

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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11195. Liu Haijun, Shen Xinyong, Xu Luan, et al. 2013. Numerical simulation and diagnostic analysis of landfall processes of typhoon Fanapi (1011) [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 583–594.

1011 号台风“凡亚比”登陆过程数值模拟及诊断分析

刘海军^{1,2} 沈新勇¹ 许变^{1,2} 冉令坤² 崔晓鹏²

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

摘 要 利用中尺度非静力数值模式 WRF V3.2.1 对“凡亚比”台风 (1011) 的登陆过程开展了高分辨率数值模拟, 模拟采用三重嵌套, 最高分辨率为 3 km, 共积分 120 h (5 d)。利用收集到的观测资料对模式模拟的结果进行了较细致的对比验证。结果表明, 模式较好地模拟再现了“凡亚比”台风的发展演变以及两次登陆过程, 模拟的台风路径与观测路径较为一致, 模式也较好地把握住了“凡亚比”台风的强度演变过程, 模拟取得了初步的成功。进一步利用高分辨率模拟资料对此次台风登陆过程的强降水开展了初步诊断分析, 结果表明, 在整个研究时段内, 散度垂直通量绝对值的垂直积分 $\langle |Q| \rangle$ 与地面降水区有很好的对应, 两者在空间分布和时间演变上比较一致, 在降水大的区域 $\langle |Q| \rangle$ 的值也大, 这表明 $\langle |Q| \rangle$ 对“凡亚比”台风强降水具有较好的诊断和指示意义。

关键词 台风 登陆 强降水 高分辨率数值模拟 散度垂直通量

文章编号 1006–9585 (2013) 05–0583–12

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11195

Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of Landfall Processes of Typhoon Fanapi (1011)

LIU Haijun^{1,2}, SHEN Xinyong¹, XU Luan^{1,2}, RAN Lingkun², and CUI Xiaopeng²

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

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

Abstract Typhoon Fanapi, a super typhoon that generated over the Northwest Pacific and the South China Sea in 2010, is the only typhoon to make landfall twice in China. Intense precipitation brought by Fanapi caused severe damages in Taiwan and in Fujian and Guangdong provinces. In this study, the Weather Research and Forecasting (WRF) model is used to simulate typhoon Fanapi at high resolution (finest grid size of 3 km) with three nests for 120 hours. Detailed comparisons are obtained between observations and the simulation. The results show that the simulation reproduced the development, evolution, and twice-landfalling processes of typhoon Fanapi to a significant degree. The simulated track and intensity evolution are shown to be rather similar to those of observations. Furthermore, the high-resolution simulation data is used to perform diagnostic analysis on the heavy rainfall occurring with typhoon Fanapi. Results indicate that the $\langle |Q| \rangle$ parameter agrees fairly well with observed precipitation in spatial distribution and time evolution. This parameter shows strong signals over the heavy rainfall region and weak or no signals over other regions; therefore,

收稿日期 2011–12–13 收到, 2013–04–28 收到修定稿

资助课题 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、41075039, 国家自然科学基金海峡两岸合作研究项目 40921160379

作者简介 刘海军, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 研究方向为台风动力学及数值模拟。E-mail: liuhaijun07@163.com

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

$\langle|Q|\rangle$ is an important indicator in the diagnosis of heavy precipitation of typhoons.

Keywords Typhoon, Landfall, Heavy rainfall, High-resolution simulation, Vertical divergence flux

1 引言

台风是一种生成于热带洋面上的强烈风暴,平均每年有 7~8 个热带气旋(台风)登陆我国,是影响我国最严重的天气系统之一(陈联寿和孟智勇, 2001)。登陆台风的研究一直是气象学者最关注的问题之一。近年来,针对登陆台风路径、强度和结构等方面,气象学者开展了大量研究工作,取得了很多有意义的进展:陈联寿和丁一汇(1979)指出中纬度环流系统对台风的移动具有显著影响。雷小途和陈联寿(2001)指出夏季风期间进入西北太平洋西部的台风其运动与青藏高原上的流型有密切关系。陈联寿等(1997)指出台风非对称结构是造成台风异常路径的原因之一;台风登陆后,与中纬度系统相互作用,其结构通常表现出明显非对称(雷小途和陈联寿, 2001);台风内部结构的变化与其强度变化有密切关系(Demaria, 1996);当中纬度弱冷空气流入向极地移动的台风,且主要影响台风外围环流时,台风强度会加强,甚至突然增强;而强冷空气的入侵则会使台风很快填塞(陈联寿和丁一汇, 1979)。登陆台风会带来极其严重的灾害,比如风灾、暴雨洪涝灾害和暴潮灾害,其中以暴雨洪涝灾害最为严重,也最受关注(孙建华等, 2005; 孟庆涛等, 2009; 王黎娟等, 2010)。

近些年来,气象学者针对登陆台风暴雨(强降水)开展了大量细致的研究工作。台风暴雨虽然受到台风强度影响,但两者并无必然联系。强台风可以带来强降水,但登陆后减弱的残涡在一定条件下同样可以带来特大暴雨,甚至远远超过登陆时强台风带来的暴雨(陈联寿和孟智勇, 2001; 陈联寿等, 2004)。2009 年第 8 号台风“莫拉克”袭击我国台湾,造成惨重人员和经济损失。据估计,全部受灾及重建金额总计超过 1000 亿元新台币。这是强台风引起的,不难理解。然而,2001 年 8 月 5 日,一个登陆减弱的热带低压却在上海地区造成了 304 mm/24 h 的强降水,影响巨大。可见,登陆台风暴雨过程十分复杂,需要开展深入研究。陈联寿等(2004)指出,潜热释放、输送和斜压位能释放是近海登陆台风加强和维持的两类主要能源,水汽输

送是近海台风加强和维持的重要条件。数值研究表明(朱洪岩等, 2000),台风可通过水汽和能量输送直接影响台风远距离降水区的分布。李英等(2005)指出,水汽输送有利于台风环流中强对流活动,增加降水量。程正泉等(2009)指出,西南气流的水汽输送对台风降水至关重要,造成大范围强降水的台风往往在登陆后仍与身后的西南急流相连接并维持很长时间,中低空西南急流是登陆台风获取水汽和能量的主要通道,若连接被切断,台风很快减弱,降水强度减弱,范围缩小。段丽和陈联寿(2005)对热带风暴穿越琼州海峡引发海南西部大暴雨过程的研究表明,地形和中尺度对流系统对大暴雨的发生起了重要作用,台风涡旋带来的暖湿空气与五指山地形辐合形成的 MCS 是这次台风暴雨的主角。钮学新等(2005)在对 0216 号台风降水机制的研究中指出,地形作用使迎风坡雨量增加,背风坡雨量减少,使降水分布更加不均匀。蔡则怡和宇如聪(1997)利用中国科学院大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG) η 坐标有限区域数值模式对“75.8”大暴雨开展了模拟,指出山脉的相对高度和陡峭程度以及山脉与暴雨系统的相对位置对暴雨的强度十分敏感,地形稍有改变,暴雨强度将减弱 3/4 以上。康志明等(2008)对“碧利斯”(0604)特大暴雨的研究发现,冷空气从东西两侧嵌入,触发对流运动发展,近地层涡度、散度的形变项使山区处于一涡源状态,不断触发中尺度降水系统,引起暴雨增幅;而低纬季风涌对暴雨增幅有重要作用(Wang et al., 2010)。钮学新等(2005)指出冷空气入侵热带气旋外围,使其外围及倒槽降水明显增加,低层降温大的地方降水也大。入侵的冷空气会使热带气旋中心强度减弱,致使垂直上升速度和水汽辐合减小,从而使中心附近的降水明显减少,但使其北侧外围和倒槽内垂直上升速度和水汽辐合明显加强,降水也显著增加。由以上简要回顾可知,针对登陆台风,尤其是登陆台风暴雨(强降水),气象学者开展了大量的研究工作,内容涉及水汽供应、地形作用、冷空气影响等诸多方面,并取得了很多重要进展。但到目前为止,对登陆台风暴雨(强降水)机理的认识还十分有限,登陆台风暴雨预报对气象业务部门仍是较大难题。台风登

陆过程十分复杂, 涉及海陆气相互作用和多尺度相互作用, 加之降水本身所具有的复杂性, 使得对登陆台风降水过程的理解和认识仍十分欠缺, 这直接导致相关预报水平不高。

本文将利用 WRF 模式, 对 2010 年第 11 号台风“凡亚比”的登陆过程开展高分辨率的数值模拟, 并利用各种观测资料对模拟结果进行验证, 进一步利用动力因子对其登陆过程中的强降水开展初步的模拟诊断分析。

2 “凡亚比”台风概况

“凡亚比”台风于 2010 年 9 月 15 日 12:00 (协调世界时, 下同) 在西北太平洋上生成, 短暂北行和东行后一路向西, 16 日 03:00 加强为强热带风暴, 15:00 加强为台风, 17 日 10:00 加强为强台风, 18 日 08:00 加强为超强台风; 19 日 00:00 减弱为强台风, 01:00 前后在台湾花莲附近沿海登陆, 登陆时中心气压 940 hPa, 最大风速 50 m s^{-1} (15 级); 登陆后继续西行, 强度有所减弱, 19 日 06:00 在台湾台南减弱为台风; 在台湾停留约 10 h 后, 进入台湾

海峡, 随后在福建漳浦沿海再次登陆, 登陆时中心最低气压 970 hPa, 最大风速 35 m s^{-1} (12 级), 20 日 21:00 停止编号。“凡亚比”台风发展迅速, 从开始编号, 经过短短的 67 h 即完成“热带风暴—强热带风暴—台风—强台风—超强台风”的“五级跳”。“凡亚比”台风最强时刻为 9 月 18 日 18:00, 中心气压为 935 hPa, 最大风速 52 m s^{-1} 。在台湾登陆后, 强度迅速减弱, 进入台湾海峡后, 减弱趋势变缓; 在福建沿海再次登陆后, 强度进一步减弱, 并最终填塞消亡。

从卫星云图可以看出, 在“凡亚比”台风达到超强台风量级之前, 其台风眼并不十分明显 (图 1a), 在其靠近台湾时, 则形成了清晰的台风眼及眼壁云系结构 (图 1b), 与此同时, 强度也接近超强台风量级。登陆台湾后, 受地形影响, “凡亚比”台风眼壁结构逐渐松散, 强度也减为台风 (图 1c)。在福建二次登陆后, 云系结构进一步松散 (图 1d), 但涡旋仍然维持。由“凡亚比”台风实况降水分布 (图 2) 可见, 17 日 (图 2a), 降水主要分布在广东东部, 此时台风尚未在台湾登陆, 大陆上降水不强。18 日 (图 2b), 降水出现两个极值中心, 分别

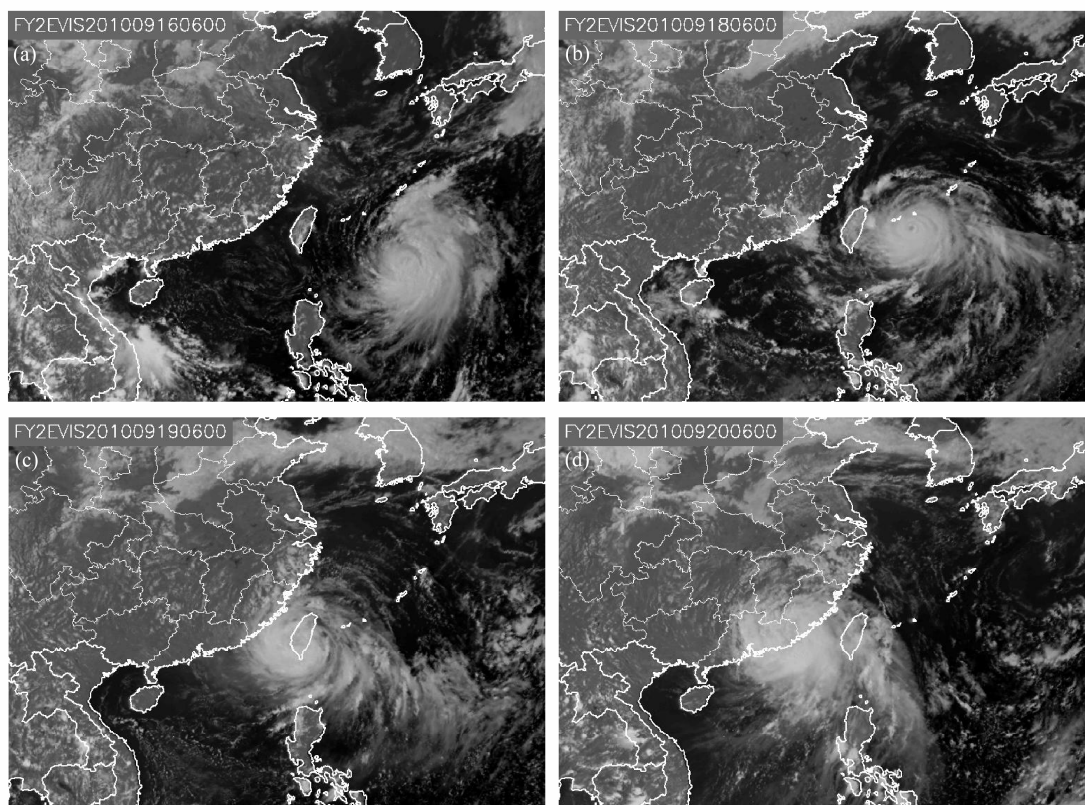


图1 2010 年 9 月 (a) 16 日、(b) 18 日、(c) 19 日、(d) 20 日 06:00 “凡亚比”台风卫星云图

Fig. 1 The satellite images of typhoon Fanapi at 0600 UTC on (a) 16 Sep, (b) 18 Sep, (c) 19 Sep, and (d) 20 Sep 2010

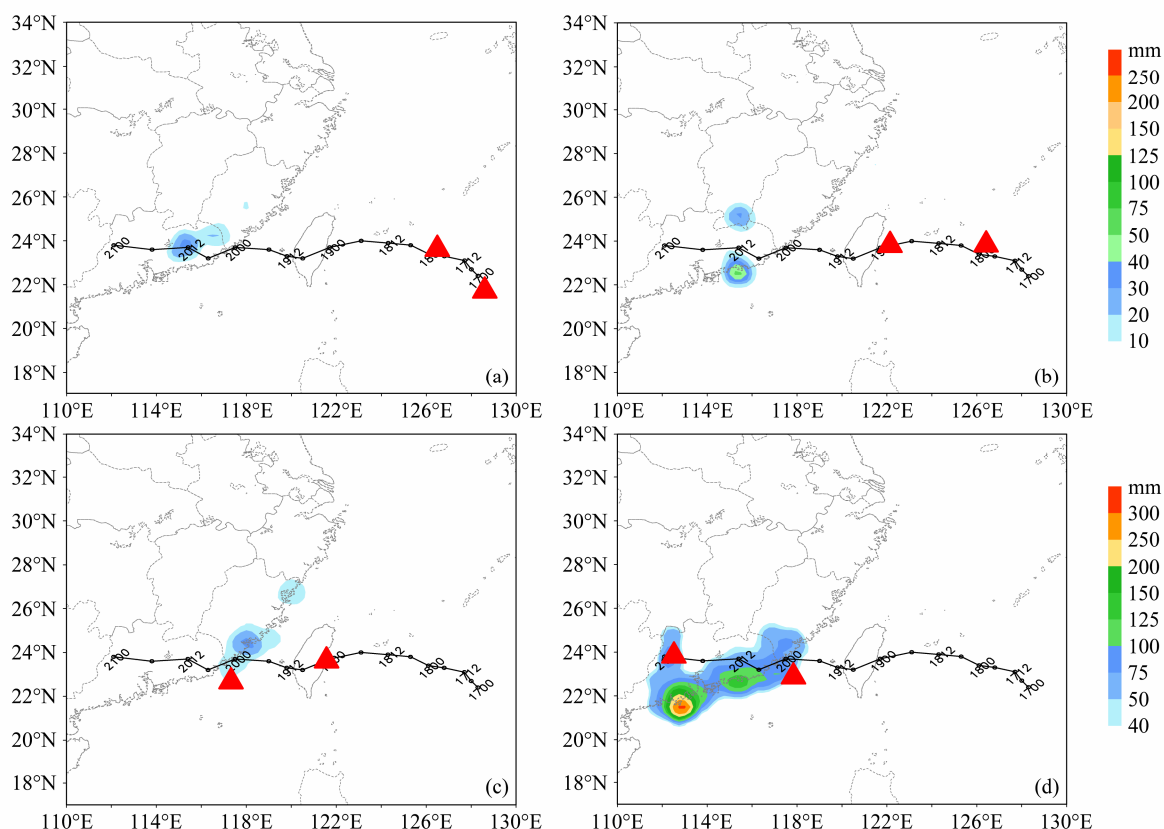


图2 2010年9月(a)17日、(b)18日、(c)19日、(d)20日“凡亚比”台风实况路径与观测24 h累积降水分布(红三角表示台风所处位置)
Fig. 2 The observed tracks of typhoon Fanapi and 24-h accumulated precipitation distributions (red triangles mark the locations of the typhoon) on (a) 17 Sep, (b) 18 Sep, (c) 19 Sep, and (d) 20 Sep in 2010

在广东东南沿海和北部与江西交界处附近, 其中广东沿海的中心较强。19日(图2c), 降水主要分布在福建沿海, 此时台风即将登陆我国大陆。20日(图2d), 降水较之19日有显著增幅, 强降水主要分布在广东南部沿海, 最强中心达300 mm以上。

“凡亚比”台风发展快、强度强、风大雨强、路径曲折, 其云系范围达上千千米, 水汽供应充沛, 造成了很强的暴雨, 尤其是9月20日24 h累积降水出现明显增幅, 影响极为严重, 为研究登陆台风结构、强度和风雨演变特征等提供了典型的个例。

3 数值模拟试验设计与模拟结果验证

下面利用非静力中尺度模式 WRF v3.2.1 对“凡亚比”台风登陆过程开展高分辨率的数值模拟, 模拟时间范围为2010年9月16日00:00至21日00:00, 共120 h (5 d), 基本囊括了“凡亚比”台风从达到强热带风暴量级之前, 一直到中央气象台对其停止编号的整个发展演变过程。模拟选用欧拉质量坐标 (Eulerian mass coordinate), Runge-

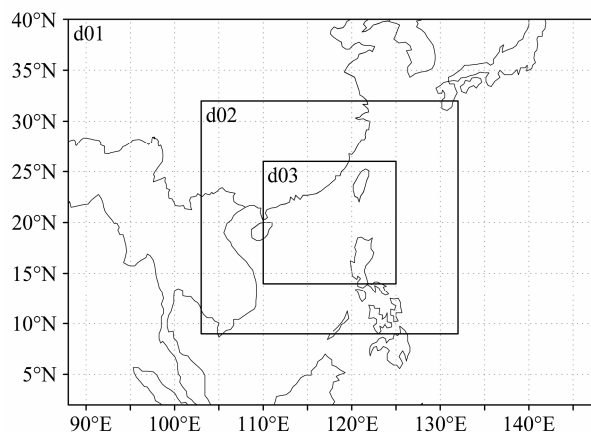


图3 数值模拟区域示意图

Fig. 3 The illustration of numerical simulation domains

Kutta 3阶时间积分方案, 微物理过程采用 WSM3方案, 积云参数化选用 Kain-Fritsch (new Eta) 方案, 边界层采用 YSU 方案, 陆面过程选用 5-layer thermal diffusion 方案, 辐射过程采用 Dudhia 短波辐射和 RRTM 长波辐射方案。选取 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 分辨率 NCEP/NCAR 分析资料 (间隔 6 h) 形成模式初始场。模拟区域如图3所示,

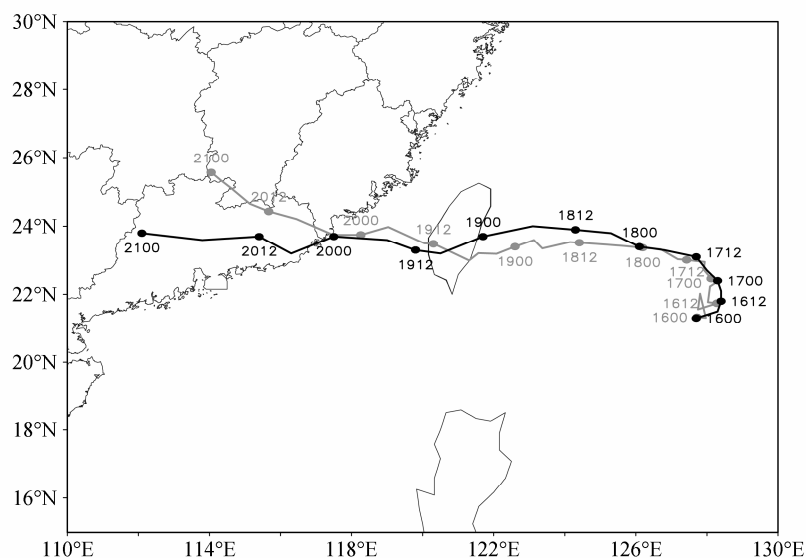


图4 “凡亚比”台风实况路径(实线)与模拟路径(灰线)

Fig. 4 Observed (solid line) and simulated (gray line) tracks of typhoon Fanapi

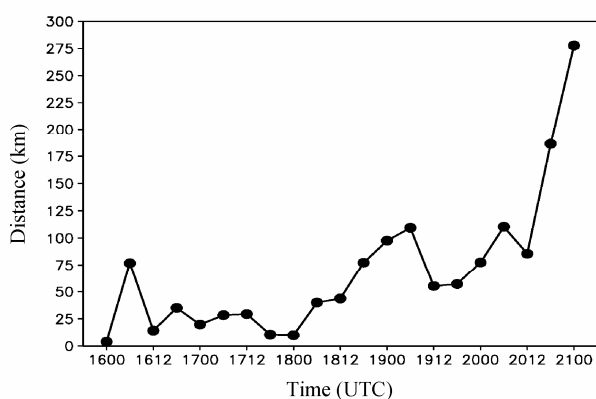


图5 “凡亚比”台风模拟与观测路径差

Fig. 5 The distance deviation between the observed and the simulated tracks of typhoon Fanapi

模式积分区域中心为(118.0°E, 21.0°N), 3个模拟区域水平分辨率分别为27、9、3 km, 网格数分别为181×145、301×244、481×370, 垂直方向上分为28层, 时间积分步长90 s, 模式输出时间间隔为3 h。

从图4中可以看出, 模式对“凡亚比”的路径模拟比较成功, 在多数模拟时段内, 模拟与观测路径基本一致。模式很好地再现了16~17日“凡亚比”台风的转向过程以及之后偏西移动路径; 观测与模拟台风路径差基本维持在120 km以下, 仅模拟最后时段, 路径差超过120 km(图5)。模拟与观测路径差出现3个明显高值时段: 模拟初始阶段、登陆台湾前后和登陆大陆后。模拟初始阶段出现较

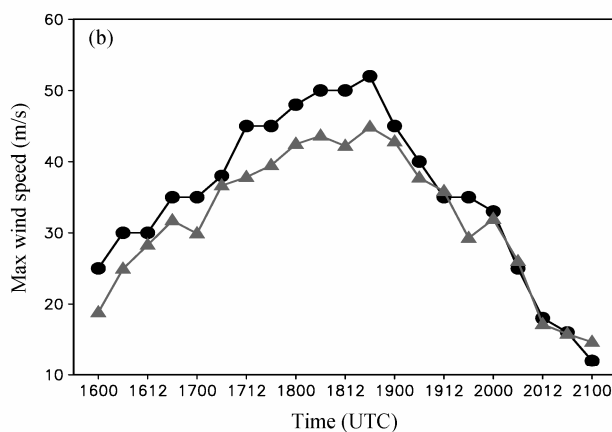
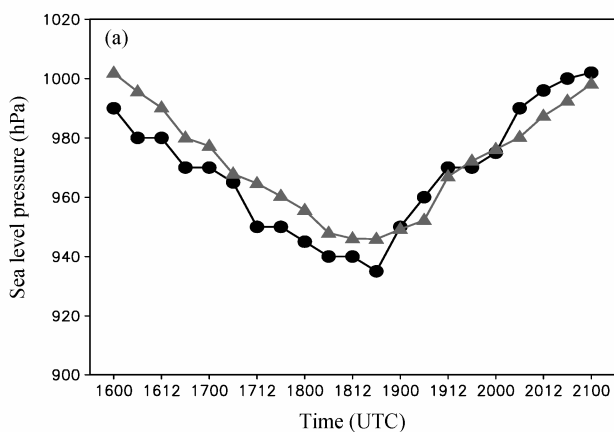


图6 “凡亚比”台风实况强度(黑色圆点和黑线)与模拟强度(灰色三角和灰线): (a) 最低海平面气压; (b) 台风中心附近最大风速

Fig. 6 Observed (black line with dots) and simulated (gray line with triangles) intensity of typhoon Fanapi: (a) Minimum sea level pressure; (b) maximum speed in the vicinity of typhoon center

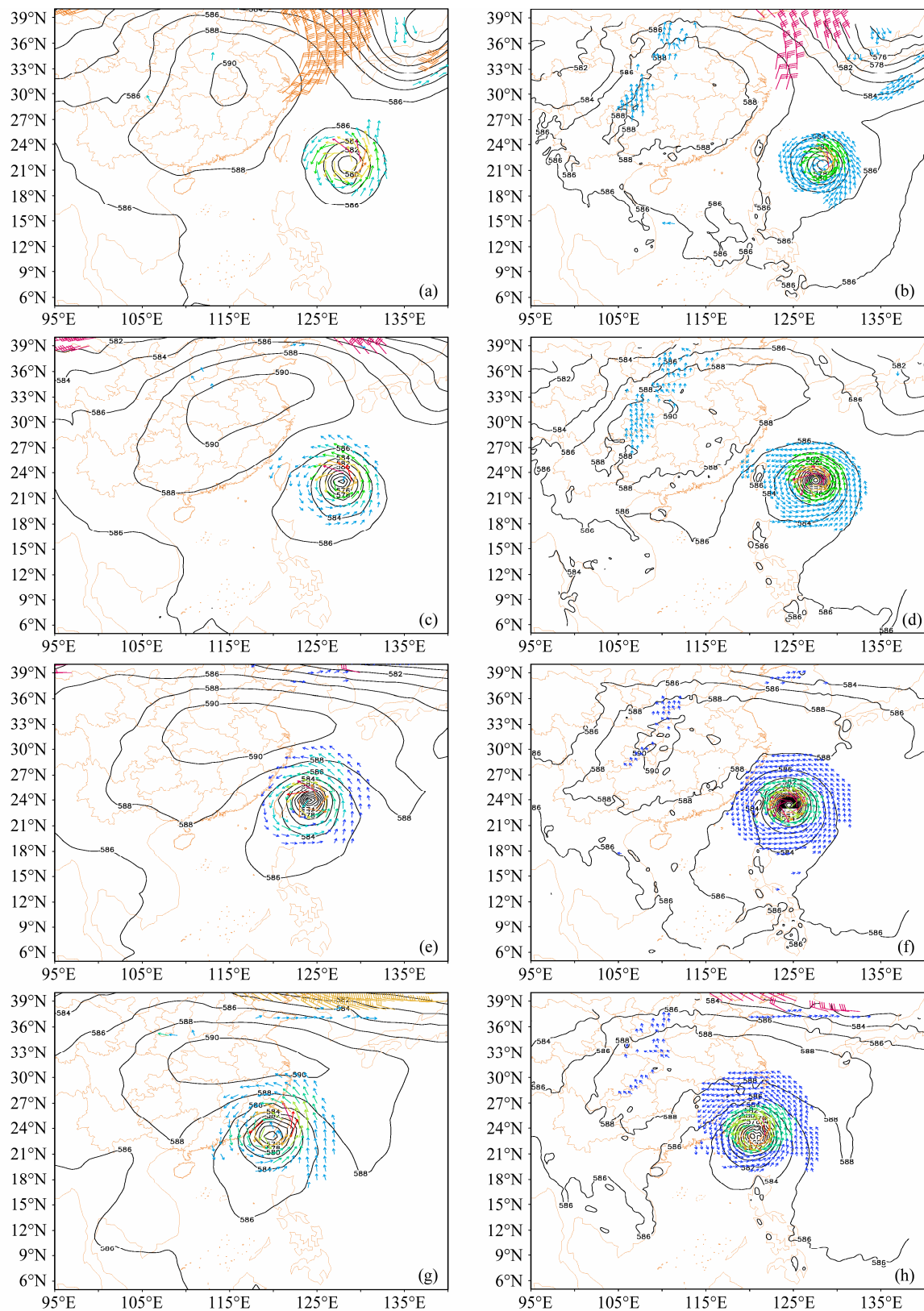


图7 2010年9月(a、b)16日、(c、d)17日、(e、f)18日、(g、h)19日、(i、j)20日12:00 NCEP再分析资料(左列)和模拟(右列)的高
低空环流形势对比(等值线代表500 hPa高度场; 矢量箭头代表850 hPa大于 10 m s^{-1} 的风场; 风羽代表200 hPa大于 30 m s^{-1} 的风场)

Fig. 7 The comparison between NCEP analysed data (left panel) and simulated (right panel) circulation fields at 1200 UTC on (a, b) 16 Sep, (c, d) 17 Sep, (e, f) 18 Sep, (g, h) 19 Sep, and (i, j) 20 Sep 2010 (contours denote geopotential height at 500 hPa; arrows mark the wind field with speed larger than 10 m s^{-1} at 850 hPa; barbs indicate the wind field with speed larger than 30 m s^{-1} at 200 hPa)

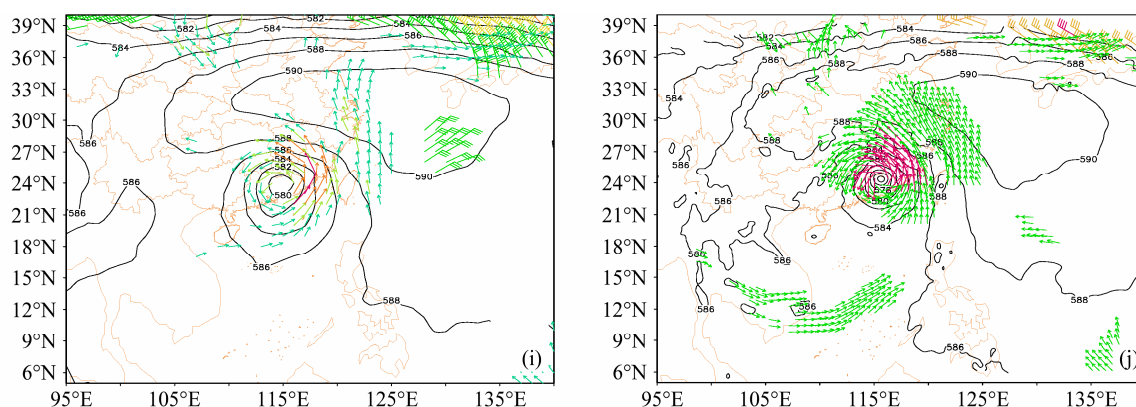


图 7 (续)

Fig. 7 (Continued)

大误差,其原因可能与模式初始场的中小尺度信息偏弱(模式初始场由 NCEP/NCAR 资料形成)以及模式本身存在的一些不足有关;登陆台湾前后出现较大偏差,其原因可能为此时“凡亚比”发展到最强阶段,观测台风中心海平面气压最低达 935 hPa,最大风速最强达 52 m s^{-1} ,而模式对于这种强台风的模拟可能还存在一定不足(图 6);登陆大陆后出现较大偏差,其原因主要是由于模拟的大陆高压相对偏弱,台风登陆中国大陆时大陆高压位置偏东,这使得高空容易产生偏北引导气流,从而使模拟路径出现向北偏差;而模拟的高空(200 hPa)急流相对 NCEP 再分析资料也偏弱,高空槽后冷平流较弱,使得模拟台风有更强的发展(图 7)。但总体来看,模式还是很好地把握住了“凡亚比”台风整个发展演变过程的主要路径变化特征。

从图 6 中可以看出,模拟的台风中心最低气压和最大风速与观测的最低气压和最大风速的变化趋势基本一致。尽管模拟与观测的强度在细节上还存在一定差异,但总体上看,模式还是较好地再现了“凡亚比”台风发展演变过程中主要的强度变化特征,包括两次登陆减弱阶段的强度变化特征(图 6)。

从图 7 中可以看出“凡亚比”台风主要受到大陆高压以及高压两侧高空槽影响;9 月 16 日 12:00 (图 7a 和 7b),我国大陆基本被高压所控制,高压西侧陆地上与东侧海上各存在一个中纬度高空槽,“凡亚比”台风此时处于海上,与这些系统相对峙,之后“凡亚比”台风路径转为偏西北(图 4)。17 日 12:00 (图 7c 和 7d),中纬度环流发生调整,原大陆上空近圆形分布的高压中心演变为近东西向分布的椭圆形高压中心,原海上的中纬度高空槽逐渐东移。在这种环流形势控制下,“凡亚比”台

风路径由偏西北转为偏西,之后一直维持偏西路径(图 4)。18 日 12:00 (图 7e 和 7f),“凡亚比”台风即将登陆台湾,强度也即将达到最强(图 6),并出现明显台风眼(图 1)。19 日 12:00 (图 7g 和 7h),“凡亚比”台风移出台湾,继续西行。20 日 12:00,“凡亚比”台风已登陆我国大陆,中心处于广东省境内(图 7i 和 7j),同时北方陆地高压的主体也开始移出入海。从总体上看,模式很好地模拟再现了上述环流演变特征,尤其是陆地高压的发展和演变,这也进一步说明了多数时间模拟路径与观测路径较为一致的原因(图 4),同时 20 日 12:00 (图 7i 和 7j)模式模拟的大陆高压主体与 NCEP 资料相比明显偏东,造成模拟路径与观测路径在模拟最后阶段出现较大偏差(图 5)。

由图 8 可以看出,模式对“凡亚比”台风登陆期间 6 h 累积降水的模拟较其对路径、强度以及高低空环流的模拟要明显偏差,模式可以很好地模拟出登陆期间的动力场和环流演变特征(图 4~7),但对要素场(如降水),由于涉及复杂的云微物理过程等,模拟能力还比较有限。从模拟与观测的 24 h 累积降水对比(图略)可以看出,模式能大致模拟出降水落区和走向,但对强降水中心的模拟较差。模式也基本能模拟出观测 6 h 累积降水的主要中心,但是对落区的模拟存在不足,尤其是模拟后期,这和模拟后期观测与模拟路径差加大有关。

4 模拟诊断分析

以往研究工作提出了很多物理意义明确的、用于降水诊断的热动力因子,如对流涡度矢量(Gao et al., 2004),非均匀饱和湿热力平流参数(Wu et al.,

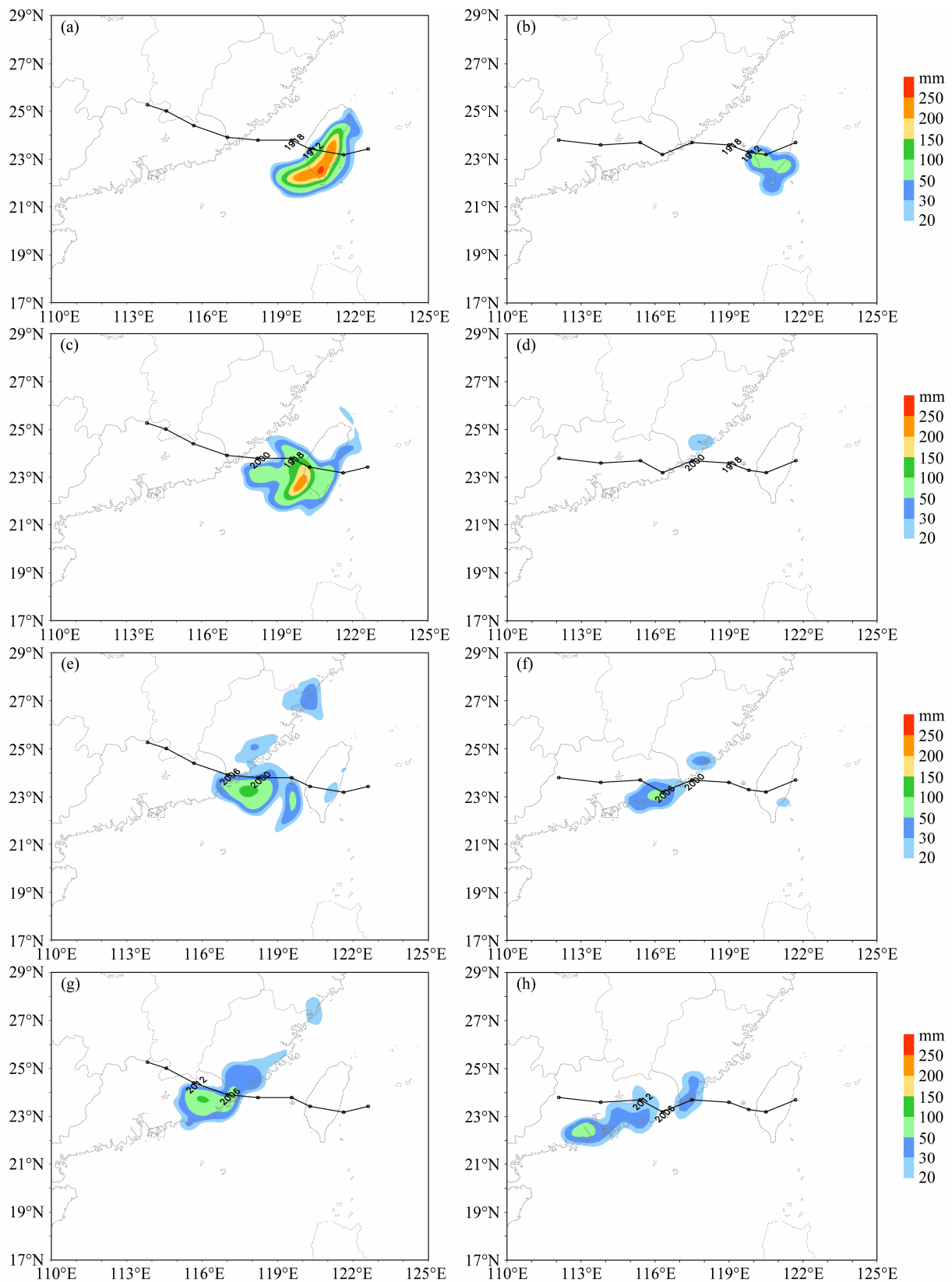


图8 2010年9月(a、b)19日18:00、(c、d)20日00:00、(e、f)20日06:00、(g、h)20日12:00、(i、j)20日18:00、(k、l)21日00:00“凡亚比”台风二次登陆期间模拟(左侧)和观测(右侧)6h累计降水对比

Fig. 8 The simulated (left panel) and observed (right panel) 6-h cumulative precipitation at (a, b) 1800 UTC 19 Sep, (c, d) 0000 UTC 20 Sep, (e, f) 0600 UTC 20 Sep, (g, h) 1200 UTC 20 Sep, (i, j) 1800 UTC 20 Sep, and (k, l) 0000 UTC 21 Sep 2010

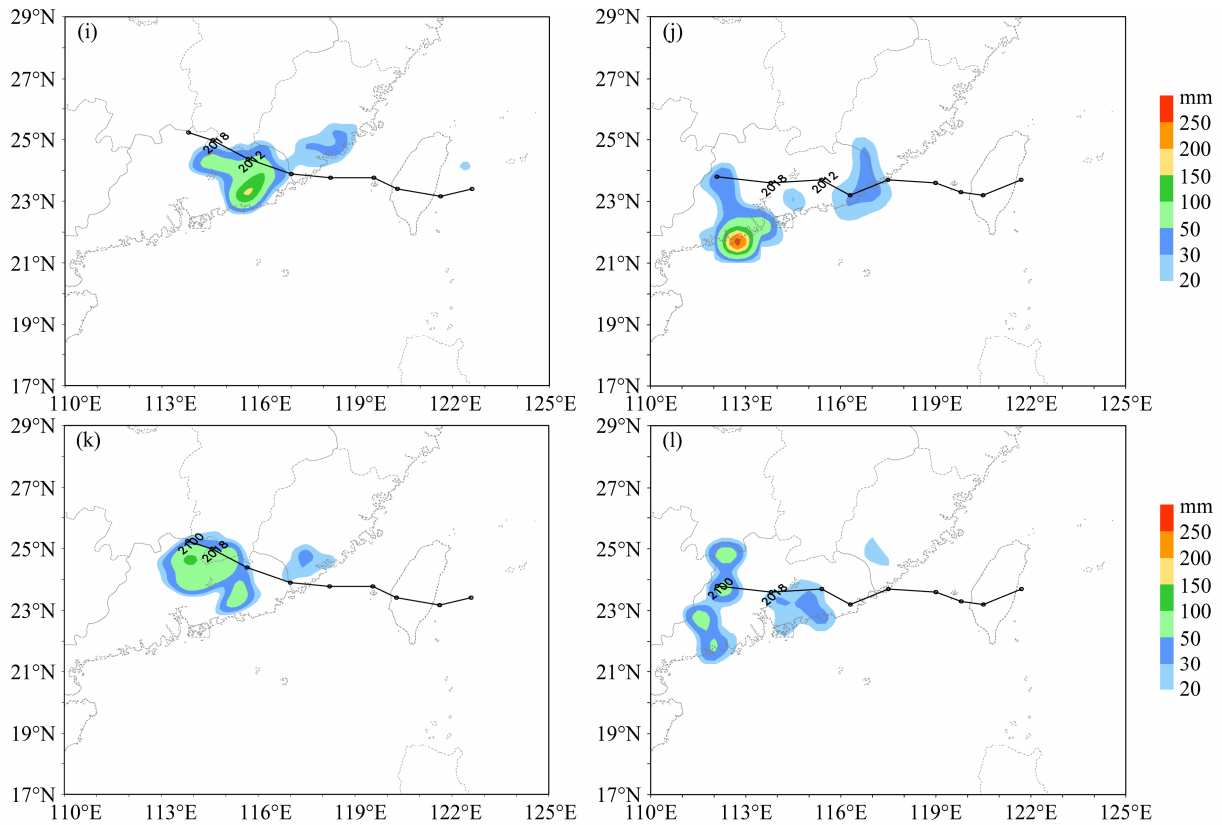


图 8 (续)

Fig. 8 (Continued)

2011) 等。这些因子对暴雨过程中的动力场、热力场和水汽场等较好的描述, 它们的发展演变和降水系统的发展和移动存在较好的对应关系。实际大气降水过程中, 低层辐合和高层辐散是降水区上空典型的垂直动力结构特征, 而垂直运动与降水系统发展和降水的发生更是具有密切的联系, 因此选取可以综合表征降水区辐合与辐散特征以及垂直运动特点的动力因子——散度垂直通量, 来对登陆台风“凡亚比”强降水过程进行初步诊断。

散度垂直通量 (Q) 定义为

$$Q = \omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

其中, ω 为垂直速度, $\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$ 为水平散度。从散度垂直通量表达式可以看出, Q 综合表征了与大气降水密切相关的垂直运动和水平散度特征, 在降水诊断中应该具有较好效果。

对 Q 的绝对值取 850~500 hPa 的质量加权垂直积分, 得到

$$\langle |Q| \rangle = - \int_{850}^{500} \rho \left| \omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right| dp$$

其中, ρ 是空气密度, $V = (u, v, \omega)$ 为等压坐标内三维速度矢量, $|A|$ 代表对物理量 A 取绝对值,

$-\int_{850}^{500} \rho A dp$ 代表在等压坐标系内对物理量 A 取从 850~500 hPa 的质量加权垂直积分。

利用本文高时空分辨率的模拟资料计算了“凡亚比”登陆期间 $\langle |Q| \rangle$ 的分布及其演变, 19 日 12:00 至 18:00 (图 9a), “凡亚比”台风的强降水主要分布在台湾地区, 其中以南部最为显著, $\langle |Q| \rangle$ 的大值区与强降水落区有很好对应。19 日 18:00 至 20 日 00:00 (图 9b), 强降水主要分布在台湾南部、台湾海峡以及福建省沿海, 降水大值区与散度垂直通量的大值区也有很好的对应关系。20 日 00:00 至 06:00 (图 9c), 降水主要位于福建、广东交界处沿海、广东东部、福建南部以及福建与浙江交界, $\langle |Q| \rangle$ 的大值区对强降水落区有明显指示。而且降水越强, $\langle |Q| \rangle$ 值越大。20 日 06:00 至 12:00 (图 9d), 强降水主要分布在广东东部和福建南部, 以广东东部降水中心为主, $\langle |Q| \rangle$ 的大值区与广东东部强降水区吻合很好, 对福建南部强降水中心的指示偏差。20 日 12:00 至 21 日 00:00 (图 9e 和 9f) 强降水主要位

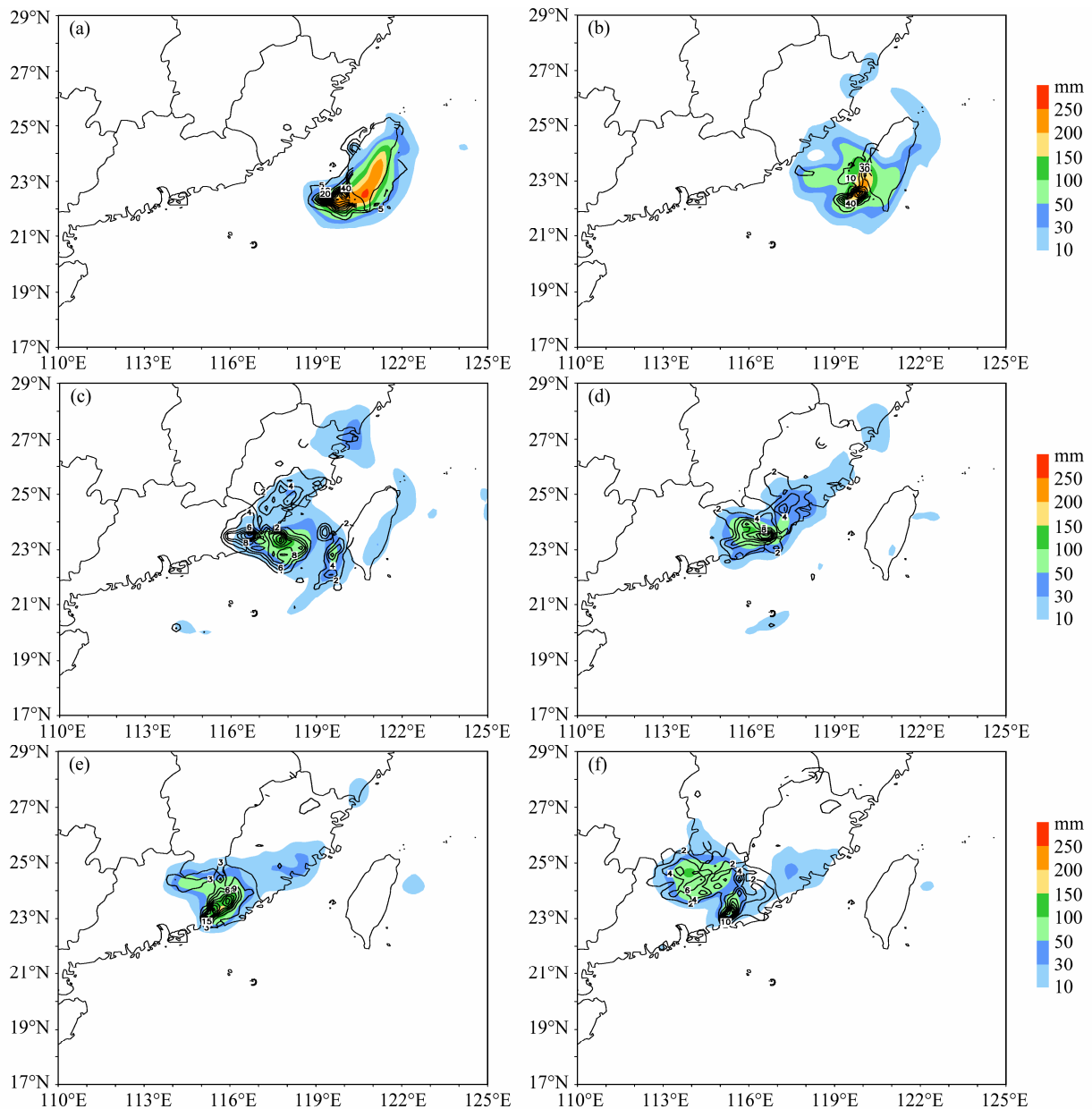


图9 2010年9月(a)19日18:00、(b)20日00:00、(c)20日06:00、(d)20日12:00、(e)20日18:00、(f)21日00:00散度垂直通量绝对值垂直积分(850~500 hPa) $\langle |Q| \rangle$ (等值线, 单位: $\text{kg Pa}^2 \text{m}^{-3} \text{s}^{-2}$) 的水平分布和模拟的6 h累计地面降水(阴影)

Fig. 9 The horizontal distribution of $\langle |Q| \rangle$ (contour, units: $\text{kg Pa}^2 \text{m}^{-3} \text{s}^{-2}$) and simulated 6-h accumulated precipitation (shaded) at (a) 1800 UTC 19 Sep, (b) 0000 UTC 20 Sep, (c) 0600 UTC 20 Sep, (d) 1200 UTC 20 Sep, (e) 1800 UTC 20 Sep, and (f) 0000 UTC 21 Sep 2010

于广东东部和北部, $\langle |Q| \rangle$ 大值区与强降水中心基本对应一致。总体来看, $\langle |Q| \rangle$ 的大值区基本覆盖在“凡亚比”强降水区域; 值较大区域对应的降水强度也大。为对比分析, 本文同样诊断了湿位涡(MPV)分布与“凡亚比”台风强降水的关系(图10), 由图10可见, 尽管湿位涡与降水系统的发展和演变也有一定对应, 但与散度垂直通量相比(图9), 其对强降水落区和移动的指示明显不足。

在实际大气中, 垂直涡度、水平散度和垂直运

动均对强降水系统的发展和演变有一定指示意义, 其中垂直涡度描述了系统水平旋转的大小, 可以在一定程度上表征系统发展的强弱, 但对强降水的指示意义不如其他两者, 而水平散度和垂直运动与强降水的发生密切和直接相关, 低层辐合和高层辐散是降水区上空典型的垂直动力结构特征, 而垂直上升运动则是成云致雨的关键。散度垂直通量抓住了上述这两个降水区的主要特征, 表征了水平散度与垂直运动的相互作用。因此, 利用散度垂直通量对

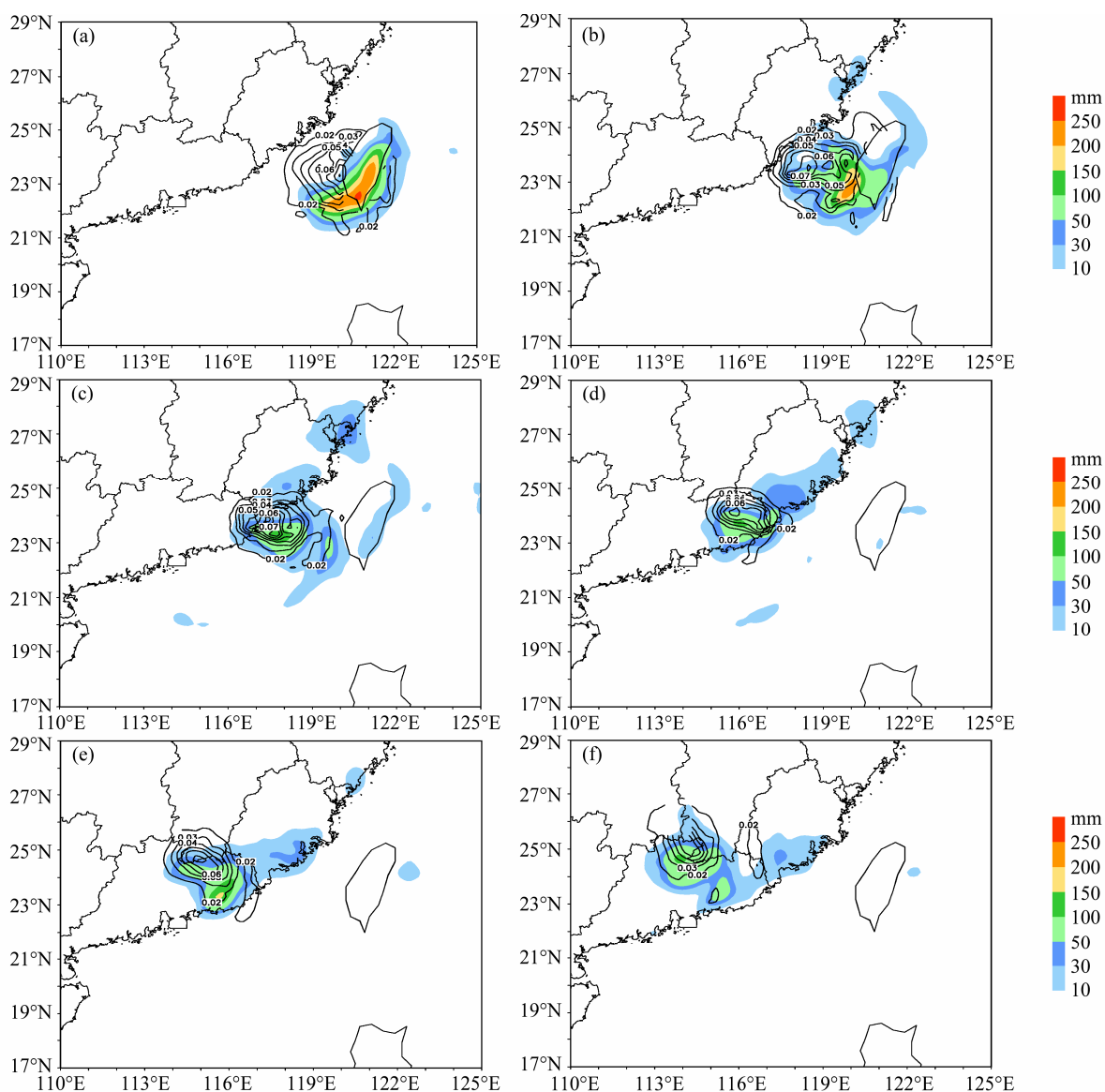


图 10 2010 年 9 月湿位涡 (MPV) 绝对值垂直积分 (850~500 hPa) (等值线, 单位: $\text{hPa K m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 的水平分布和模拟的 6 h 累计地面降水 (阴影): (a) 19 日 18:00; (b) 20 日 00:00; (c) 20 日 06:00; (d) 20 日 12:00; (e) 20 日 18:00; (f) 21 日 00:00

Fig. 10 The horizontal distribution of integrated moist potential vorticity (MPV) absolute value (contour, units: $\text{hPa K m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and simulated 6-h accumulated precipitation (shaded): (a) 1800 UTC 19 Sep; (b) 0000 UTC 20 Sep; (c) 0600 UTC 20 Sep; (d) 1200 UTC 20 Sep; (e) 1800 UTC 20 Sep; (f) 0000 UTC 21 Sep 2010

本次登陆台风强降水进行诊断, 取得了较好的效果。散度垂直通量综合表征了水平散度与垂直运动两者的变化, 相对于单个物理量的指示效果, 散度垂直通量更具优势。

5 结论

本文利用中尺度非静力 WRF 模式对 2010 年第 11 号台风“凡亚比”的发展演变及其在台湾和大陆的两次登陆过程开展了高分辨率的数值模拟, 并利用多种观测资料对模拟结果进行了验证, 结果表

明: 1) 模式较好地模拟出了“凡亚比”台风的发展演变及其登陆过程。模拟的台风路径与观测路径比较一致, 只是在长达 5 d 的模拟后期, 即台风登陆我国大陆后出现较大偏差; 2) 台风中心最低气压和最大风速演变过程的模拟与观测吻合得很好, 变化趋势基本一致; 3) 模式较好地再现了“凡亚比”台风登陆期间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; 4) 利用高时空分辨率的模拟资料, 对“凡亚比”台风登陆期间强降水的诊断分析表明, 散度垂直通量绝对值的垂直积分 $\langle |Q| \rangle$ 的大值区始终覆盖在地面降水区之上, 其

空间分布和时间演变趋势与地面降水较为一致,并且在强降水区 $\langle|Q|\rangle$ 的值相对较大,可见,利用 $\langle|Q|\rangle$ 可以较好地描述登陆台风强降水系统的发展演变过程,对强降水落区具有一定诊断和指示意义。

参考文献 (References)

- 蔡则怡, 宇如聪. 1997. LASG η 坐标有限区域数值预报模式与一次登陆台风特大暴雨的数值试验 [J]. 大气科学, 21 (4): 459–471. Cai Zeyi, Yu Rucong. 1997. A numerical simulation of an extraordinary storm rainfall caused by a landing typhoon with LASG mesoscale model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21 (4): 459–471.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 491pp. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoons (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 491pp.
- 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): 420–431. 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): 420–431.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 541–549.
- 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 Lianshou, Xu Xiangde, Xie Yiyang, et al. 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21 (1): 83–90.
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析 [J]. 气象学报, 67 (5): 840–850. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Li Ying. 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (5): 840–850.
- Demaria M. 1996. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change [J]. J. Atmos. Sci., 53: 2076–2087.
- 段丽, 陈联寿. 2005. 热带风暴“菲特”(0114)特大暴雨的诊断研究 [J]. 大气科学, 29 (3): 343–353. Duan Li, Chen Lianshou. 2005. Diagnostic analysis and numerical study of torrential rain associated with the tropical storm Fitow (0114) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (3): 343–353.
- Gao S T, Fan P, Li X F, et al. 2004. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. J. Geophys. Res., 109: D14106, doi:10.1029/2004JD004807.
- 康志明, 陈涛, 钱传海, 等. 2008. 0604 号强热带风暴“碧利斯”特大暴雨的诊断研究 [J]. 高原气象, 27 (3): 596–607. Kang Zhiming, Chen Tao, Qian Chuanhai, et al. 2008. Diagnostic analysis on torrential rain caused by the tropical storm Billis (0604) [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (3): 596–607.
- 雷小途, 陈联寿. 2001. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究 [J]. 气象学报, 59 (5): 602–615. Lei Xiaotu, Chen Lianshou. 2001. Tropical cyclone landfalling and its interaction with mid-latitude circulation systems [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 602–615.
- 李英, 陈联寿, 徐祥德. 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. 大气科学, 29 (1): 91–98. Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 91–98.
- 孟庆涛, 孙建华, 乔枫雪. 2009. 20 世纪 90 年代以来东北暴雨过程特征分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 596–612. Meng Qingtao, Sun Jianhua, Qiao Fengxue. 2009. Characteristics of heavy rainfall in Northeast China since the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 596–612.
- 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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 57–68.
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 2005. 20 世纪 90 年代华北暴雨过程特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 492–506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 492–506.
- 王黎娟, 卢珊, 管兆勇, 等. 2010. 台风“榴莲”陆上维持及暴雨增幅的大尺度环流特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 511–521. Wang Lijuan, Lu Shan, Guan Zhaoyong, et al. 2010. Large scale circulation features of the maintenance and increase in torrential rains from the landing typhoon Durian [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 511–521.
- Wang L J, Lu Shan, Guan Z Y, et al. 2010. Effect of low-latitude monsoon surge on the increase in downpour from tropical storm Bilis [J]. Journal of Tropical Meteorology, 16 (2): 101–108.
- Wu X D, Ran L K, Chu Y L. 2011. Diagnosis of a moist thermodynamic advection parameter in heavy rainfall events [J]. Adv. Atmos. Sci., 28 (4): 957–972, doi:10.1007/s00376-009-9057-8.
- 朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (5): 669–675. Zhu Hongyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 669–675.