

许变, 崔晓鹏, 高守亭, 等. 2016. 登陆台风“凡亚比”(1011)合力散度特征诊断研究——垂直分布特征 [J]. 大气科学, 40 (5): 920–932. Xu Luan, Cui Xiaopeng, Gao Shouting, et al. 2016. Diagnostic analysis of characteristics of vertical distribution of total force divergence for the landfalling typhoon Fanapi (1011) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 920–932, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15152.

登陆台风“凡亚比”(1011)合力散度特征诊断研究 ——垂直分布特征

许变^{1,2,3} 崔晓鹏³ 高守亭³ 任晨平⁴

¹ 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008

² 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

³ 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

⁴ 中国人民解放军 94936 部队气象科, 杭州 310021

摘 要 本文利用 2010 年 1011 号台风“凡亚比”登陆过程高分辨率数值模拟资料, 诊断分析了“凡亚比”台风环流合力散度的垂直分布及其演变特征。结果指出, 合力散度的显著区一直与台风系统相伴随, 可以有效地示踪热带气旋 (Tropical Cyclone, 简称 TC) 的移动, 并能较好地识别 TC 强度、结构的发展演变。台风中心偏东一侧流入层的合力散度异常信号首先出现并发展, 反映出环流的非对称特征。随着台风趋于成熟, 合力散度逐渐增强, 高度扩展, 对称性也逐渐增加; 台风中心上空为合力辐合, 外围为合力辐散, 垂直方向上合力辐合与辐散相间的结构对应上升运动极值区及强降水, 即对应台风眼墙位置。合力散度面积指数和强度指数的分析指出, 垂直方向上辐合与辐散面积指数负相关; 各层的合力辐合强度指数普遍大于辐散强度指数, 垂直方向上两强度指数呈显著的正相关关系; 结合面积指数与强度指数, 可知垂直方向上合力辐合与辐散此消彼长。运用合力散度方程对该垂直分布特征的成因展开分析, 发现风速 u 分量平流随经度变化项和风速 v 分量平流随纬度的变化项是 TC 眼区合力辐合部分的主要贡献项, 垂直运动项决定了 TC 眼墙的合力辐合与辐散相间的垂直分布特征。

关键词 台风 合力散度 垂直分布 模拟诊断

文章编号 1006-9895(2016)05-0920-13

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15152

Diagnostic Analysis of Characteristics of Vertical Distribution of Total Force Divergence for the Landfalling Typhoon Fanapi (1011)

XU Luan^{1,2,3}, CUI Xiaopeng³, GAO Shouting³, and REN Chenping⁴

¹ Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

收稿日期 2015-03-09; 网络预出版日期 2015-11-30

作者简介 许变, 女, 1986 年出生, 工程师, 主要从事灾害天气研究。E-mail: xuluan_new@126.com

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

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2015CB452804, 国家自然科学基金项目 41175056, 上海台风研究基金课题 2013ST01, 浙江省气象科技计划项目 2013ZD01, 浙江省科技计划项目 2014C33056, 中国气象局省级气象研究所科技创新发展项目 (台风强降水精细化预报和灾害风险评估), 气象灾害教育部重点实验室 (南京信息工程大学) 开放课题 KLME1407

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2015CB452804), National Natural Science Foundation of China (Grant 41175056), Shanghai Typhoon Research Foundation (Grant 2013ST01), Zhejiang Meteorological Science and Technology Project (Grant 2013ZD01), Science and Technology Project in Zhejiang Province (Grant 2014C33056), the Provincial Institute Science and Technology Innovation and Development Projects of China Meteorological Administration (Refined Prediction and Disaster Risk Assessment of Typhoon Rainstorm), Open Project of Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (Nanjing University of Information Science and Technology) (Grant KLME1407)

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

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

4 Meteorological Section, Troops 94936 of PLA, Hangzhou 310021

Abstract Diagnostic analysis is performed in this study to investigate the vertical distribution characteristics and evolution features of the total force divergence/convergence (hereafter TFDC) for the landfalling typhoon Fanapi (1011) based on high-resolution simulations and calculation of the TFDC equation. It is found that typhoon Fanapi is always accompanied by significant TFDC zone, which thereby is capable of tracking tropical cyclone (TC) movement and identifying the evolution of TC intensity and structure. The distinct TFDC signal first occurs within the inflow layer to the east of the TC center and grows rapidly, demonstrating the asymmetrical feature of TC circulation during its rapid intensification stage. As Fanapi further intensifies, the total force divergence and convergence increase and stretch vertically, and become more symmetric. The total force convergence zone is located above the TC center in the upper level while the total force divergence zone is found in the periphery of the TC. Their interface corresponds to the area of strong ascending motion and heavy precipitation, which actually indicates the position of the TC eyewall. Analyses of the TFDC area index and intensity index have revealed that in the vertical direction, the convergence area index is negatively correlated with the divergence area index, while the two intensity indices are significantly positively correlated. Generally, the convergence intensity index is larger than the divergence intensity index in each individual layer. Looking at the combination of area index and intensity index, it is clear that in the vertical, the total force is subjected to low-level convergence and upper level divergence, and vice versa. The formation of characteristic distribution of the TFDC is diagnosed Based on the TFDC equation. Results indicate that the partial derivatives of advection of wind component U with respect to longitude and that of wind component V with respect to latitude are two major terms contributing to the total force convergence inside the TC eyewall, and the vertical motion dominates the distribution of the total force convergence and divergence over the area of TC eyewall and its vicinity.

Keywords Typhoon, Total force divergence/convergence, Vertical distribution, Numerical diagnosis

1 引言

我国是世界上热带气旋 (tropical cyclone, 以下简称 TC) 登陆最多的国家之一 (陈联寿和孟智勇, 2001; 陈联寿等, 2004), 国土面积的 1/2 左右都会受到西北太平洋台风影响 (程正泉等, 2007), 台风带来的暴雨、大风和风暴潮等对国家经济和人民生命财产造成了巨大威胁, 对登陆台风的研究一直是气象学者最为关注的热点和难点问题之一。

随着观测手段和计算能力的不断提升, 台风相关研究取得了不少进展, 其中高分辨率数值模拟成为台风 (包括登陆台风) 研究不可或缺的重要手段之一 (Wu et al., 2002; 钮学新等, 2005; 冀春晓等, 2007; Cui and Xu, 2009; 周冠博等, 2012; 刘海军等, 2013; 许变等, 2013; Li and Pu, 2014; Wang, 2014)。经过不断努力, 台风路径的研究和预报水平不断提升, 对结构、强度以及风雨的理解和认识也进一步深入, 但涉及台风这样一个庞然大物的未解之谜仍然很多, 与之相关的预报仍是气象业务难点。大气运动学方程分析表明, 当空气质点受力不同时, 运动方式也不同, 台风同样受到各种

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, 以往的研究工作, 关于科氏力等单个作用力对台风影响的研究较多 (Carr and Elsberry, 1997; Peng et al., 1999; Liang and Chan, 2005), 而台风所受合力的相关研究很少。天气系统发展变化时, 合力不为零, 会出现合力的辐合和辐散 (高守亭等, 2011), 研究台风所受合力状况及其演变特征能够更好地理解台风的发展和演变过程。

本文所涉及的个例为 2010 年超强台风“凡亚比”, “凡亚比”带来的强降水给我国台湾、福建和广东等地造成严重灾害。刘海军等 (2012) (以下称研究 I) 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 (3 km)、长达 120 小时的数值模拟, 较好地再现了“凡亚比”台风的发展演变及两次登陆过程。许变等 (2014) (以下称研究 II) 利用此高分辨率模拟资料, 从整层垂直积分的合力散度分布特征及其演变的角度, 研究了“凡亚比”不同发展阶段台风环流系统的水平合力辐合、辐散特征, 其发展演变可以较好地反映出台风水平结构和强度的发展演变过程。本文将在以上

变特征, 过台风中心作合力散度的高度—经度垂直剖面, 并结合流场与降水的分布, 分析合力散度与 TC 结构、降水等的关系。

模拟起始时刻(16日00时), “凡亚比”强度为热带风暴, 其中心东侧对流层低层存在弱合力辐合区(图略)。16日03时(图2a), 台风中心附近地区上方为一致的上升运动区, 合力辐合强度加大(达到 $1.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$ 以上), 主要集中在1~2 km高度上, 增强的辐合中心下方出现极弱的合力辐散中心。06时(图2b), 模拟的“凡亚比”加强到强热带风暴等级, 合力辐合强度增大, 最强中心仍位于台风东侧1~2 km高度层内; 辐合范围显著扩展, 覆盖在台风中心上空, 伸展高度达5 km以上。合力辐散中心较上一时刻也明显增强(约一个量级), 该辐散中心从地面延伸至1 km高度附近, 从东侧嵌入强辐合中心下方。此时 TC 中心上空高层出现明显的下沉运动, 而两侧维持强烈的上升运动, 降水在 TC 中心两侧各有一个峰值。09时(图2c), 合力辐合区主要集中在台风中心上空4 km以下区域, 其东侧出现辐合区与辐散区相间的结构, 合力辐散区主要集中在2 km以下, 强度为 $2.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$ 。14~16 km的高层存在一个弱的合力辐散区与辐合区相间的分布结构。12时, 台风中心东侧的合力散度异常区发展迅速, 上下连为一体, 辐合与辐散强度相当, 均超过 $2.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$, 在水平方向和垂直方向上均呈正负相间分布(图略)。

16日15时(图2d), 合力散度分布最显著的区域仍位于台风中心东侧的眼墙上升运动区附近, 低层存在一对垂直分布的强合力散度中心, 其中辐散最强超过 $2.0 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$, 其上方的辐合中心强度也超过了 $1.6 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$, 伴随着合力散度异常信号的强烈发展, 这一区域降水突增, 6小时累计雨量超过200 mm, 而台风中心西侧低层此时开始出现弱的辐散区。这个阶段合力散度异常值区主要集中在台风中心附近及其东侧, 与降水分布特征相似, 显示出明显的非对称性结构特征。进一步分析该阶段的近地面风速分布(图略), 最大风速带也主要位于台风中心东侧, 对应近地面低层台风中心东侧的合力辐散区, 垂直方向上为合力辐合与辐散相间的分布特征。这种对应关系表明, 在“凡亚比”逐渐增强的过程中, 最大风速带的发展演变与合力散度的发展演变有一定联系。16日18时(图2e), 合力辐合区主要集中在台风中心上空, 达到13 km高度以

上, 辐合强度增大到 $8.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$ 以上。台风西侧的辐散区进一步发展起来, 强度超过 $2.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$, 垂直方向上开始建立起与台风东侧类似的分布结构, 台风对称性加强; 而原东侧对流层低层垂直分布的一对辐合辐散中心及其上空的合力散度中心强度均明显减弱; 从降水来看, 此时台风西侧降水强度加强, 而东侧略减弱。21时(图2f), 台风中心上空的合力辐合区域覆盖的经度范围有所扩大, 高度伸展到14 km以上; 极值中心位于2 km以下的边界层内、台风中心上方, 其东西两侧各有一个强合力辐散中心从底部嵌入, 此时台风西侧降水进一步加强(图2f), 东西两侧的垂直速度、降水及合力散度的分布都进一步趋向对称。

3.2.2 发展成熟及鼎盛阶段

17日03时, “凡亚比”加强为台风。高度—经度剖面图上, 此时“凡亚比”合力散度分布的对称性进一步增强, 台风中心上空合力辐合区的强度超过 $8.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$, 东西两侧的辐散区近似对称分布, 辐散强度与辐合相当(图3a)。06时, 辐合最强区域仍然集中在台风中心上方, 合力散度分布更加对称, 但与上一时刻相比, 辐散范围有所减小(图略)。09时较强辐散区位于台风西侧, 合力辐散区的非对称分布比较明显(图3b)。由于“凡亚比”维持气旋式旋转, 不同时刻所取的剖面是不同的, 因此合力散度对称性有所差异。12时, 最大风速带风速量值超过 35 m s^{-1} , 辐合强度继续增大, 最强超过 $1.2 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$ (图略)。

18日00时(图4a), “凡亚比”加强为超强台风, 合力散度异常信号达到16 km以上, 合力辐合区域仍集中在台风中心上空, 辐散区域较为对称地分布于其东西两侧。03时(图略), “凡亚比”的合力异常信号伸展高度继续维持, 纬向结构高度对称, 台风中心上空的辐合区强度超过 $1.2 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$ 。“凡亚比”继续增强, 18日06至09时, 最强辐合超过 $1.6 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$, 最强辐散超过 $8.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-6}$ 。由于 TC 中心东侧的大风区强于西侧, 东侧的辐散与辐合强度也略强, 但整体上, 合力散度的分布较为对称(图4b)。18日12时(图4c), “凡亚比”发展到最强阶段。台风中心上空2 km以下的区域, 东西两侧对称分布着各一对强辐合—辐散中心, 左侧辐合与辐散中心强度极值分别超过 $2.5 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$ 与 $1.6 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$, 右侧极值中心分别超过 $2.0 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$ 与 $1.2 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$, 该时刻的风速大值区呈较为对称的

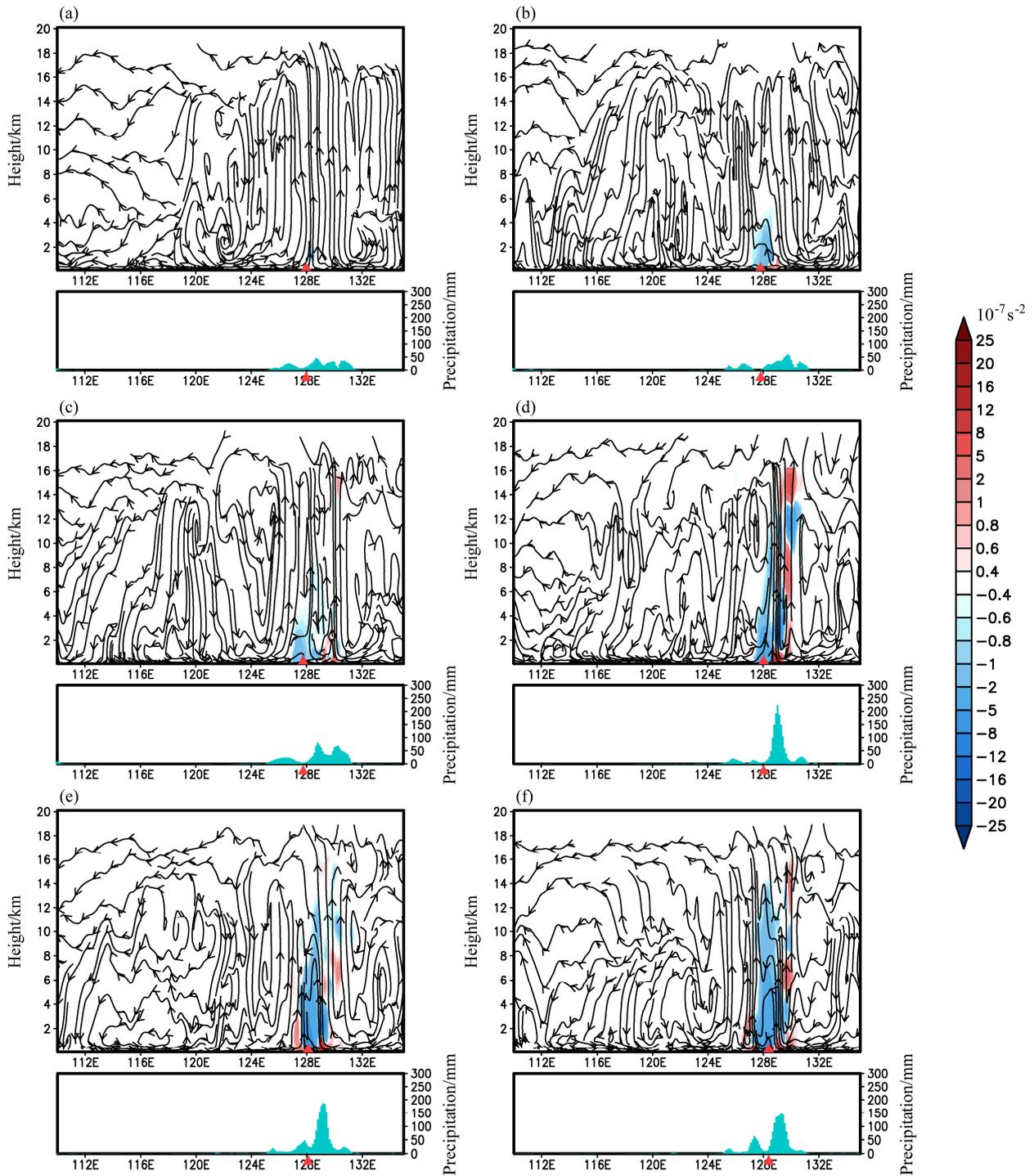


图2 2010年9月16日“凡亚比”快速增强阶段过台风中心的合力散度和流场的高度—经度剖面(上:蓝色阴影表示合力辐合,红色阴影表示合力辐散,单位: $10^{-7} s^{-2}$)以及当前时刻前三小时至后三小时的6小时累积降水(下:绿色柱状图,单位: mm,红色三角指示台风中心所在位置):(a) 16日03时;(b) 16日06时;(c) 16日09时;(d) 16日15时;(e) 16日18时;(f) 16日21时

Fig. 2 The height–longitude cross sections of total force divergence and streamlines across the TC center during the rapid intensification stage of typhoon Fanapi (upper panel, the blue shaded area indicates total force convergence, and the red indicates total force divergence, units: $10^{-7} s^{-2}$) and 6-hour accumulated precipitation during the period of three hours before and after the analysis time (lower panel, denoted by the green bars, units: mm). The red triangles mark the location of TC center at the analysis time. (a) 0300 UTC 16 Sep, (b) 0600 UTC 16 Sep, (c) 0900 UTC 16 Sep, (d) 1500 UTC 16 Sep, (e) 1800 UTC 16 Sep, (f) 2100 UTC 16 Sep

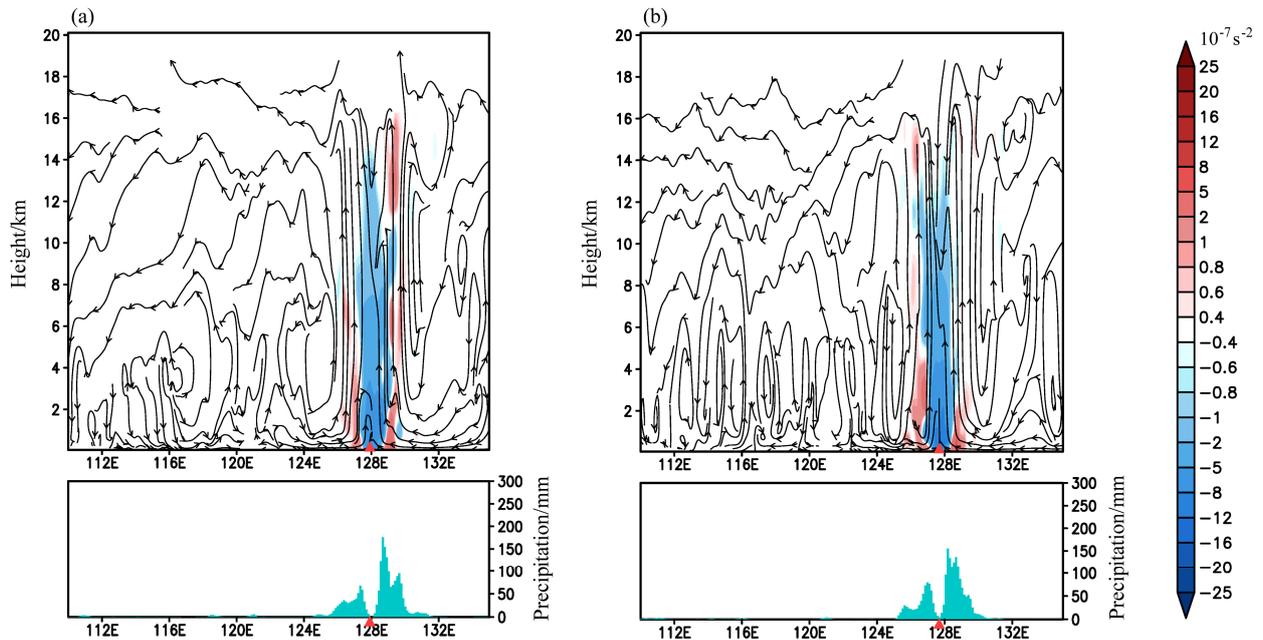


图3 同图2, 但为“凡亚比”发展成熟阶段过台风中心的合力散度和流场的高度—经度剖面: (a) 17日 03时; (b) 17日 09时
Fig. 3 Same as Fig.2, but for the mature stage of Fanapi: (a) 0300 UTC 17 Sep; (b) 0900 UTC 17 Sep

圆环状分布, 纬向合力散度分布也高度对称。18日 18时(图4d), 台风中心距离台湾岛约 200 km, 台风中心东侧风力强于西侧, 西侧低层垂直分布的一对强辐合—辐散中心明显减弱(向台风中心倒塌), 而东侧一对强辐合—辐散中心依然维持, 这与近地面风场和降水分布的变化特征相似。19日 00时(图4e), “凡亚比”登陆台湾前, 随着地形影响加大, TC 西侧中低层的合力辐散范围和强度逐渐减小; 东侧中低层垂直分布的强辐合—辐散中心结构也消散。

3.2.3 两次登陆阶段

19日 09时(图5a), 模拟的“凡亚比”登陆台湾, 其西侧的合力辐散信号大大削弱, 主要分布在 2 km 以下。东侧辐散区依然维持, 但强度普遍小于 $2.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$, 降水强度明显减弱。12时, 台风中心东侧有显著的合力辐合与辐散交汇处, 加之地形影响, 台湾东部 6 小时累积降水超过 250 mm(图5b)。之后的 12 小时(图5c、d), “凡亚比”上空 12 km 以下区域, 合力仍维持辐合特征; 合力辐散区主要集中在 TC 东侧, 上下贯穿的结构消失, 辐散区域逐渐缩小、分散, 强度也不断减弱。二次登陆我国福建后(图5e), 合力辐散信号近乎消失, 辐合区依然有明显信号存在, 但范围缩小, 强度减弱, 降水亦减弱。

综上, 由高度—经度垂直剖面上的合力散度分布及其演变可知, 合力散度大小, 尤其是合力辐合强度的演变与 TC 强度演变趋势十分一致; TC 眼区表现为合力辐合, 两侧合力辐合辐散相间的结构与强上升运动及降水峰值区相对应, 该处对应 TC 眼墙; 合力散度对称性的发展演变能够反映台风结构对称性的演变。整体上, 合力散度的强度、分布及其演变过程能很好地反映 TC 强度和结构特征的发展演变。

3.3 合力散度面积指数与强度指数分析

根据研究 II 对整层垂直积分的合力散度分布及其演变的分析可以得到合力辐合区与辐散区的大致范围, 即合力辐合区基本位于以 TC 中心为中心、150 km 为半径的圆域内, 辐散区主要位于辐合区外围至半径 300 km 的圆环区域内, 鉴于辐合与辐散区分界线并不容易确定, 我们将 300 km 半径范围内合力散度为正值的格点都计入辐散区。在这个划分基础上, 分别统计各个高度层上合力辐合(辐散)的格点数, 将其定义为合力辐合(辐散)的面积指数, 进一步分别求出各层平均的辐合(辐散)强度的绝对值, 定义为合力辐合(辐散)强度指数。

从 16日 03时至 19日 15时, 每隔 12 小时的合力散度面积指数和强度指数分布如图 6 所示。从垂直分布上看, 辐合强度指数由地面向上首先迅速

增大, 后又逐渐减小, 极大值均出现在 4 km 以下; 从时间演变上, 低层辐合强度指数逐渐增大, 于 18 日 15 时前后达到极大值, 随后逐渐减小, 与台风强度的演变趋势一致。辐散强度指数较辐合强度指数普遍偏小, 在“凡亚比”发展鼎盛时期, 约低一

个量级; 垂直变化也较小, 极大值基本出现在 2 km 以下; 14~16 km 的高层, 辐散强度指数出现一个较弱的峰值, 这里辐合强度指数较小, 甚至趋近于 0。以上分布特征是由于成熟台风流入层(一般定义为 3 km 以下区域, 陈联寿和丁一汇, 1979)的

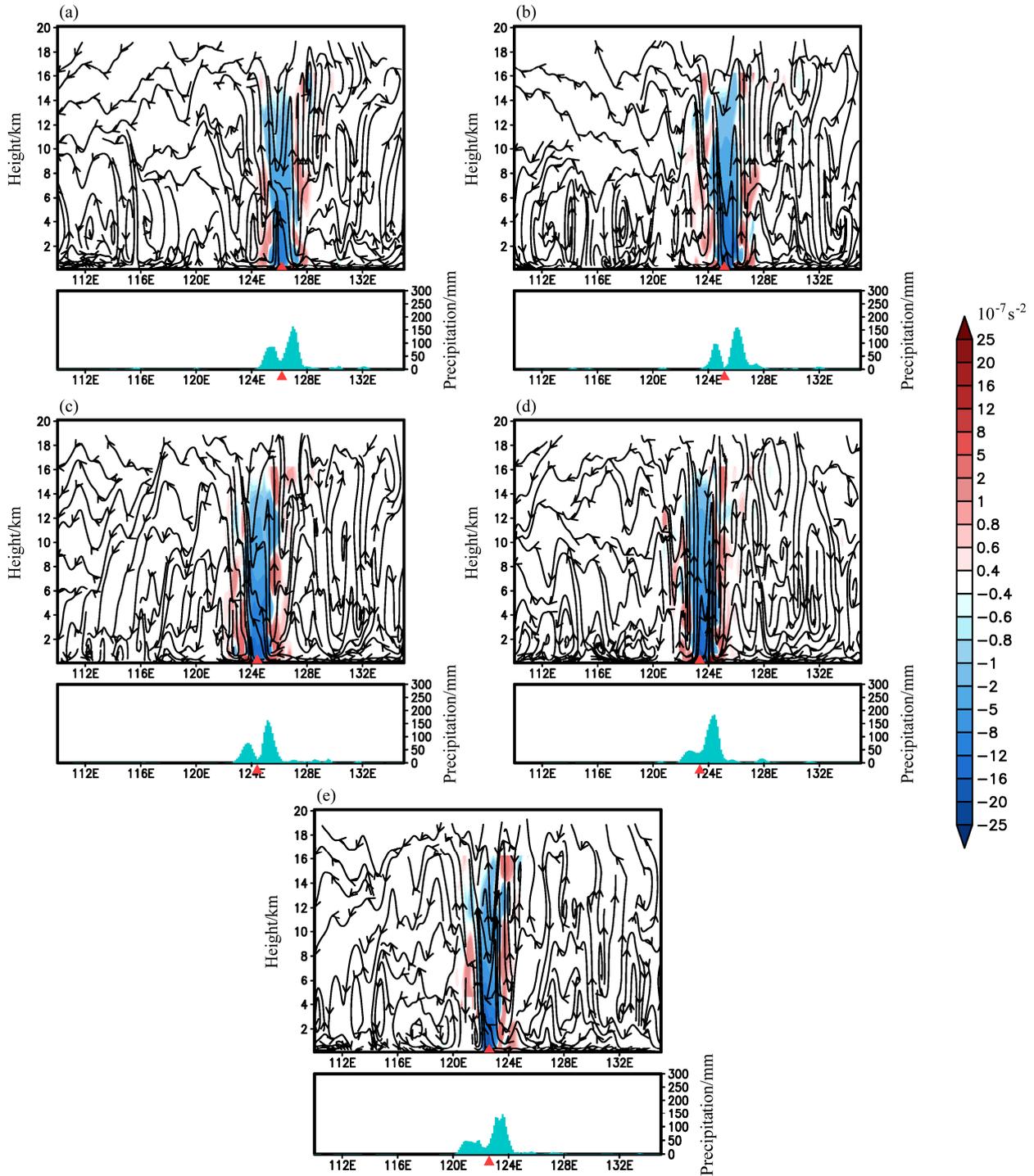


图4 同图2, 但为“凡亚比”鼎盛阶段过台风中心的合力散度和流场的高度—经度剖面: (a) 18日00时; (b) 18日06时; (c) 18日12时; (d) 18日18时; (e) 19日00时

Fig. 4 Same as Fig.2, but for the peak stage of Fanapi: (a) 0000 UTC 18 Sep; (b) 0600 UTC 18 Sep; (c) 1200 UTC 18 Sep; (d) 1800 UTC 18 Sep; (e) 0000 UTC 19 Sep

空气向中心有强烈的水平辐合运动。随着气块向台风中心运动，径向速度减小，而切向速度迅速增大，并做气旋式运动，所以在台风中心附近至大风区的流入层内，合力会发生强烈辐合，辐合强度指数也较大。外围气流在接近眼墙区域附近开始转为上升

气流，在低层尤其显著。从流入层向上，随着高度的升高，切向环流逐渐占据主要部分（图略），因此辐合强度指数不断减弱，14 km 以上区域辐合强度几乎为 0。时间演变上，辐合强度指数与“凡亚比”的强度演变呈现十分显著的正相关关系(图 6)。

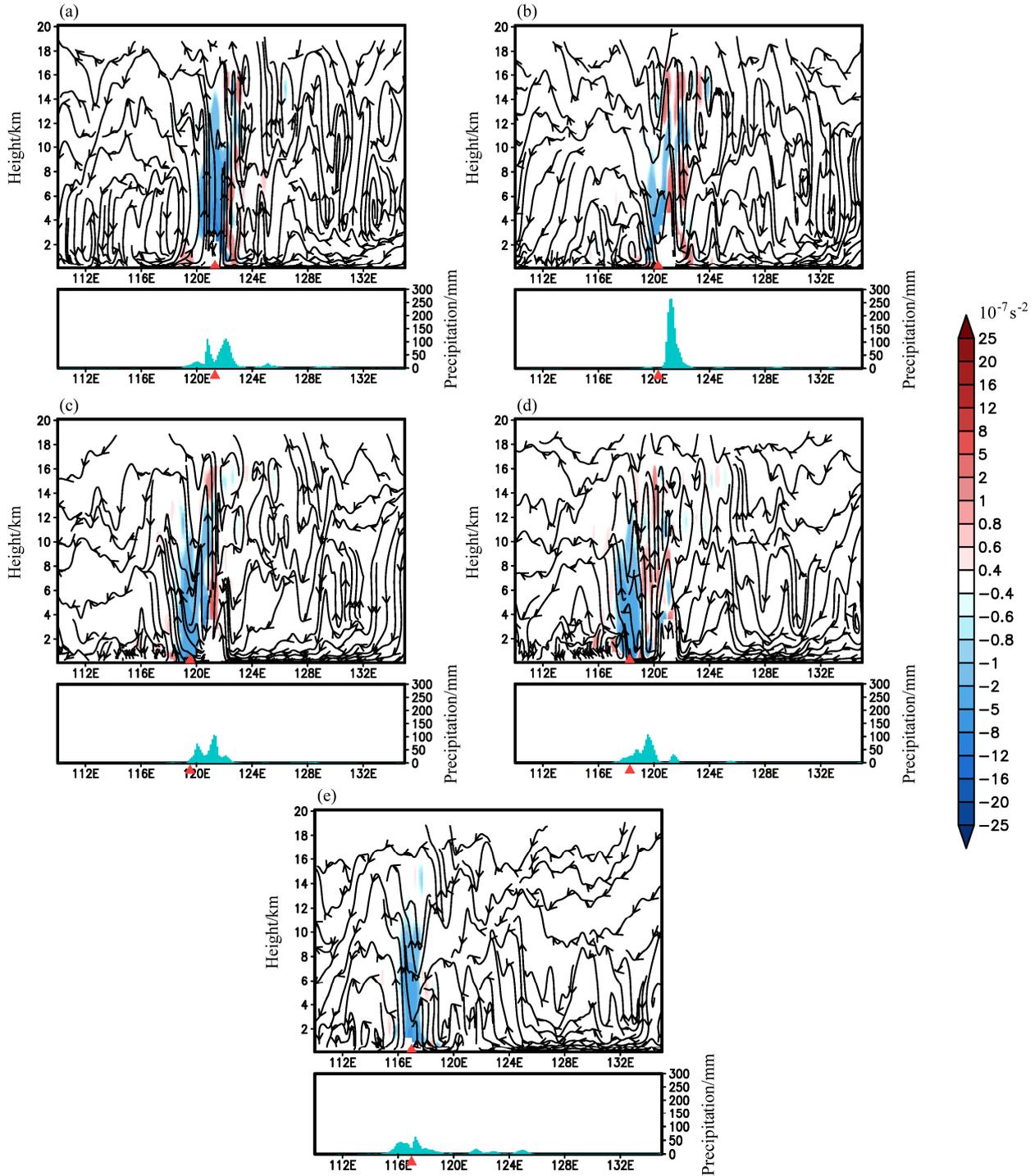


图 5 同图 2，但为“凡亚比”两次登陆阶段过台风中心的合力散度和流场的高度—经度剖面：(a)19 日 09 时；(b) 19 日 12 时；(c) 19 日 18 时；(d) 20 日 00 时；(e) 20 日 06 时

Fig. 5 Same as Fig.2, but for the two landfalling stages of Fanapi: (a) 0900 UTC 19 Sep; (b) 1200 UTC 19 Sep; (c) 1800 UTC 19 Sep; (d) 0000 UTC 20 Sep; (e) 0600 UTC 20 Sep

快速增强阶段至鼎盛阶段，“凡亚比”辐合强度指数极值逐渐增大，18日15时达到最大值，此时“凡亚比”为强台风，中心附近最大风速达到 44.5 m s^{-1} 。“凡亚比”首次登陆后强度减弱，辐合强度指数亦大大减小。辐合强度指数的变化可以为“凡亚比”强度演变提供一定参照。

根据前面的定义可知，在垂直方向上，辐合区与辐散区的面积指数为负相关关系；由图6可见，辐散面积指数及其变化普遍大于辐合面积指数。成熟阶段的“凡亚比”低层辐合面积指数较小，向上有增大的趋势，中高层达到最大，14 km以上又开始减小。这与图3和图4上合力散度的分布特征大致相符。此外，台风眼墙在约5 km以上高度呈漏

斗状分布 (Aberson et al., 2006)，而眼墙以内区域表现为合力辐合，这也可以部分解释合力辐合面积指数随高度升高有增大的趋势。

强度指数方面，“凡亚比”生命史中，快速增强阶段及TC中心位于台湾岛地形上空期间，合力辐合强度指数与辐散强度指数相关系数略低，其余时段相关系数在0.40~0.90之间，通过0.01信度检验，表明垂直分布上合力辐合与辐散强度呈显著的正相关关系；结合面积指数为负相关，可见在垂直方向上合力辐合与辐散此消彼长。根据前期研究指出，台风系统整体维持弱合力辐合状态，即台风系统为合力的汇，合力散度不为零，台风系统才能不断发展变化。

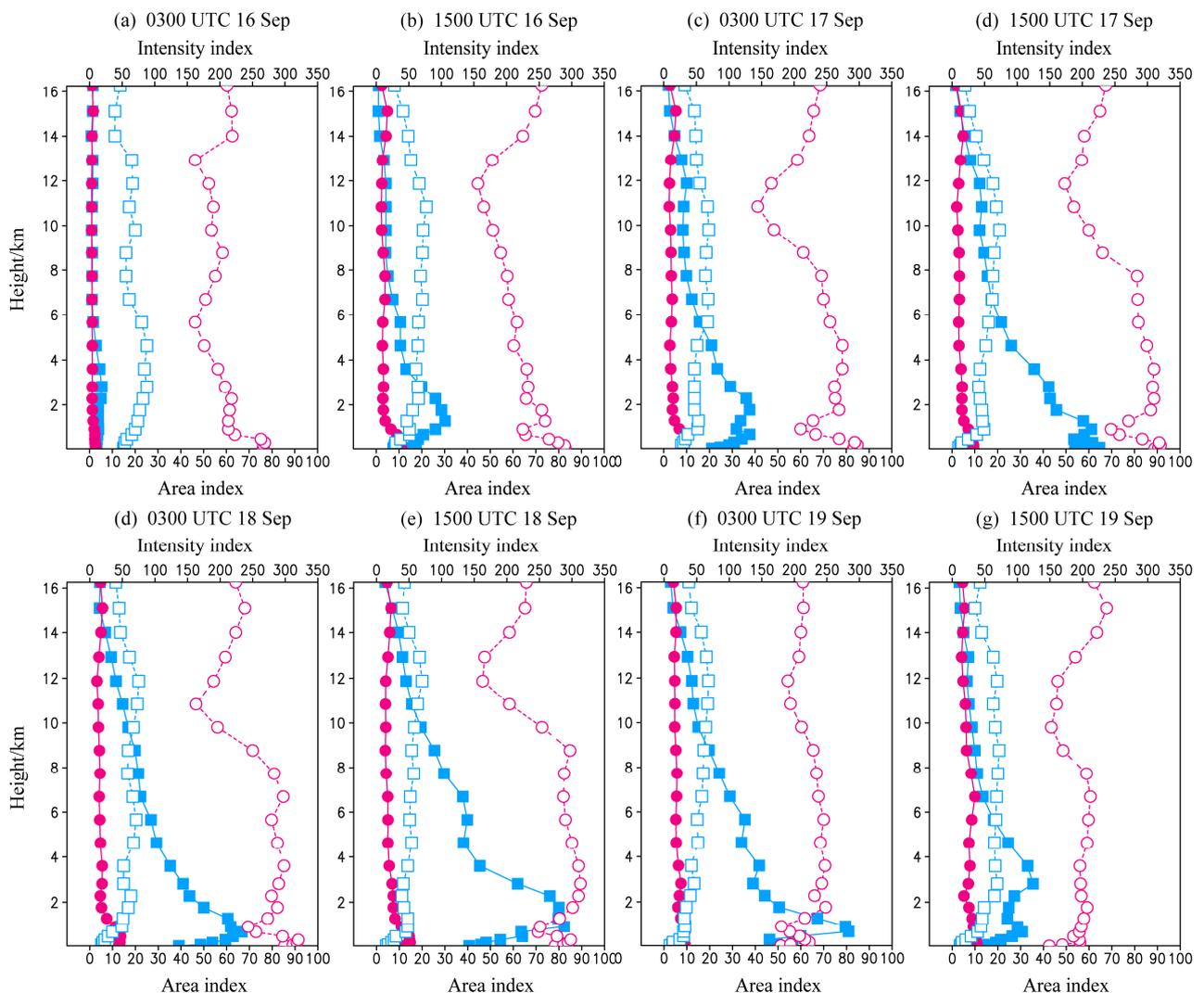


图6 2010年9月16日03时至19日15时每隔12小时的合力辐合强度指数（灰色实心方块）、辐散强度指数（黑色实心圆点），以及辐合面积指数（空心方块）、辐散面积指数（空心圆点）。上方横坐标表示强度指数（单位： 10^{-8} s^{-2} ），下方横坐标表示面积指数（即统计区域内格点的个数）

Fig. 6 The total force convergence intensity index (grey closed square), divergence intensity index (black closed circle), convergence area index (open square), and divergence area index (open circle) at 12 h interval from 0300 UTC 16 to 1500 UTC 19 Sep 2010. The upper x-axis refers to the intensity index (units: 10^{-8} s^{-2}), and the lower x-axis refers to the area index

3.4 “凡亚比”合力散度垂直分布特征成因分析

研究 II 和本文前述内容已经利用模拟资料对“凡亚比”生命史中整层垂直积分以及垂直剖面上的合力散度特征进行了较详细的阐述，下面针对合力散度分布特征的成因开展进一步深入分析。

合力散度方程 [(1) 式] 的四项分别为：(A) 三维风矢量散度的时间偏导项，(B) 风速 u 分量平流随经度 (x) 的变化项，(C) 风速 v 分量平流随纬度 (y) 的变化项，(D) w 分量平流随高度 (z) 的变化项。在高度—经度垂直剖面图上，A 项的显著区首先在 TC 东侧出现，之后向西侧扩展，与合力散度自东向西的发展过程相似；其正负值区呈东西向相间分布，与合力散度的正负值区没有明显的对应关系 (图略)。从量级上看，B, C, D 三项量级相同，A 项小一个量级，因此该项可略去不计。

选取“凡亚比”鼎盛时期的 18 日 12 时，来分析较为理想状态 (结构较为对称) 下的合力分布情况。TC 眼区 B、C 两项均为负值区，是合力辐合的主要组成部分 (图 7)。B 项的纬向分布与合力散度

的分布大致相同，中间为负值区，两侧为正值区，且辐散与辐合强度相当，为 10^{-7}s^{-2} 量级 (图 7a)。B 项的经向分布主要为合力辐合，台风中心上空为较强合力辐合区，随高度逐渐减小，并向南北两侧逐渐减弱 (图 7b)。C 项为 v 分量平流随纬度的变化项，在纬向剖面图上主要表现为合力辐合，外围辐散区微弱 (图 7c)；在经向剖面图上则显示台风中心上空为较强合力辐合区，南北为合力辐散区 (图 7d)。B、C 两项量级相同，二者叠加使得 TC 眼区维持较强的合力辐合；两项在眼墙及其外围区域符号相反，量级相当，部分相互抵消，导致该区域合力散度较弱。

D 项在台风中心上空没有明显的异常值分布，其强信号区主要位于 TC 眼墙附近 (图 8)，强度显著大于该区域的 B、C 两项之和，约高出一个量级，因此眼墙区的合力散度分布主要由 D 项决定。垂直结构上，D 项呈正负相间分布，边界层为较强的正值区，对应的合力有较强的辐散；流场上，边界层内水平风的剧烈辐合，引发强上升运动，垂直速度

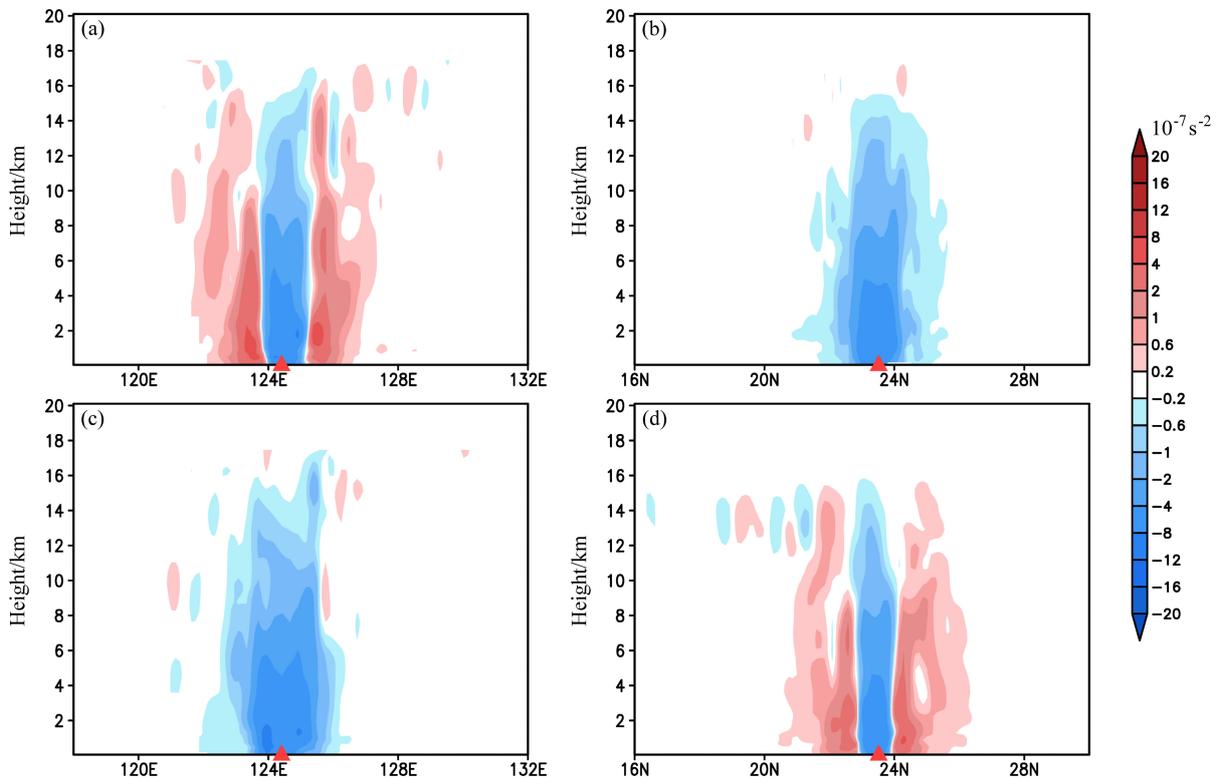


图 7 2010 年 9 月 18 日 12 时 B、C 项过台风中心的垂直剖面：(a) B 项的高度—经度剖面；(b) B 项的高度—纬度剖面；(c) C 项的高度—经度剖面；(d) C 项的高度—纬度剖面。蓝色为合力辐合区，红色为辐散区；单位： 10^{-7}s^{-2} ；红色三角指示台风中心所在位置

Fig. 7 The vertical cross sections across the center of Fanapi at 1200 UTC 18 Sep 2010: (a) The height–longitude cross section of term B; (b) the height–latitude cross section of term B; (c) the height–longitude cross section of term C; (d) the height–latitude cross section of term C. The blue shaded areas indicate total force convergence areas, and the red indicate divergence areas; units: 10^{-7}s^{-2} ; the red triangle marks the location of TC center at the analysis time

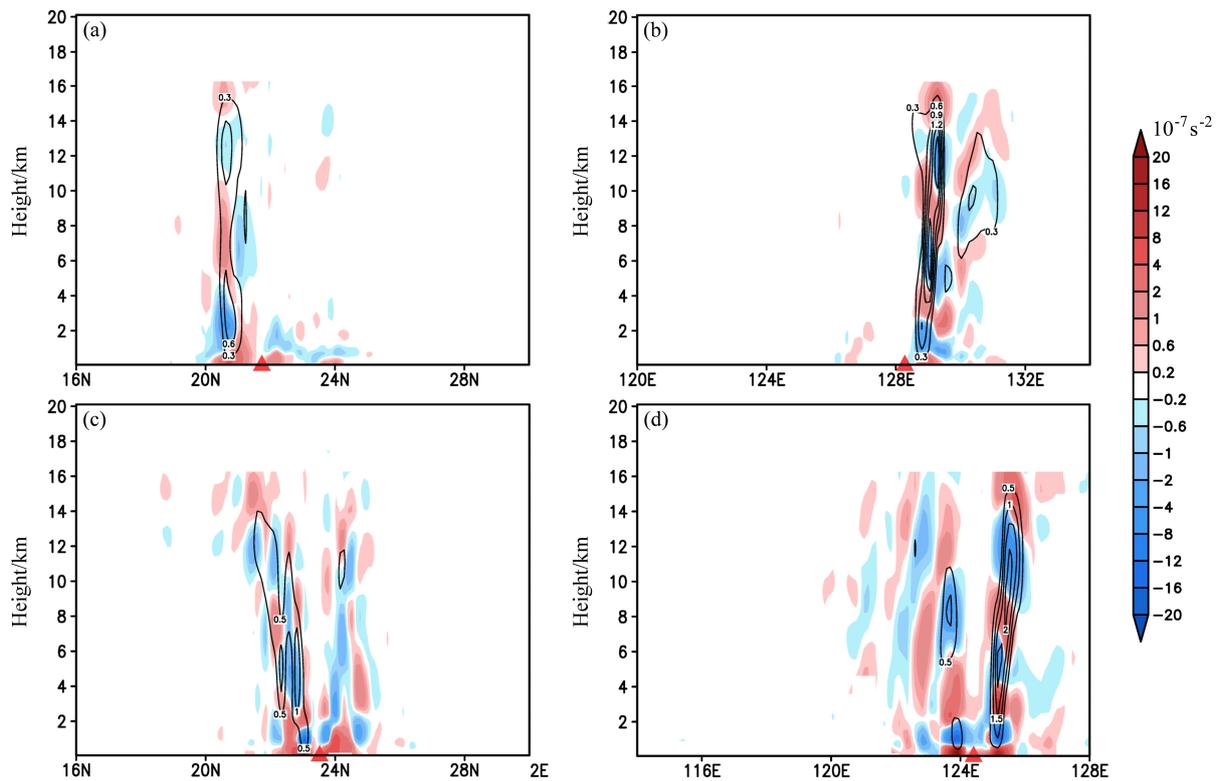


图 8 2010 年 9 月 16 日和 18 日过台风中心的 D 项的垂直分布 (蓝色阴影为合力辐合, 红色为合力辐散, 单位: 10^{-7}s^{-2}) 及垂直速度 (等值线, 单位: m s^{-1}): (a) 16 日 12 时的高度—经度剖面; (b) 16 日 12 时的高度—纬度剖面; (c) 18 日 12 时的高度—经度剖面; (d) 18 日 12 时的高度—纬度剖面。红色三角指示台风中心所在位置

Fig. 8 The vertical cross sections of term D (the blue shaded areas indicate the total force convergence areas, and the red indicate divergence areas; units: 10^{-7}s^{-2}) and the vertical velocity (contour, units: m s^{-1}) across the center of Fanapi: (a) The height–longitude cross section at 1200 UTC 16 Sep 2010; (b) the height–latitude cross section at 1200 UTC 16 Sep 2010; (c) the height–longitude cross section at 1200 UTC 18 Sep 2010; (d) the height–latitude cross section at 1200 UTC 18 Sep 2010. The red triangle marks the location of TC center at each specific time

陡增导致合力散度信号十分显著, 垂直运动与合力散度大值区十分吻合。从时间演变上来看, 垂直运动首先由台风中心的东南侧发展起来, 与合力散度大值区高度一致 (图 8a、b)。随着“凡亚比”不断发展增强, 台风中心南北及东西两侧的合力散度大值区趋于对称分布; 在垂直方向上, 眼墙区及其外围合力辐合与辐散的相间结构也愈加显著 (图 8c、d)

纵观“凡亚比”的整个模拟时段, 垂直方向上合力散度的正负相间结构能够很好地反映出垂直运动的发展旺盛程度及垂直速度分布情况, 其中 D 项负值区往往对应上升运动极值区, 垂直速度加速区与减速区均表现为合力辐散 (图 8)。这是由于眼墙区的垂直速度在水平方向上为极大值, $\partial w/\partial x$ 与 $\partial w/\partial y$ 趋于 0, D 项的主要部分为 $\partial[w(\partial w/\partial z)]/\partial z$ 。眼墙区 $w > 0$, 垂直方向上, 分布有若干个 w 的极值中心, 极值中心的下方为上升加速区,

$\partial w/\partial z > 0$, 其上方为上升减速区, $\partial w/\partial z < 0$, 因此在 w 极值中心附近, $D \approx \partial[w(\partial w/\partial z)]/\partial z < 0$, 表现为合力辐合。同理可以推出, 上升运动极值区之间, 为合力辐散区。

由以上分析可知, 合力散度表达式中, A 项量级较小, 对合力散度的贡献也较小。B、C、D 三项量级较大, 是合力散度的主要组成部分, 共同决定了合力散度的最主要分布和演变特征。其中 TC 眼区的合力辐合部分主要由 B、C 两项贡献, 眼区向外, 二者符号相反, 部分互相抵消。TC 眼墙附近的合力散度分布主要由垂直运动项, 即 D 项决定, 外围的合力散度分布由 B、C、D 三项共同组成。

4 结论和讨论

从合力散度方程出发, 利用研究 I 中经过对比验证的模拟资料, 在研究 II 的基础上进一步对 2010 年超强台风“凡亚比”生命史中合力散度的垂直分

布及其演变特征、成因等进行了诊断分析, 得到以下主要结论:

(1) 合力散度的强度、分布及其发展演变能够反映台风强度、结构的演变。TC 中心偏东一侧流入层的合力散度异常信号首先出现并迅速发展, 伴随垂直运动的迅速增强和降水的激增, 反映出快速增强阶段台风环流的非对称特征。

随着 TC 趋于成熟, 合力散度信号也不断增强、高度扩展、对称性增加, TC 中心上空为合力辐合区, 其外围为合力辐散区, 交界区域在垂直方向上多呈辐散辐合相间结构。“凡亚比”鼎盛时期的合力散度大值区接近甚至超过 16 km 高度, 对称性较高。通过与流场和降水的对比发现, 合力辐合与辐散交界区对应着强上升运动与强降水, 能较好地指示台风眼墙的位置。

(2) 定义了合力散度面积指数和强度指数, 根据定义, 辐合区与辐散区面积指数在垂直方向上为负相关关系, 分析发现辐散面积指数及其变化普遍大于辐合面积指数; 合力辐合的强度指数普遍强于辐散强度指数, 极值位于低层, 并随高度升高逐渐减小; 垂直分布上, 两强度指数呈显著的正相关关系。台风系统整体表现为合力辐合, 从台风系统所受合力的角度揭示了其发展变化的原因。

(3) 运用合力散度方程对合力散度垂直分布特征的成因展开分析, 发现方程中的两个水平风速变化项是 TC 眼区合力辐合部分的主要贡献项, 垂直运动项决定了 TC 眼墙区的合力散度分布特征。

通过以上分析可知, 在“凡亚比”生命史中, 合力散度的显著区一直与台风系统相伴随, 可以有效地示踪 TC 的移动, 并能较好地识别 TC 强度、结构的发展演变。同时, 合力辐合、辐散也是台风系统维持运动和发展变化的动力条件之一, 只有合力散度不为零, TC 才能产生变化。究其本质, 是因为对于中小尺度天气系统而言, 风场信息比气压场信息更为重要, 抓住风场的异常信号能够更加有效地追踪中小尺度系统的发生发展。合力散度能够全面反映三维风场的特征, 因此在中小尺度系统的相关研究中有较为广阔的应用前景。

本文仅针对“凡亚比”(1011) 的合力散度垂直分布特征展开分析, 由于合力散度的分布、强度及其发展演变与台风风场结构的发展演变密切相关, 因此, 对于不同个例, 其演变过程可能会有较大差异。当台风结构因受到不同因素(如中小尺度

涡旋、中纬度环流系统、地形等) 的影响而发生变化时, 合力散度分布及强度会表现出不同的变化特征。但当台风发展至结构近似对称时, 不同个例的合力散度特征应较为相似。另外, 对于较为特殊的双眼墙台风, 其双眼墙的形成、合并或更替过程中的合力散度特征与单眼墙台风必然存在显著差异, 值得深入探讨。

参考文献 (References)

- Aberson S D, Black M L, Black R A, et al. 2006. Thirty years of tropical cyclone research with the NOAA P-3 aircraft [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87 (8): 1039–1055, doi:10.1175/BAMS-87-8-1039.
- Carr 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, doi:10.1175/1520-0493(1997)125<3190:MOTCWD>2.0.CO;2.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社.
- Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoons (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 25 (3): 420–432, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.11.
- 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 Zhexian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 541–549, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.05.003.
- 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, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.04.002.
- Cui X P, Xu F W. 2009. A cloud-resolving modeling study of surface rainfall processes associated with landfalling typhoon Kaemi (2006) [J]. *J. Trop. Meteor.*, 15 (2), 181–191, doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2009.02.007.
- 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*, 2011, 54 (4): 875–885. Gao Shouting, Deng Difei, Zhou Yushu. 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)*, 54 (4): 875–885, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.001.
- 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): 233–244. 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31 (2): 233–244, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.05.
- Li Z, Pu Z X. 2014. Numerical simulations of the genesis of typhoon Nuri

- (2008): Sensitivity to initial conditions and implications for the roles of intense convection and moisture conditions [J]. *Wea. Forecasting*, 29 (6): 1402–1424, doi:10.1175/WAF-D-14-00003.1.
- 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, doi:10.1175/JAS3545.1.
- 刘海军, 沈新勇, 许雯, 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 Haijun, Shen Xinyong, Xu Luan, et al. 2013. Numerical simulation and diagnostic analysis of landfall processes of typhoon Fanapi (1011) [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 18 (5): 583–594, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11195.
- 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 Xuexin, Du Huiliang, Liu Jianyong. 2005. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoons Sinlaku (0216) [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63 (1): 57–68, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.01.007.
- 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, doi:10.1175/1520-0469(1999)056<1404:ANSOTC>2.0.CO;2.
- Wang Z. 2014. Role of cumulus congestus in tropical cyclone formation in a high-resolution numerical model simulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71 (5): 1681–1700, doi:10.1175/JAS-D-13-0257.1.
- 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, doi:10.1175/1520-0434(2003)017<1001:RSAWTH>2.0.CO;2.
- 许雯, 何金海, 高守亭, 等. 2013. 集合动力因子对登陆台风“莫拉克”(0908)暴雨落区的诊断与预报研究 [J]. *大气科学*, 37 (1): 23–35. Xu Luan, He Jinhai, Gao Shouting, et al. 2013. Diagnostic and predictive studies of torrential rain location associated with landfalling typhoon Morakot (0908) using multi-dynamical parameters [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (1): 23–35, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11156.
- 许雯, 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. 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 38 (1): 110–120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12175.
- 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 Guanbo, Cui Xiaopeng, Gao Shouting. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.03.