

许变, 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11156. 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.

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

许变^{1,2} 何金海¹ 高守亭² 林青^{1,2}

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 “莫拉克”是 2009 年登陆我国热带气旋中影响范围最广、造成损失最大的台风。“莫拉克”带来的强降水导致台湾南部发生 50 年来最严重的水灾, 福建、浙江等省的部分站点过程雨量超过 50 年一遇。因此, 在台风暴雨(强降水)预报中, 能否准确把握其落区就显得尤为重要。本文首先利用中尺度非静力数值模式 WRF 对台风“莫拉克”进行高分辨率数值模拟(三层嵌套, 最高分辨率为 2 km)。模式较好地再现了台风中心的移动路径、强度; 模拟的降水分布区域与实况也较为相符。利用再分析资料及模拟的高分辨率资料对暴雨成因进行诊断分析, 表明造成此次强降水过程的水汽主要由西南季风输送, 并且垂直运动旺盛, 贯穿整个对流层。根据集合动力因子预报方法, 运用广义湿位温、对流涡度矢量垂直分量及水汽散度通量对暴雨落区进行了诊断和预报, 发现广义湿位温等值线的“漏斗状”区域与暴雨落区对应关系显著; 基于 NCEP-GFS 每日四次的预报场资料, 利用对流涡度矢量和水汽散度通量做出的降水落区预报表明, 二者对降水落区均有一定的指示意义。强降水主要位于对流层中低层对流涡度矢量垂直分量的梯度大值区附近, 其时间演变与观测降水的演变具有相当高的一致性; 水汽通量散度抓住了垂直运动和水汽散度这两个引发暴雨的关键因子, 对降水的发生范围和强降水极值中心的判断更为准确。这三个动力因子都可以为“莫拉克”台风暴雨(强降水)落区提供信号, 对台风暴雨落区具有一定的诊断和预报意义。

关键词 “莫拉克”台风 动力因子 暴雨落区 诊断与预报

文章编号 1006-9895(2013)01-0023-13

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11156

Diagnostic and Predictive Studies of Torrential Rain Location Associated with Landfalling Typhoon Morakot (0908) Using Multi-Dynamical Parameters

XU Luan^{1,2}, HE Jinhai¹, GAO Shouting², and LIN Qing^{1,2}

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

Abstract Typhoon Morakot (0908), the most wide-ranging, disastrous typhoon to make landfall in China during 2009, caused flooding from rainfall in southern Taiwan and in parts of Fujian and Zhejiang provinces. Because the location of torrential rain is the focus of forecasters, the Weather Research and Forecast Model (WRF) is used in this study to simulate Typhoon Morakot at high resolution with triple two-way nesting in which the finest grid size is 2 km. This

收稿日期 2011-09-01, 2012-08-14 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421505, 国家自然科学基金面上项目 41075043、41175056, 国家自然科学基金海峡两岸合作研究项目 40921160379, 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介 许变, 女, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事中尺度天气动力学研究。E-mail: xu.luan@yahoo.com.cn

simulation agrees well with track, intensity, and precipitation distribution observations. Diagnostic analyses included the simulation result and reanalysis data from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). The southwest monsoon was determined to be the dominant contributor of water vapor. In addition, a strong updraft spreading through the entire troposphere resulted in heavy rain. On the basis of the multi-dynamical parameters forecasting method, generalized moist potential temperature, the vertical component of convective vorticity vector and moisture divergence flux were chosen to perform diagnosis and forecasting of this heavy precipitation event. The results reveal funnel-shaped areas of generalized moist potential temperature isolines in the vertical sections, which corresponds well with the strong precipitation region. By using four-times-daily NCEP-Global Forecast System (GFS) forecast products, the vertical integration of the vertical component of convective vorticity vector and moisture divergence flux in the middle and lower troposphere were calculated; both show some significance in the prediction of rainfall areas. The high-value region of convective vorticity vector integration gradient is in fair agreement with the rainfall area, and the time evolution of convective vorticity vector integration is rather coincident with the observed precipitation. The forecast made by moisture divergence flux is better capable of both locating the rainfall area and tracing the torrential rain center. All of the parameters show indicative signals for the heavy rain location of Typhoon Morakot, and they are of certain significance in the diagnosis and prediction of typhoon precipitation regions.

Keywords Typhoon Morakot, Dynamical parameters, Torrential rain location, Diagnosis and prediction

1 引言

热带气旋(台风)引发的灾害在十大自然灾害中高居首位,其主要部分是由热带气旋引发的暴雨洪涝灾害,发生时间为热带气旋登陆前后。而我国是世界上热带气旋登陆最多的国家之一(陈联寿和孟智勇, 2001; 陈联寿等, 2004),深受其带来的暴雨、大风和风暴潮等灾害的影响,国家经济、人民生命财产也面临严重威胁。因此,台风登陆前后带来的强降水的预报一直是气象部门关注的重点。

台风是最强的暴雨天气系统,我国 24 小时累积降水记录中,排在前六位的极端强降水事件均是由台风引发的(Chen et al., 2010)。其中,0908 号台风“莫拉克”位列第三。“莫拉克”是 2009 年登陆我国热带气旋中影响范围最广、造成损失最大的台风。台湾南部过程雨量超过 2000 mm,其影响之大,破坏力之强,使得强台风“莫拉克”重创台湾位列 2009 年我国十大天气气候事件之首。因此,台风降水的预报,尤其是强降雨落区的预报就显得尤为重要。

降水与动力、热力、辐射及云微物理等非线性相互作用的过程密切相关,是预报业务中难度最大的要素之一。1960 年,美国国家气象中心(National Meteorological Center)发起了定量降水预报及其验证计划。随着数值天气预报模式的改进,预报员对模式性能了解的增进以及对降水过程的理解更加深入,短期降水预报的准确率稳步提升(Olson and

Junker, 1995)。但是对于某些特殊时段(如夏季)的强对流天气引起的突发性强降水,由于造成降水的中尺度天气系统空间尺度较小,生命史较短,降水具有局地性和短时性等特征,预报难度大大提高。陈联寿(2006)指出,目前,在台风领域,台风的路径预报比台风的强度和台风风雨分布的预报都遥遥领先。尤其台风暴雨预报技术远远滞后,预报准确率较低,远远不能满足公众需求和防灾需求。台风暴雨的观测技术也亟待改进。

降水的预报分为落区预报与强度预报,其中落区预报失误是降水预报失误中最常见的一类(Ebert and McBride, 2000),而做好降水预报首要的是要提高落区预报的准确性。定量降水估计和定量降水预报技术已经在世界几大主要的预报中心投入业务运行,一定程度上提高了热带气旋降水预报的准确性。但由于目前对于造成降水的非线性相互作用过程的理解尚存在很多不足,数值预报模式中降水预报技巧及准确率也远远低于模式预报的温、压、湿、风等基本量。因此,定量降水预报在实际业务操作过程中存在一定困难。

针对现状,Gao et al. (2004a, 2004b, 2005a, 2005b, 2007)和 Gao and Cao (2007)从暴雨触发机理角度出发,研究并建立了暴雨短期临近集合动力因子预报方法。其思想是加强暴雨中的动力和热力过程信息的释用,利用模式预报较为准确的基本产品,构建具有明确物理意义、可以表征关键热力过程的因子,并将其运用于暴雨预报。鉴于我国

暴雨主要分为台风暴雨、梅雨锋暴雨、西风槽暴雨和低涡暴雨四种类型, 且造成各类暴雨的天气系统及动力、热力过程均有较大差异, 我们需要有针对性地选取能够有效描述和反映台风暴雨发生和维持机理的动力因子, 并将其应用于台风暴雨的诊断与预报。基于这个目的, 本文首先利用 WRF 模式对“莫拉克”台风进行高分辨率模拟, 利用观测资料与模拟结果进行了细致的对比验证, 然后运用模式输出资料、NCEP-GFS (National Center for Atmospheric Research-Global Forecast System) 预报场资料和部分动力因子对 0908 号台风“莫拉克”两次登陆前后共 72 h (2009 年 8 月 6 日 12 时至 9 日 12 时, 协调世界时, 下同) 期间造成的强降水及其落区进行诊断与预报, 检验这些因子是否对台风暴雨落区具有诊断和预报意义。

2 台风概况和环流背景

2009 年 8 月 5 日 06 时, “莫拉克”由强热带风暴加强为台风, 先后于 7 日 15 时 45 分和 9 日 8 时

20 分在台湾花莲和福建霞浦登陆, 11 日 18 时停止编号。“莫拉克”先后对台湾和大陆沿海七省带来特大暴雨。台湾南部雨量超过 2000 mm, 过程最大雨量出现在阿里山, 超过 3000 mm。福建、浙江、安徽、江西部分站点过程雨量超过 50 年一遇 (<http://www.china.com.cn> [2009-12-31]), 其中福建东北部和浙江东南部的累计雨量达 500~800 mm, 浙江泰顺县九峰乡的过程雨量超过 1200 mm (陈洪滨和范学花, 2010)。强降水造成了台湾中南部及东南部的“八八水灾”, 导致全台 673 人死亡, 26 人失踪, 农业损失逾 195 亿新台币 (<http://www.npf.org.tw> [2010-08-23]), 强台风“莫拉克”重创台湾位列 2009 年我国十大天气气候事件之首。

“莫拉克”加强为台风时刻, 台风中心位于台湾以东约 15 个纬距的西北太平洋洋面上 (图 1a), 实况中心最低气压达到 975 hPa, 最大风速 33 m/s。同时刻 500 hPa 高度场上 (图 1b), 高纬地区以纬向环流为主, 存在两槽一脊, 中低纬 0907 号热带风暴“天鹅”和台风“莫拉克”并存。到 6 日 06

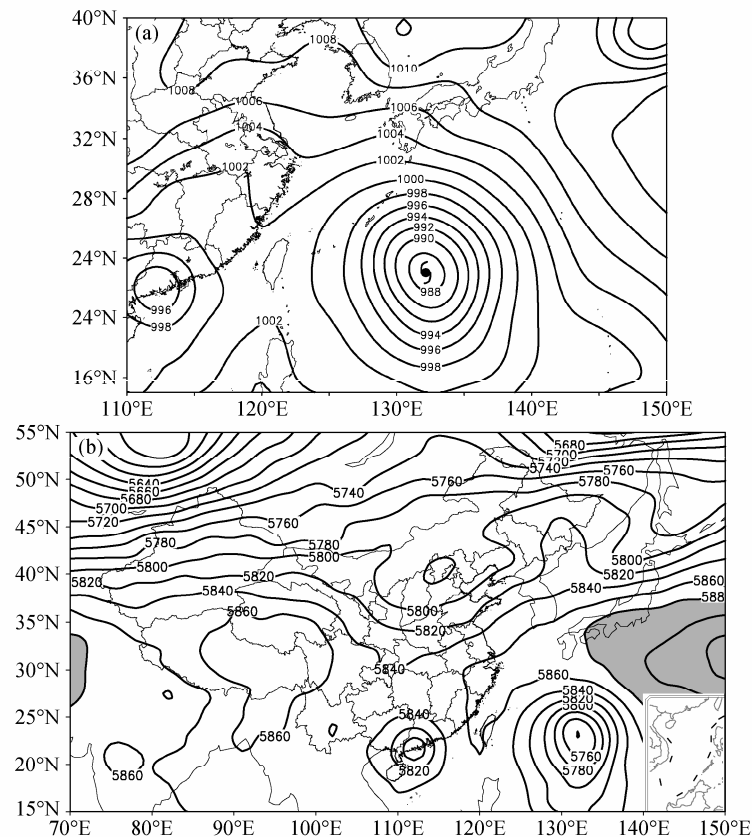


图 1 “莫拉克”加强为台风时刻 (8 月 5 日 06 时) 的海平面气压场 (a, 黑色实线, 单位: hPa) 及 500 hPa 位势高度场 (b, 黑色实线, 单位: gpm), 阴影区代表位势高度大于 5880 gpm 的区域

Fig. 1 (a) Sea level pressure (hPa) and (b) 500-hPa geopotential height (gpm) fields at 0600 UTC 5 Aug 2009 when Morakot intensified into a typhoon. Areas with geopotential height larger than 5880 gpm are shaded

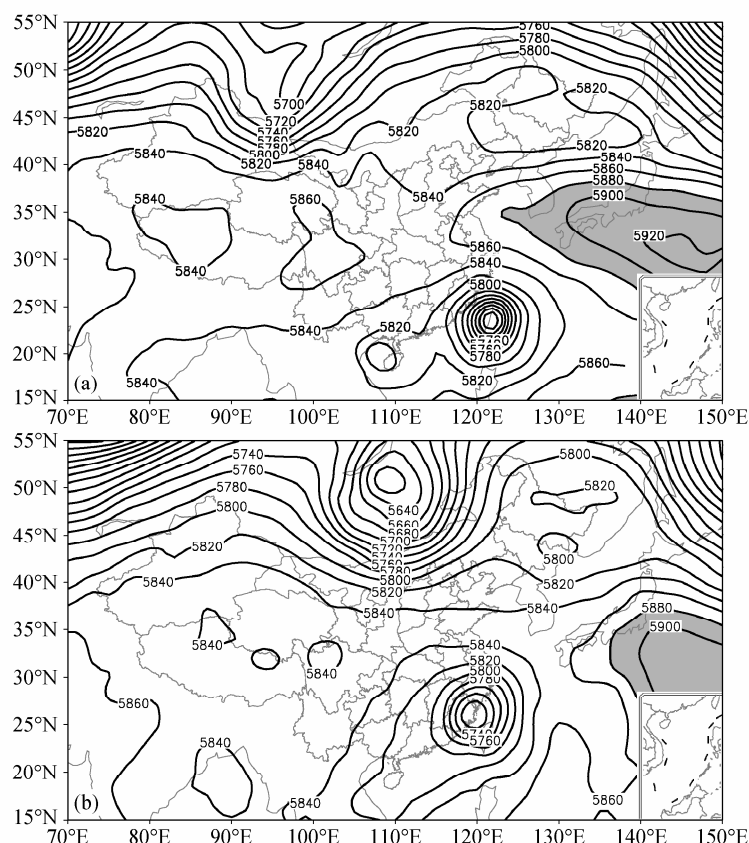


图2 “莫拉克”(a) 登陆台湾前(8月7日12时)和(b) 登陆福建前(8月9日06时)的500 hPa位势高度场(单位: gpm)。阴影区代表位势高度大于5880 gpm的区域

Fig. 2 500-hPa geopotential height fields before Morakot making landfall in (a) Taiwan (at 1200 UTC 7 Aug) and (b) Fujian (at 0600 UTC 9 Aug). Areas with geopotential height larger than 5880 gpm are shaded

时(图略),两台风外围出现闭合等值线,588线西伸至124°E附近,副高与台风环流在东北—西南方向上形成对峙局面。

“莫拉克”登陆前的500 hPa位势高度场上,河套地区短波槽以较慢速度(<10 经度/天)东移,强盛的副高逐渐东撤(图2a, b)。7日15时45分,“莫拉克”登陆台湾(图略)。由于引导气流发生变化,路径也开始转向,由原来的沿副高东南引导气流向西北偏西方向移动转为沿副高脊点外围向西北偏北方向移动。另外,“天鹅”一直在海南岛上空盘旋,与“莫拉克”存在相互作用。李英等(2009)研究认为,“天鹅”与“莫拉克”之间有对流云团和水汽能量的交换,使得“天鹅”西移入海之后再次加强。“莫拉克”也获得了“天鹅”的正涡度环流及水汽供应。二者相互牵制,导致“莫拉克”强度维持时间较长,移动速度缓慢(5~10 km/h)。9日8时20分,“莫拉克”登陆福建(图略),由于下垫面影响,迅速减弱为强热带风暴,

并沿引导气流向北偏东方向移动。

3 试验设计

本文利用WRF模式对0908号台风“莫拉克”及强降水进行了高分辨率模拟,模拟时段为2009年8月6日12时至9日12时。模拟初始场和边界条件由NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) $1^\circ \times 1^\circ$ 的格点资料(间隔6小时)形成,模拟区域如图3所示,中心为(25.5°N, 124°E),采用三层双向嵌套,由外到内各区域格点数分别为 211×181 、 271×301 、 241×301 ,水平分辨率分别为18 km、6 km、2 km,垂直方向为35个 σ 层,时间步长为45 s。模拟区域的外层和中层采用Kain-Fritsch积云对流参数化方案,内层未使用积云参数化方案;外层采用WSM-3微物理方案,中层和内层为WSM-5方案;同时采用YSU边界层方案。

4 模拟结果验证及分析

4.1 台风路径及强度

图 4 给出了模拟与观测的“莫拉克”台风路径及强度对比。6 日 12 时到 9 日 12 时，模拟的台风中心先沿西北偏西方向移动，登陆台湾以后，路径发生一定的偏折，再次入海以后沿偏北方向移动（图 4a）。与美国联合台风预警中心（the Joint Typhoon Warning Center, 以下简称 JTWC）、日本气象厅东京区域专业气象中心（the Regional Specialized Meteorological Center, 以下简称 RSMC）以及上海台风研究所（the Shanghai Typhoon Institute, 以下简称 STI）三家发布的最佳路径相比，模拟路径与实况基本一致，但略有偏折。起始阶段

模拟路径偏北。登陆台湾前后，由于地形的影响，模拟的台风路径发生明显偏折，经过一段时间调整后（约 12 h），又逐渐接近实况路径。台风中心移速方面，在登陆台湾前，模拟的台风中心移速与实际移速相近，随后偏快。尤其在台风中心移动到台湾海峡之后，实际移速降低到 5~10 km/h。这个时段内，模拟的台风中心在海上移速较快，导致登陆时间偏早约 6 h；模拟路径偏向实际路径的东北侧，模拟的登陆地点位于实际登陆点的北偏东约 0.5° 纬距处。其原因可能是“莫拉克”与其他热带气旋之间的相互作用对其路径和移速产生了一定影响，而模式对于这种相互作用的模拟能力尚有待提高。总体来看，模拟结果能够把握“莫拉克”台风移动轨迹的主要特征。

台风强度方面（这里指台风中心附近最低气压），在整个模拟时段内，STI 与 RSMC 数据集的一致性较高，JTWC 资料与前二者差异较大，强度明显偏弱（差值最大达到 25 hPa，最小 7 hPa，图 4b）。模拟的台风中心最低气压的时间演变与 RSMC 资料最为接近（图 4b），很好地再现了“莫拉克”登陆台湾之后中心强度迅速减弱的特征。因此可以认为模拟的台风中心强度在很大程度上与实况相近，整体上再现了“莫拉克”台风发展演变过程中主要的强度变化特征。

4.2 降水对比

图 5 为 8 日 00 时的 24 h 累积降水实况与模拟结果对比。大陆观测降水主要分布在浙江、福建两

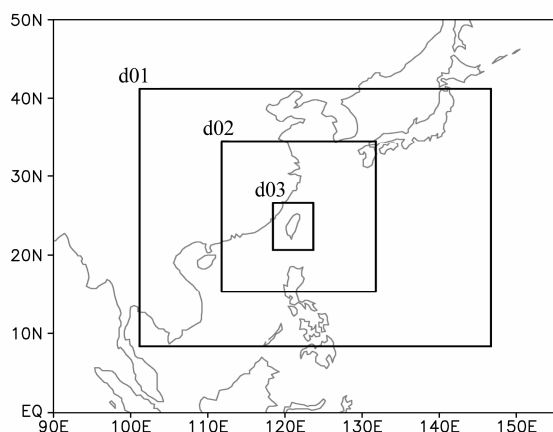


图 3 数值模拟区域示意图

Fig. 3 The illustration of numerical simulation domains

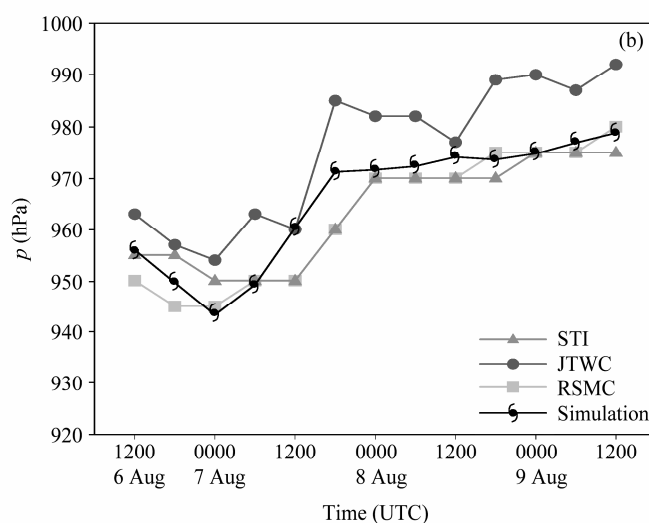
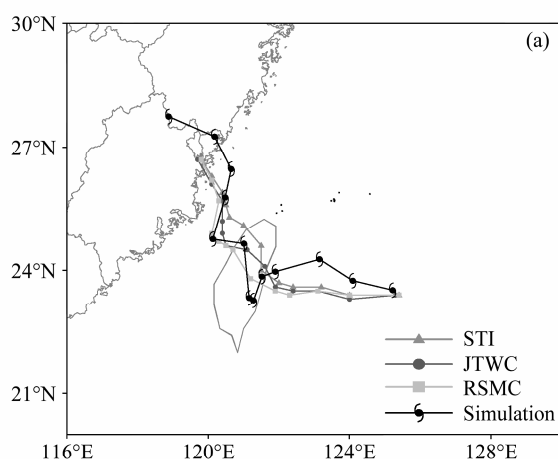


图 4 JTWC（深灰线及圆点）、RSMC（浅灰线及正方形）、STI（灰线及三角形）最佳路径（a）与台风中心最低气压（b）与相应的模拟结果（黑线及台风符号）对比（时间间隔均为 6 小时）

Fig. 4 Six-hourly (a) tracks and (b) minimum sea level pressure of Typhoon Morakot derived from JTWC, RSMC, STI and the corresponding model simulation results (6 h interval)

省, 呈东北—西南向的狭长带状, 最强降水发生在两省交界处, 达到 50 mm 以上。模拟的降水区域与实况降水范围大致相同, 同时模拟出了浙闽交界处的强降水中心。浙北的模拟降水较实况偏强。9 日 00 时, 24 h 累积降水大于 25 mm 的区域如图 6 所示, 观测到的浙江、福建降水强度明显增强, 最大 24 h 累积降水达到 200 mm 以上, 中心仍位于浙闽交界处。模式结果显示的降水量也普遍达到 75 mm 以上, 最强降水落区与强度均与实况保持高度一致, 但是整体上雨强较实况偏弱。总体来看, 模式对降水的模拟比较成功, 能很好地再现降水的落区、走向以及强降水中心。

4.3 水汽条件诊断分析

图 7 可见, 造成此次暴雨的一个主要原因是强盛的西南季风持续向东输送水汽。8 月 7 日 850 hPa 高度上 (图 7a), 西南季风水汽输送带途经孟加拉湾、南海, 与西太平洋的水汽随着台风环流进入台湾以及大陆上空, 最大水汽输送出现在台风中心的东南侧, 达到 $40 \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$ 以上, 其次为东北侧。水汽输送的不均匀性也反映了“莫拉克”的非对称环流结构特征。当日, “莫拉克”在台湾南部造成的降水普遍超过 100 mm, 其中玉山站达到 506.7 mm。8 日 (图 7b), 台风中心穿越台湾岛继续西移过程中, 其东南部的水汽输送加强。正是该

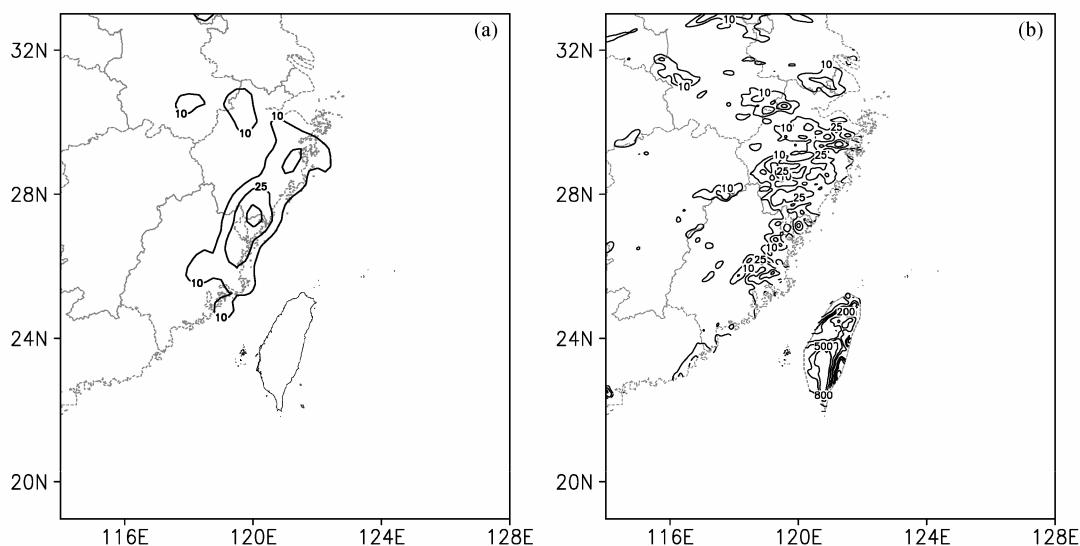


图 5 2009 年 8 月 8 日 00 时的 24 h 累积降水 (a) 实况与 (b) 模式模拟结果 (单位: mm)

Fig. 5 The 24-h accumulated rainfall (a) observation and (b) simulation (unit: mm) at 0000 UTC 8 Aug 2009

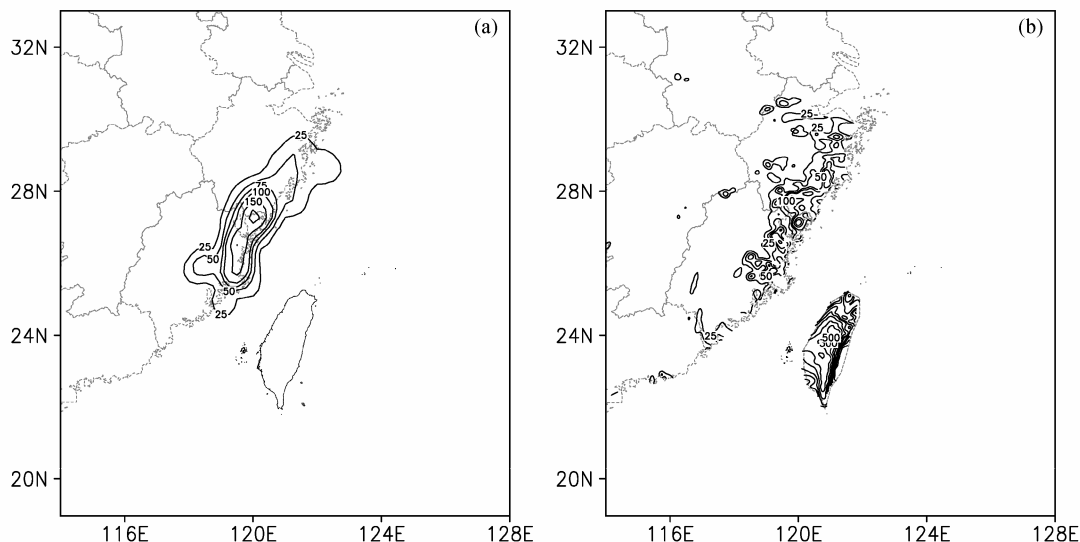


图 6 2009 年 8 月 9 日 00 时 24 h 累积降水 (a) 实况与 (b) 模式模拟结果 (单位: mm)

Fig. 6 The 24-h accumulated rainfall (a) observation and (b) simulation (unit: mm) at 0000 UTC 9 Aug 2009

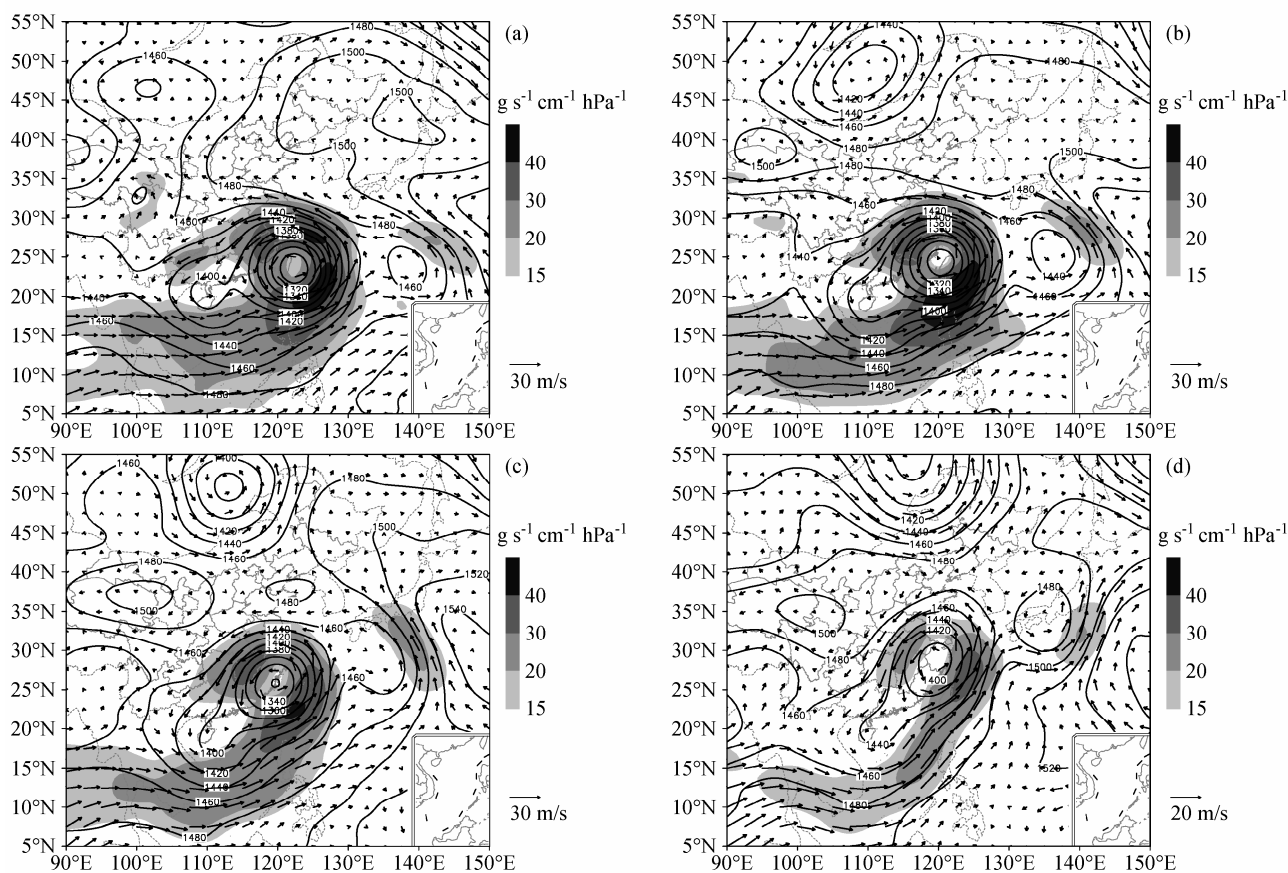


图7 暴雨期间850 hPa高度场(实线, 单位: gpm)、风场(箭头)及水汽通量(阴影, 单位: $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{hPa}^{-1}$): (a) 8月7日; (b) 8月8日; (c) 8月9日; (d) 8月10日

Fig. 7 850-hPa geopotential height (solid contour, unit: gpm), wind (vector), and water vapor flux (shaded) fields during the torrential rain period: (a) 7 Aug; (b) 8 Aug; (c) 9 Aug; (d) 10 Aug

支西南气流给台湾中南部带来了强降水, 十余站点日降水量超过 250 mm; 台风中心北侧的水汽输送导致我国东南沿海地区遭遇暴雨袭击, 损失惨重。9日(图7c)开始, 随着“莫拉克”的第二次登陆以及向北移动, 其强度和水汽输送明显减弱, 降水区也自南向北移动。到10日(图7d), 水汽输送带减弱、断裂, 我国大陆部分降水主要在江苏省境内, “莫拉克”也趋于消亡。

4.4 暴雨落区的动力学诊断与预报分析

台风是具有暖心结构和深对流特征的暴雨系统, 针对台风暴雨, 本文主要运用广义湿位温 θ^* , 对流涡度矢量CVV以及水汽散度通量 G 三个因子。

Gao and Cao (2007) 在相当位温定义中引入一个权重函数, 得到广义湿位温因子定义:

$$\theta^* = \theta \exp \left[\frac{L}{c_p} \frac{q_s}{T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right], \quad (1)$$

其中, θ 为位温, L 为相变潜热, c_p 为比定压热容,

q 为比湿, q_s 为饱和比湿, T 为凝结温度, k 取 45。由于真实大气既不是绝对的干空气, 也不是处处饱和的湿空气, 而是非均匀饱和大气, 权重函数 $(q/q_s)^k$ 的取值范围在 0~1 之间, 因此, 广义湿位温可以描述真实大气中凝结随着湿度增加而增加的事实。暴雨过程中, 实际大气即非均匀饱和大气, 用广义湿位温来描述较为恰当。

鉴于深对流系统中湿等熵面与垂直涡度夹角较小, 甚至几乎平行, 导致涡度($P_v = \xi_a \cdot \nabla \theta_e / \rho$, ξ_a 为绝对涡度, θ_e 为相当位温, ρ 为密度)信号较弱, Gao et al. (2004a, 2007) 研究热带深对流系统时引入对流涡度矢量($\text{CVV} = \xi_a \times \nabla \theta_e / \rho$, 各项意义同前), 将这类系统发生发展的动力过程与热力过程有机地结合在一起。其结果表明, 对流涡度矢量垂直分量有较大的量值, 是对深对流发展描述较好的物理量。赵宇等(2009)利用非静力中尺度模式 ARPS 研究一次华北暴雨过程时指出, 整层积分的对流涡度矢量垂直分量高值区与云中水凝物高

值区有非常好的相关性,可以代表云和对流系统的发展。台风是典型的具有深对流特征的天气系统,且造成暴雨的大气具有典型的非均匀饱和特征,因此本文试图将绝对涡度矢量与广义湿位温梯度构造的对流涡度矢量,即 $CVV^* = \xi_a \times \nabla \theta^* / \rho$ 应用于台风降水落区的分析。等压坐标系下,其垂直分量形式为:

$$CVV_z^* = \frac{1}{\rho} \left[\left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial y} - \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial x} \right], \quad (2)$$

其中, u, v, ω 分别为等压坐标系中纬向、经向及垂直方向的速度, ρ 为大气密度。经过尺度分析,略去小项后,在等压坐标系下,可得对流层中低层(850 hPa 到 500 hPa)的 CVV_z^* 的垂直积分量,并取绝对值(由于水汽主要集中在对流层中低层, CVV_z^* 量值较为显著):

$$CVV_{sumz}^* = - \int_{850hPa}^{500hPa} \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial v}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial x} \right] dp. \quad (3)$$

冉令坤等(2009)在研究 2007 年夏季华北暴雨和 2008 年年初南方地区大范围冰雪凝冻天气过程的降水落区问题时,将水汽的水平散度与垂直运动这两个造成暴雨的关键因子联系起来,并且考虑到强降水过程中的水汽因素,构造出一个新的宏观物理量——水汽散度通量:

$$G = \frac{\omega}{\rho} \left[\frac{\partial(uq)}{\partial x} + \frac{\partial(vq)}{\partial y} \right], \quad (4)$$

其中, q 为比湿。水平方向上的水汽辐合辐散是诊断暴雨系统发展演变的重要物理量,但是水平散度与暴雨落区并不是完全对应的。由于水汽主要集中在对流层中低层,因此,该因子侧重于强调与暴雨密切相关的对流层中低层的动力学结构。将对流层中低层(850 hPa 到 500 hPa)的 G 进行积分,得到:

$$G_{sum} = - \int_{850hPa}^{500hPa} \frac{\omega}{\rho} \left[\frac{\partial(uq)}{\partial x} + \frac{\partial(vq)}{\partial y} \right] dp. \quad (5)$$

台风暴雨区典型的垂直动力结构即由低层大气辐合、高层大气辐散引发强烈的上升运动,这种情况下水汽散度通量为正值,从物理意义上,水汽散度通量能够描述对流层中低层水汽辐合向上输送的过程。本文将水汽散度通量的积分量 G_{sum} 用于台风暴雨落区的分析,研究其是否对台风暴雨也具有一定的诊断和预报意义。

4.4.1 广义湿位温

利用高分辨率模拟资料,分别对暴雨中心所在

的经度带 $121^\circ\text{E} \sim 121.5^\circ\text{E}$ 和 $120.5^\circ\text{E} \sim 121^\circ\text{E}$ 作 θ^* 纬向平均的垂直剖面图(图 8a, b)。9 日 06 时,模拟的我国东部沿海的暴雨区位于 $23^\circ\text{N} \sim 31^\circ\text{N}$, 相应的纬向平均垂直剖面图上(图 8a),降水极值区 θ^* 呈现明显的“漏斗状”等值线分布,即降水区上空等 θ^* 线密集,近乎垂直,水平梯度较大,图中显示 θ^* 从 1000 hPa 到 250 hPa 附近均有明显的信号。“漏斗状”区域附近,两侧气团的冷暖对比显著,并伴随强烈的上升运动(图略),因此降水强度较大。随着“莫拉克”中心向西北方向移动,到 12 时(图 8b),模拟的强降水区主体位于 $28^\circ\text{N} \sim 31^\circ\text{N}$, 其上空 θ^* 的“漏斗状”等值线分布更为集中,300 hPa 以下信号十分强烈,该区域与强降水极值中心的对应关系也十分显著。此时,降水的次极值中心位于 23°N 与 25°N 附近, θ^* 等值线也较为陡立和密集,但该纬度带“漏斗状”区域较为浅薄,最深仅达到 450 hPa 附近,不利于对流系统发展,降水强度偏弱。总体来看,垂直剖面上,等 θ^* 线的“漏斗状”区域与暴雨落区十分吻合。 θ^* 作为对位温和相当位温的改进形式,不仅具备守恒性(Gao and Cao, 2007),而且能够对降水落区提供一定的指示信息。在实际业务中,利用模式预报的基本量计算出的 θ^* ,可以作为预报暴雨落区的有效工具。

4.4.2 垂直运动及对流涡度矢量

“莫拉克”引发的强降水不仅依赖于充足的水汽输送,也与强烈的垂直运动密不可分。下面针对“莫拉克”登陆我国大陆前后的 9 日 00 时至 12 时,沿着观测强降水中心自西南向东北做直线 [$(25^\circ\text{N}, 117^\circ\text{E})$ 到 $(31^\circ\text{N}, 123^\circ\text{E})$] (图 9a, b, c),分析沿该直线的垂直剖面图上模拟的垂直运动的分布(图 9d, e, f)。填色长方形标注的区域即实况降水主体所在区域。9 日 00 时主要降水位于浙江和福建的沿海地区(图 9a),浙闽交界处的 6 h 累积降水达到 50 mm 以上。模拟的雨区西南部的上升运动较弱,东北部上升运动旺盛,与观测降水北多南少的分布是相吻合的。强对流中心位于 $28^\circ\text{N} \sim 29^\circ\text{N}$, 南部对流中心最大上升速度达到 1.0 m/s, 高度在对流层中部 500 hPa 附近;北侧上升运动最强区位于 200~300 hPa, 且一直延伸至对流层顶附近。这表明“莫拉克”引发强降水期间的上升运动强烈,贯穿整个对流层。随着台风中心向我国大陆逼近,9 日 06 时(图 9b),沿海地区上空

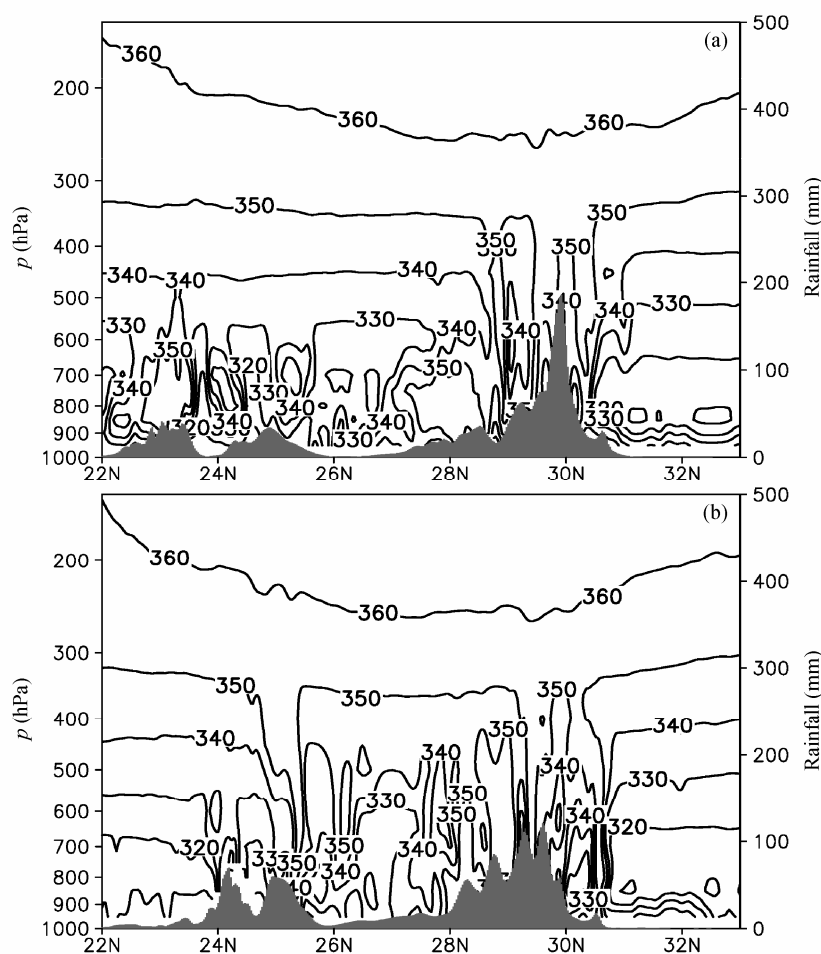


图8 模拟的 (a) 9日06时强降水中心区域 ($121^{\circ}\text{E}\sim 121.5^{\circ}\text{E}$) 与 (b) 9日12时强降水中心区域 ($120.5^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$) θ^* 纬向平均的经向垂直剖面 (等值线, 单位: K)。阴影为模拟的6小时累积降水量 (单位: mm)

Fig. 8 The meridional-vertical cross sections of the zonal mean of θ^* (contour, unit: K) and 6-h accumulated rainfall (shaded) along (a) heavy rainfall region ($121^{\circ}\text{E}\sim 121.5^{\circ}\text{E}$) at 0600 UTC 9 Aug and (b) heavy rainfall region ($120.5^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$) at 1200 UTC 9 Aug

的垂直运动较前一时刻增强, 原雨区上空的弱上升中心 (27.5°N 附近) 发展壮大, 对流高度伸展到 100 hPa; 北侧 (29.5°N 附近) 亦存在深厚的强对流区。在有充沛水汽供应的情况下, 该时段 (9日00~06时) 浙江东南部及福建东北部累积降水大幅增加, 部分站点甚至超过 100 mm。9日12时 (图9c), 由于“莫拉克”已二次登陆, 逐渐减弱填塞。雨区北部的上升运动主要集中于对流层中低层, 南部上升中心几乎消失, 该时段的实况强降水区也北移减弱。因此, 9日00~12时这个时段内, 模拟的垂直运动与地面观测降水对应较好, 模拟结果是比较理想的。

运用 6 h 一次的 NCEP-GFS 预报场资料计算的 $\text{CVV}_{\text{sumz}}^*$ 分布如图 9a, b, c。图中可见, $\text{CVV}_{\text{sumz}}^*$ 高值区 ($\text{CVV}_{\text{sumz}}^* \geq 0.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$) 大致能够反映实况降水区域, 其覆盖范围较雨区偏广, 对于台风暴雨落区有一定的预报意义。强降水

中心与 $\text{CVV}_{\text{sumz}}^*$ 极值中心的对应关系并不十分显著, 而是大多位于其梯度大值区附近。虽然垂直积分的 CVV 垂直分量高值区与云中水凝物高值区有较好的对应关系, 而水凝物含量高的区域有利于云的发展, 进一步有利于这一带降水的形成 (赵宇和高守亭, 2008)。但值得注意的是, 对流系统的发生发展与降水的发生发展在时间和空间上并不同步, 并且由 (2) 式可知, CVV_z^* 主要体现了湿大气中水平风的垂直切变引起的次级环流与湿斜压性的变化及其相互作用, 通过 CVV_z^* 与云中水凝物的较好的相关关系来联系导致降水的最直接过程——云微物理过程。因此, $\text{CVV}_{\text{sumz}}^*$ 的分布与降水落区有所差异是不可避免的。但总体上, $\text{CVV}_{\text{sumz}}^*$ 的分布能够为暴雨落区提供信号, 在暴雨落区预报方面具有一定的指示意义。

图 10 为 $\text{CVV}_{\text{sumz}}^*$ 高值区 (基于 GFS 预报场资

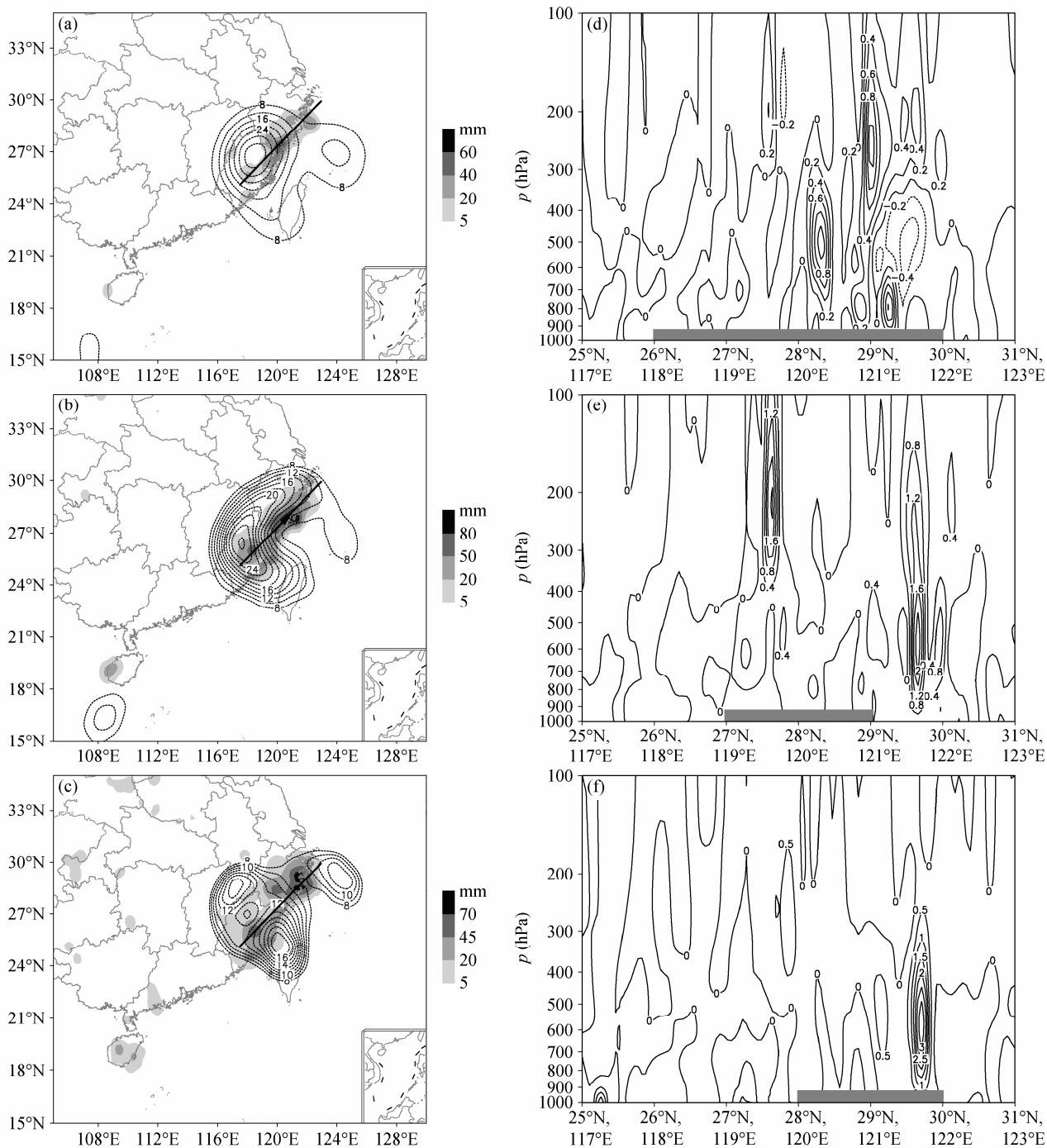


图9 (a)9日00时、(b)9日06时、(c)9日12时 CVV^*_{sumz} 做出的6h降水落区预报(黑色点线,单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$)和实况6h累积降水(阴影区);模拟的(d)9日00时、(e)9日06时、(f)9日12时沿实况暴雨中心直线[(25°N, 117°E)到(31°N, 123°E)]所作剖面上的垂直速度(等值线,单位: m s^{-1})和实况强降水区(灰色矩形)

Fig. 9 The 6-h torrential rainfall location forecast based on CVV^*_{sumz} (dotted contour, unit: $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$) and observed 6-h accumulated precipitation (shaded) at (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC on 9 Aug; simulated vertical velocity on the cross section along the line [(25°N, 117°E)–(31°N, 123°E)] (contour, unit: m s^{-1}) and observed heavy rainfall range (gray rectangular) at (d) 0000 UTC, (e) 0600 UTC, (f) 1200 UTC on 9 Aug

料)与观测降水的时间演变对比。8日00时到9日12时,强降水带主体位于119.5°E~120.5°E,该经度带内平均的6h累积降水主要分布于26°N~

29°N之间。图中 CVV^*_{sumz} 的时间演变与降水比较相似,其分布在纬向上覆盖范围较广,且随时间偏向北一侧。但整体上, CVV^*_{sumz} 与雨区的匹配较好,

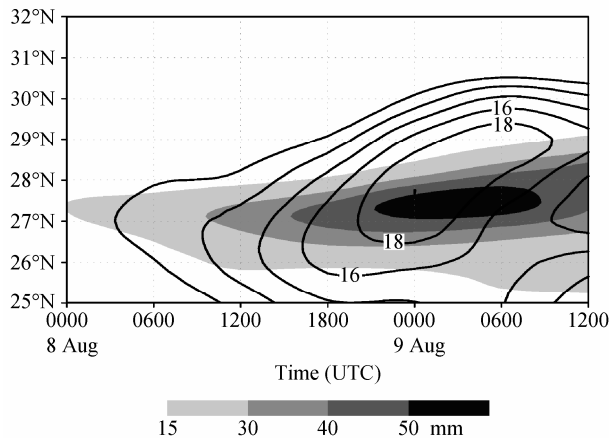


图 10 利用 NCEP-GFS 预报场资料(间隔为 6 h)计算的强降水带(119.5°E~120.5°E)上空平均的 CVV^*_{sum} (等值线, 单位: $10^{-6} m^2 s^{-1} K kg^{-1}$) 与同经度带平均的地面观测 6 h 累积降水量(阴影区)的时间演变(2009 年 8 月 8 日 00 时至 9 日 12 时)

Fig. 10 The time evolution of meridional mean of CVV^*_{sum} (calculated with NCEP-GFS forecast products of 6-h interval) (contour, unit: $10^{-6} m^2 s^{-1} K kg^{-1}$) and observed 6-h accumulated rainfall (shaded) over the rainstorm area (119.5°E–120.5°E) from 0000 UTC 8 Aug to 1200 UTC 9 Aug

对该区域降水落区有预报意义。这为台风暴雨预报提供了一个新线索。但对于不同个例, 其预报时效可能有所不同, 因此还需要更多个例进行试验, 以得到更可靠的结论。

4.4.3 水汽散度通量

同样的, 利用 GFS 预报场资料计算 8 日 18 时至 9 日 12 时的垂直积分的水汽散度通量 G_{sum} , 其分布如图 11。该因子在我国沿海地区的分布与对应的实况 6 h 累积降水落区较为一致, 并且其极值中心的分布与降水最强区域的偏离程度较小。9 日 06 时的观测降水在福建和浙江两省各存在一个极值中心, G_{sum} 成功地指示出了这两个中心, 其极值区略偏向实际降水中心的东北方(图 11c)。12 时, G_{sum} 对浙江东部沿海强降水中心的判断十分准确(图 11d), 同时, 该因子也捕捉到了 0907 号热带风暴“天鹅”的降水影响区域。这是由于水汽散度通量将垂直运动及水汽的水平辐合辐散联系在一

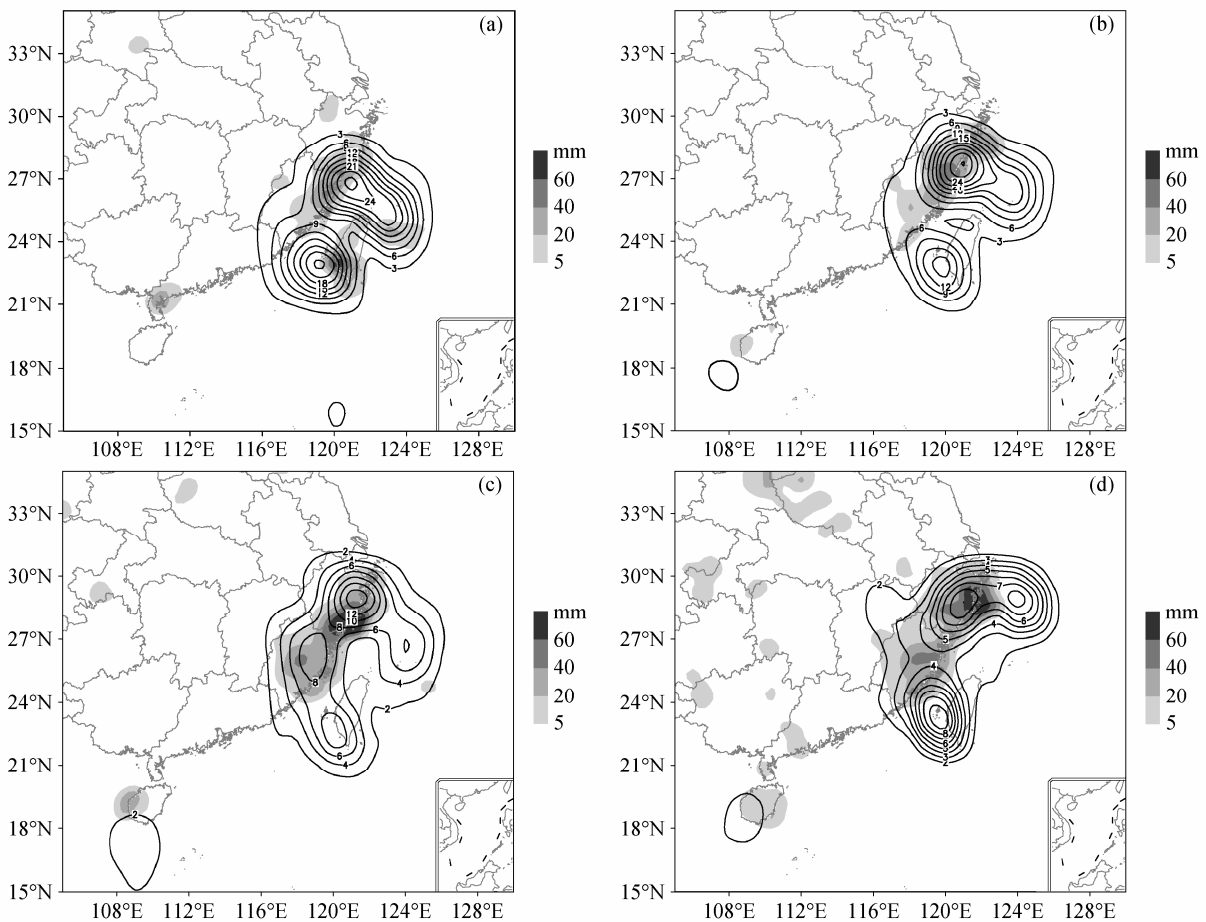


图 11 利用 NCEP-GFS 预报场资料(间隔为 6 h)计算的 G_{sum} (等值线, 单位: $10^{-3} kg^{-1} m^3 Pa s^{-2}$) 与实况 6 h 累积降水(阴影区)的水平分布: (a) 8 日 1800 UTC; (b) 9 日 0000 UTC; (c) 9 日 0600 UTC; (d) 9 日 1200 UTC

Fig. 11 The horizontal distribution of G_{sum} calculated with 4-times daily GFS forecast product (contour, unit: $10^{-3} kg^{-1} m^3 Pa s^{-2}$) and observed 6-h accumulated rainfall (shaded) at (a) 1800 UTC 8 Aug, (b) 0000 UTC, (c) 0600 UTC, and (d) 1200 UTC on 9 Aug

起, 结合了造成暴雨的最关键的两个因子, 能够更准确地描述造成暴雨的核心动力结构, 因此该因子在诊断和预测暴雨落区方面均有显著的优势, 并且可以提高对强降水中心位置判断的准确度。

5 小结

本文运用中尺度非静力模式 WRF 对 0908 号台风“莫拉克”两次登陆过程进行了高分辨率数值模拟, 并利用观测资料对模拟结果进行了验证。进一步, 利用 NCEP 再分析资料, GFS 预报场资料和模式输出的高分辨率资料, 分析了“莫拉克”在我国东南沿海造成的强降水的水汽条件及垂直运动, 运用对流涡度矢量、广义湿位温和水汽散度通量三个动力因子对本次强降水过程进行了诊断和预报分析, 得到以下结论:

(1) 模式对台风中心的移动路径和强度的模拟比较成功, 24 小时累积降水落区与实况较为一致, 但雨强略偏弱。

(2) 造成强降水的水汽主要由西南季风输送, 水汽充足且持续时间长。雨区上空为较强的上升运动区, 对流深厚。充足的水汽以及强烈的上升运动是造成此次强降水过程的直接原因。

(3) 运用广义湿位温 θ^* 、对流涡度矢量垂直分量 CVV_z^* 和水汽散度通量 G 对暴雨落区进行诊断和预报。其中, θ^* 在垂直剖面图上的“漏斗状”区域与暴雨落区对应关系十分显著。用每日四次的 NCEP-GFS 资料计算的 CVV_{sumz}^* 和 G_{sum} 进行预报分析, 发现 CVV_{sumz}^* 大致能够反映实况降水落区, 强降水中心大多位于其梯度大值区附近; 其时间演变与降水的时间演变比较相似, 说明 CVV_{sumz}^* 对降水落区及其发展移动具有一定的指示意义。水汽散度通量结合了水汽散度和垂直运动两个关键因子, 做出的落区预报更为准确, 在强降水中心的位置判断方面也具有一定优势。综上, 将这些因子结合起来, 对于做出较为准确的台风强降水落区预报是十分有益的。未来将对更多台风个例展开类似研究, 以期能构造出物理意义更为完善、对台风暴雨的落区甚至强度具有更优的诊断及预报效果的动力因子。

参考文献 (References)

陈洪滨, 范学花. 2010. 2009 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 15 (3): 322-336. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2010. Some extreme events of weather, climate and related

phenomena in 2009 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (3): 322-336.

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 Zhexian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 541-549.

Chen Lianshou, Li Ying, Cheng Zhengquan. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (5): 967-976.

Ebert E E, McBride J L. 2000. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors [J]. J. Hydrol., 239: 179-202.

Gao S T, Cao J. 2007. Physical basis of generalized potential temperature and its application to cyclone tracks in nonuniformly saturated atmosphere [J]. J. Geophys. Res., 112: D18101, doi: 10.1029/2007JD008701.

Gao S T, Ping F, Li X F, et al. 2004a. 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.

Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004b. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 31: L12113, doi: 10.1029/2003GL019152.

Gao S T, Cui X P, Zhou Y S, et al. 2005a. A modeling study of moist and dynamic vorticity vectors associated with 2D tropical convection [J]. J. Geophys. Res., 110: D17104, doi: 10.1029/2004JD005675.

Gao S T, Zhou Y S, Lei T, et al. 2005b. Analyses of hot and humid weather in Beijing city in summer and its dynamical identification [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 48 (Suppl. II): 128-137.

Gao S T, Li X F, Tao W K, et al. 2007. Convective and moist vorticity vectors associated with tropical oceanic convection: A three-dimensional cloud-resolving model simulation [J]. J. Geophys. Res., 112: D01105, doi: 10.1029/2006JD007179.

李英, 陈联寿, 李勋. 2009. 台风莫拉克 (0908) 与天鹅 (0907) 相互作用对其强度的影响研究 [C]// 2009 年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京: 中国气象学会. Li Ying, Chen Lianshou, Li Xun. 2009. The interaction between Typhoon Morakot (0908) and Goni (0907) and its impact on the intensity of Typhoon Morakot [C]. Book of Abstracts of Workshop on East Asia Meteorological Science & Technology (2009). Beijing: Chinese Meteorological Society.

Olson D A, Junker N W, Korty B. 1995. Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC [J]. Wea. Forecasting, 10: 498-511.

冉令坤, 楚艳丽. 2009. 强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的诊断分析 [J]. 物理学报, 58 (11): 8094-8106. Ran Lingkun,

- Chu Yanli. 2009. Diagnosis of vertical helicity, divergence flux and their extensions in heavy-rainfall event [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 58 (11): 8094–8106.
- 赵宇, 高守亭. 2008. 对流涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究 [J]. *大气科学*, 32 (3): 444–456. Zhao Yu, Gao Shouting. 2008. Application of the convective vorticity vector to the analysis of rainstorm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 67 (4): 540–548.
- 赵宇, 崔晓鹏. 2009. 对流涡度矢量和湿涡度矢量在暴雨诊断分析中的应用研究 [J]. *气象学报*, 67 (4): 540–548. Zhao Yu, Cui Xiaopeng. 2009. Application of convective and moist vorticity vectors in the analysis of a heavy rainfall event [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (4): 540–548.