湾, 辐合强度迅速减弱, 极值降低至前一时刻的一半, 台风合力散度的对称结构逐渐消失, 辐合与辐散结构均开始变得松散。12时(图5d), 台风中心越过中央山脉, 辐合强度继续降低, 仅达 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ 。台湾中北部力的辐合、辐散区仍呈相间分布。

4.5 二次登陆消亡阶段

19日15时(图6a), “凡亚比”中心已移出台湾岛, 由于下垫面的摩擦填塞作用, 其强度减弱为强热带风暴。台湾中东部地区为较强合力辐散区覆盖, 其他地区均位于辐合区内。辐合区极值中心与台风中心恢复重合。受地形影响, 辐合区南北两侧各出现一条辐合带, 与辐散区相间。18时(图6b), “凡亚比”西行至台湾海峡上空, 由于下垫面摩擦填塞作用大大减弱, 合力散度分布有重新组织加强的趋势, 合力辐合区恢复到接近对称圆形, 外围存在辐合区域与辐散区域相间的带状结构。21时(图6c), “凡亚比”的最大风速有所增大, 位

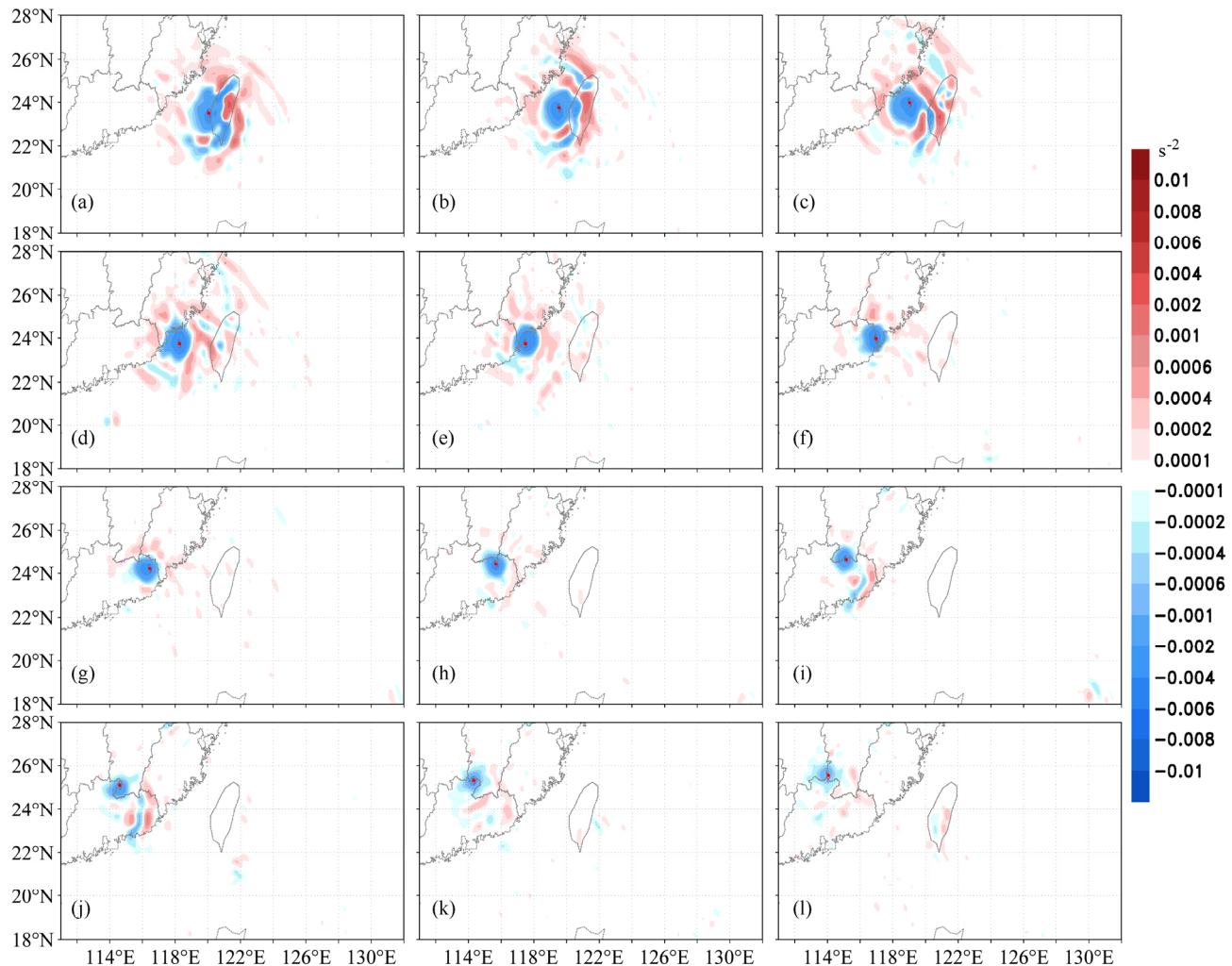


图6 “凡亚比”二次登陆消亡阶段整层垂直积分的合力散度分布(19日15时至21日00时, 间隔3小时, 蓝色阴影为合力辐合, 红色阴影为合力辐散, 单位: s^{-2} , 红色台风符号标出台风中心所在位置: (a) 19日15时; (b) 19日18时; (c) 19日21时; (d) 20日00时; (e) 20日03时; (f) 20日06时; (g) 20日09时; (h) 20日12时; (i) 20日15时; (j) 20日18时; (k) 20日21时; (l) 21日00时)

Fig. 6 The total force divergence/convergence distribution during the dissipating stage due to Fanapi's second landfall from 1500 UTC 19 Sep to 0000 UTC 21 Sep with 3-h interval: (a) 1500 UTC 19 Sep; (b) 1800 UTC 19 Sep; (c) 2100 UTC 19 Sep; (d) 0000 UTC 20 Sep; (e) 0300 UTC 20 Sep; (f) 0600 UTC 20 Sep; (g) 0900 UTC 20 Sep; (h) 1200 UTC 20 Sep; (i) 1500 UTC 20 Sep; (j) 1800 UTC 20 Sep; (k) 2100 UTC 20 Sep; (l) 0000 UTC 21 Sep. The blue (red) shaded area indicates total force convergence (divergence), and typhoon center is marked by the red typhoon symbol

于北侧的辐合带逐步减弱消失，南侧辐合带也逐渐向辐合中心汇集。台风中心附近合力辐合区域趋近于圆形，辐散区的结构也逐步恢复。经过短暂的恢复阶段，“凡亚比”即将二次登陆我国大陆。3 h 后（图 6d），其外围合力辐散区的强度减弱，结构破碎。辐合区外缘也已经受到了我国大陆地形的影响，极值区范围有所缩小。

20 日 03 时（图 6e），“凡亚比”二次登陆，其后基本沿着广东与福建、江西交界处向偏西北方向移动，TC 中心的辐合区一直存在较明显的异常信号，但强度逐渐减弱，范围逐渐缩小，外围合力散度分布趋于减弱消散。二次登陆 6 小时后（图 6g），“凡亚比”减弱为热带风暴，中心辐合强度为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ ，辐散强度比辐合小一个量级。20 日 12 时（图 6h），进一步减弱为热带低压，途经广东境内的阴那山山脉时再次出现较明显的辐散和辐合相间分布特征（图 6i、j），表明地形对台风合力散度分布有显著的调整作用，带状山脉可导致合力辐合、辐散时间分布特征的形成，并伴随合力散度强度的异常增强。随着“凡亚比”逐渐填塞消亡（图 6k、l），力的辐合强度逐步减小，模拟最后时刻辐合强度降为 10^{-4} s^{-2} 量级，而辐散区则近乎消失。

5 合力散度平均强度的时间演变及其与台风强度的关系

整个模拟时段（9月16日00时至21日00时）内“凡亚比”合力散度平均强度演变趋势如图7所示。以台风中心为圆心、400 km 为半径的圆域内（此范围可以涵盖各个时刻“凡亚比”合力散度覆盖的区域）分别统计合力散度为正值（或负值）的点数，求出正值点（或负值点）的合力散度之和，平均后即得到整层垂直积分的合力辐散（或辐合）平均强度。同样的，用该区域内所有点的合力散度之和除以总点数，得到总的合力散度平均强度。结果表明，合力辐合平均强度呈现显著的单峰型，而辐散平均强度的变化趋势较为平稳；同一时刻的合力辐合平均强度大于合力辐散平均强度，尤其在台风发展成熟阶段和鼎盛时期，合力辐合强度远远高于辐散强度。总的合力散度平均值为趋近于零的负值，说明“凡亚比”整体上表现出很弱的合力辐合，基本为一个合力无辐散系统。在长达 120 小时的模拟时段内，合力辐合强度与台风强度的两个指标（10 m 高度最大风速和海平面最低气压）的相关

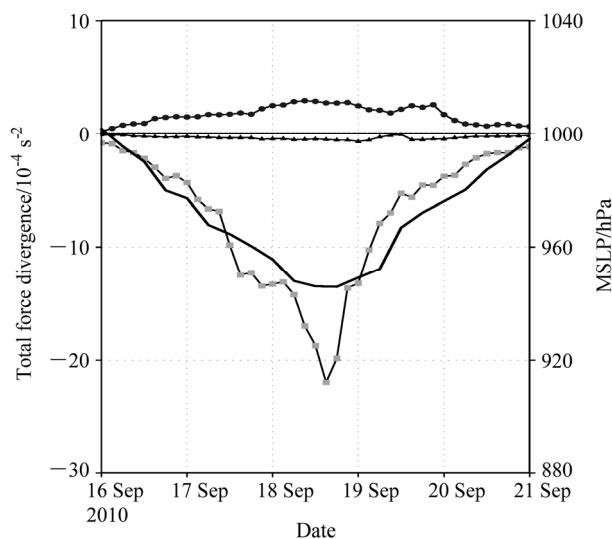


图 7 整个模拟时段（2010 年 9 月 16 日 00 时至 21 日 00 时）内“凡亚比”合力散度平均强度（单位： 10^{-4} s^{-2} ）及最低海平面气压（MSLP，单位：hPa）的时间演变（方块连线：合力辐合平均强度，圆点连线：合力辐散平均强度，三角连线：总的合力散度平均强度，黑色粗实线：最低海平面气压）

Fig. 7 Evolution of the averaged total force divergence and the minimum sea level pressure (MSLP) of Fanapi during 0000 UTC 16 Sep to 0000 UTC 21 Sep, 2010. Squares: the average intensity of total force convergence; dots: the average intensity of total force divergence; triangles: the average intensity of total force divergence and convergence; heavy black line: MSLP

系数高达 0.87 和 -0.91，均通过 0.01 信度检验，合力辐合平均强度的演变可以很好地反映“凡亚比”的强度演变。

6 结论

从合力散度方程出发，利用经过对比验证的高分辨率模拟资料，对 2010 年超强台风“凡亚比”生命史中整层垂直积分的合力散度分布及其演变特征进行了诊断分析，得到以下主要结论：

(1) 与台风环流相伴随的明显的合力辐合区首先出现，主要集中在台风中心附近区域，并且在整个模拟时段内一直维持；辐散区位于其外围。

(2) “凡亚比”在海上发展到鼎盛阶段时，其环流中心附近合力辐合区呈半径约为 150 km 的近似圆形分布，台风中心附近强度最大，向外逐渐减弱。辐散区在其外围呈较为对称的环状分布，台风成熟期和鼎盛期呈现出较明显的类似台风螺旋云雨带形式的分布特征。

(3) 台风登陆后，由于下垫面地形影响，台风中心的与合力辐合极值区发生偏离，辐合区与辐散

区的对称结构均被破坏, 尤其是台风环流中心外围受到复杂下垫面影响, 呈现出众多散乱的、更小尺度的辐合辐散特征, 合力状况变得极不均匀。随着台风登陆后强度不断减弱, 合力散度的异常信号迅速减弱甚至消失。

(4) 整个模拟时段内, “凡亚比”合力辐合的平均强度大于辐散强度, 前者与台风强度有十分显著的相关关系, 可以较好地反映台风强度变化趋势。

综上, 本文运用合力散度分析方法, 从全新的角度诊断分析了“凡亚比”台风的强度、结构发展演变过程。在此基础上, 我们将进一步对合力散度分布成因展开细致分析, 并通过提高资料的分辨率, 更深入地研究 TC 的内部受力结构。

参考文献 (References)

- Anthes R A. 1972. Development of asymmetries in a three-dimensional numerical model of the tropical cyclone [J]. Mon. Wea. Rev., 100 (6): 461–476.
- Carr III L E, Elsberry R L. 1997. Models of tropical cyclone wind distribution and beta-effect propagation for application to tropical cyclone track forecasting [J]. Mon. Wea. Rev., 125 (12): 3190–3209.
- Chan J C L, Gray W M. 1982. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (10): 1354–1374.
- Chan J C L, Williams R T. 1987. Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part I: Zero mean flow [J]. J. Atmos. Sci., 44 (9): 1257–1265.
- Chang S W J. 1981. The impact of satellite-sensed winds on intensity forecasts of tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 539–553.
- Chang S W J. 1982. The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 110: 1255–1270.
- 陈德辉, 薛纪善. 2004. 数值天气预报业务模式现状与展望 [J]. 气象学报, 62 (5): 623–633. Chen D H, Xue J S. 2004. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models [J]. Acta Meteor. Sin. (in Chinese), 62 (5): 623–633.
- 陈联寿. 2006. 热带气旋研究和业务预报技术的发展 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 672–681. Chen Lianshou. 2006. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 672–681.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. 大气科学, 25 (3): 420–432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3): 420–432.
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. 气象学报, 62 (5): 541–549. Chen Lianshou, Luo Zhixian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 541–549.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Adv. Atmos. Sci., 27 (5): 967–976.
- 陈联寿, 徐祥德, 解以扬, 等. 1997. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应 [J]. 大气科学, 21 (1): 83–90. Chen L S, Xu X D, Xie Y Y, et al. 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 21 (1): 83–90.
- 程正泉, 陈联寿, 刘燕, 等. 2007. 1960–2003 年我国热带气旋降水的时空分布特征 [J]. 应用气象学报, 18 (4): 427–434. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Liu Yan, et al. 2007. The spatial and temporal characteristics of tropical cyclone induced rainfall in China during 1960–2003 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 18 (4): 427–434.
- Fiorino M, Elsberry R L. 1989. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion [J]. J. Atmos. Sci., 46: 975–990.
- 高守亭, 邓涤菲, 周玉淑. 2011. 加速度迁移项散度在涡旋系统动力识别上的初步应用 [J]. 地球物理学报, 54 (4): 875–885. Gao S T, Deng D F, Zhou Y S. 2011. The effect of the divergence of relocation term in acceleration and its application to the dynamic identification of vortex system [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2011, 54 (4): 875–885.
- Holland G J. 1983. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect [J]. J. Atmos. Sci., 40 (2): 328–342.
- 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 2007. 台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验. 大气科学, 31 (2): 233–244. Ji C X, Xue G Y, Zhao F, et al. 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Rananim during landfall [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31 (2): 233–244.
- Kasahara A. 1961. A numerical experiment on the development of a tropical cyclone [J]. J. Meteor., 18 (3): 259–282.
- Kurihara Y, Tuleya R E. 1974. Structure of a tropical cyclone developed in a three-dimensional numerical simulation model [J]. J. Atmos. Sci., 31 (4): 893–919.
- Liang X D, Chan J C L. 2005. The effects of the full Coriolis force on the structure and motion of a tropical cyclone. Part I: Effects due to vertical motion [J]. J. Atmos. Sci., 62 (10): 3825–3830.
- 刘海军, 沈新勇, 许变, 等. 2013. 1011 号台风“凡亚比”登陆过程数值模拟及诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 583–594. Liu H J, Shen X Y, Xu L, et al. 2013. Numerical simulation and diagnostic analysis of the landfalling process of typhoon Fanapi (1011) [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 583–594. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11195.
- Liu Y, Zhang D L, Yau M K. 1997. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification [J]. Mon. Wea. Rev., 125 (12): 3073–3093.
- Liu Y, Zhang D L, Yau M K. 1999. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part II: Kinematics and inner-core structures [J]. Mon. Wea. Rev., 127 (11): 2597–2616.
- 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 2005. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验 [J]. 气象学报, 63 (1): 57–68. Niu X X, Du H L, Liu J Y. 2005. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoons Sinlaku (0216) [J]. Acta Meteor. Sin. (in Chinese), 63 (1): 57–68.

- Chinese), 63 (1): 57–68.
- Ooyama K. 1969. Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 26 (1): 3–40.
- Peng M S, Jeng B F, Williams R T. 1999. A numerical study on tropical cyclone intensification. Part I: Beta effect and mean flow effect [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (10): 1404–1423.
- 沈桐立, 葛孝贞, 陆维松, 等. 2003. 数值天气预报 [M]. 北京: 气象出版社, 471pp.
- Shen T L, Ge X Z, Lu W S, et al. 2003. Numerical Weather Prediction (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 471pp.
- 寿绍文, 励申申, 寿亦萱, 等. 2009. 中尺度大气动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 385pp.
- Shou S W, Li S S, Shou Y X, et al. 2009. Mesoscale Atmospheric Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 385pp.
- Tuleya R E, Kurihara Y. 1978. A numerical simulation of the landfall of tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35 (2): 242–257.
- Wu C C, Yen T H, Kuo Y H, et al. 2002. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect [J]. *Wea. Forecasting*, 17 (5): 1001–1015.
- Zhang D L, Bao N. 1996. Oceanic cyclogenesis as induced by a mesoscale convective system moving offshore. Part I: A 90-h real-data simulation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124: 1449–1469.
- 张福青, 蒋全荣, 党人庆. 1996. 8805号登陆台风特大暴雨的数值模拟 [J]. *热带气象学报*, 12 (3): 257–264.
- Zhang F Q, Jiang Q R, Dang R Q. 1996. Numerical simulation of the 8805 landing typhoon (Warren) and its unusually heavy rain [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 12: 257–264.
- 周冠博, 崔晓鹏, 高守亭. 2012. 台风“凤凰”登陆过程的高分辨率数值模拟及其降水的诊断分析 [J]. *大气科学*, 36 (1): 23–34.
- Zhou G B, Cui X P, Gao S T. 2012. The high-resolution numerical simulation and diagnostic analysis of the landfall process of typhoon “Fungwong” [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 36 (1): 23–34.