

登陆孟加拉湾风暴结构个例分析与数值模拟

王曼^{1,3} 李华宏^{2,3} 段旭^{1,3} 刘建宇^{1,3}

(1 云南省气象科学研究所, 2 云南省气象台, 3 季风与气象灾害研究开放实验室, 昆明 650034)

摘要 采用 NCEP-NCAR 再分析资料, 分析了 2006 年 4 月 29 日登陆缅甸并造成云南省强降水过程的孟加拉湾风暴结构。并且利用美国新一代中尺度 WRF(Weather Research and Forecast)模式对 2006 年 4 月 28~30 日云南强降水过程进行了数值模拟研究。结果表明: 孟加拉湾风暴登陆前后结构具有明显变化, 从基本对称结构演变为非对称结构, WRF 模式较好地模拟出孟加拉湾风暴登陆前后环流场特征和风暴移动路径以及造成云南强降水雨带的分布特征。

关键词 孟加拉湾风暴 登陆 结构演变 数值模拟

引言

孟加拉湾是全球热带对流云团和热带风暴活动频繁的区域之一。孟加拉湾风暴(以下简称孟湾风暴)是影响低纬高原地区的重要天气系统。初夏孟湾风暴活跃与否是低纬高原地区雨季开始早迟、雨量多少的重要标志^[1]。因此, 对初夏登陆孟湾风暴进行分析研究是很有必要的。曾有大量工作者进行过孟湾风暴的研究^[2~4], 这些工作主要集中在孟湾风暴大气环流背景特征统计研究及强降水地区的物理量诊断上。对孟湾风暴登陆前后的结构变化研究甚少, 但西太平洋台风在我国登陆前后结构研究较多, 可以借鉴。如张建海等^[5]对比了 Rananim 台风登陆前后结构特征。陈光华等^[6]总结地形对登陆台风结构影响较大。毛冬艳等^[7]用 TRMM 资料分析了台风登陆前后云系结构变化。本文应用 NCEP-NCAR 再分析资料对孟湾风暴登陆前后结构变化进行研究, 以加深对孟湾风暴登陆前后结构变化等方面的认识。

随着数值模式的发展, 利用数值模式对热带气旋进行数值研究已成为一种手段。许美玲^[8]等利用 MM5 模式模拟结果详细研究了孟湾风暴 02b(2004)登陆前后的流场、动力场和热力场结构变化。

WRF(Weather Research and Forecast)模式是美国新一代中尺度数值模式, 刘宁微^[9]等比较了该模式和 MM5 对辽宁暴雨过程的模拟效果, 结果表明 WRF 模式模拟的整体效果好于 MM5 模式, 因此本文利用 WRF 模式对 2006 年 4 月 28~30 日孟湾风暴登陆并造成云南省强降水过程进行数值模拟, 检验 WRF 模式对孟湾风暴的预报能力。进一步加强在孟加拉湾区域出现的热带气旋的研究, 逐步提高对孟湾风暴活动的监测预警能力。

1 资料和模式方案

NCEP-NCAR 资料是分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度、6 h 一次全球再分析资料。利用 2006 年 4 月 28 日 12:00UTC 到 4 月 30 日 00:00UTC 时段资料分析孟湾风暴结构。

WRF 模式是美国多单位联合研制的新一代细网格中尺度模式, 本文采用 2006 年 1 月 30 日发布的 2.1.2 版本。用 NCEP-NCAR 再分析资料作为模式初始场和边界条件。同时用常规地面和高空资料进入其同化系统。模式的基本参数设置见表 1。其中微物理过程、边界层和辐射过程三重网格选取方案相同。模拟初始积分时间为 2006 年 4 月 28 日 12:00UTC, 积分 48 h, 30 日 12:00UTC 结束。一

云南省科技攻关及高新技术计划(2006SG25)、云南省气象局青年基金“WRF 模式在低纬高原上的应用研究”和云南省气象局业务能力研究建设专项项目“WRF 模式在云南省的业务试运行”共同资助

作者简介: 王曼, 女, 1978 年生, 硕士, 工程师, 从事中尺度天气动力学研究, Email: wangmanbox@163.com

收稿日期: 2007 年 9 月 17 日; 定稿日期: 2008 年 6 月 3 日

重网格 3 h, 二、三重网格每 1 h 输出 1 次模式结果。

表 1 试验设计参数说明

项目	方案
区域	嵌套: 三重; 格距: 90 km, 30 km, 10 km 中心: 26°N, 99°E; 格点: 60×70, 61×61, 97×97
积云参数化	Betts-Miller-Janjic, Kain-Fritsch, Kain-Fritsch
微物理过程	Lin et al. 方案
边界层	高分辨率 MRF 方案
辐射	Dudhia 短波和 RRTM 长波

2 孟湾风暴结构演变特征

孟湾风暴 Mala 于 2006 年 4 月 24 日 18:00 UTC 在孟湾中南部生成。处在阿拉伯副高与西太平洋副高辐合带中。生成初期, 两高势力相当, 风暴基本上沿西太平洋副高西侧偏南气流向北缓慢移动, 强度不断加强。与此同时, 中纬度地区阻塞高压向东倾斜, 在青藏高原东南侧 28°N 附近形成横槽, 由于脊前偏北气流不断引导冷空气下滑, 随着冷空气在横槽附近堆积, 横槽开始向东南方向移动, 槽前西南气流和副高外围西南气流引导风暴 Mala 向东北方向移动。29 日 12:00 UTC 左右 Mala 在缅甸西部 (94.55°E, 18.4°N) 登陆, 登陆减弱后的风暴低气压并入西风槽。30 日 00:00 UTC 之后消失。受风暴低压和高原东侧下滑冷空气影响, 30 日云南出现全省性强降水过程。同时由于孟加拉湾呈喇叭口形状, 其北部、东北部为青藏高原和云贵高原, 孟湾风暴东北方向登陆时受大地形影响较大。

根据风暴登陆消失的时间, 本文定义 2006 年 4 月 29 日 00:00 UTC 为登陆前时刻, 29 日 18:00 UTC 为登陆后时刻, 利用登陆前和登陆后时刻的 NCEP-NCAR 再分析资料, 分析登陆孟湾风暴结构演变过程。

2.1 动力结构

从孟湾风暴登陆前的水平环流看, 从低层到高层表现为基本对称、范围较广的圆形气旋性环流特征。850 hPa (图 1a) 环流范围最大, 700~500 hPa 依次减小 (图 1c, e)。且 700 hPa 以上气流转为气旋

性流出, 与台风结构相比^[10], 气旋性流出高度明显降低, 说明孟湾风暴一般强度较台风弱。随着高度的增加风暴中心位置略向东北方向偏移。与未来风暴移动方向一致。孟湾风暴登陆后, 水平环流发生显著变化。低层 850、700 hPa 环流 (图 1b, d) 范围明显减小, 且变为非对称结构。700 hPa 环流中心明显较 850 hPa 中心偏北, 向移动方向倾斜明显, 这可能与青藏高原和云贵高原地形阻挡有关, 风暴系统低层运动滞后于中高层。500 hPa (图 1f) 已经无闭合环流, 风暴已并入西风带的低压槽。表明孟湾风暴明显减弱。

从孟湾风暴登陆前后垂直结构看, 南北方向变化较明显, 因此取经向剖面进行分析。从垂直环流看, 风暴中心附近为一致的上升气流, 上升气流能达到 100 hPa (图 2a)。从垂直速度上看, 风暴中心及北侧的中层都为上升运动。当风暴登陆后 (图 2b), 风暴中心处在上升气流中, 上升气流与下沉气流在 400 hPa 交汇, 中心的北侧形成一个倾斜的交汇带。上升气流的倾斜与东侧的云贵高原和北侧的青藏高原大地形阻挡作用相关。下沉气流与中高纬阻高脊前偏北气流引导的弱的冷空气楔入风暴中心一致。从垂直速度场上看, 风暴中心的北侧出现一条倾斜的上升运动带, 中高层上升运动速度明显加大, 这与前面分析 500 hPa 风暴减弱并入低压槽, 与槽前上升运动有关。

从涡度散度场上看 (图 3a), 风暴中心附近均为较对称正涡度区, 从对流层低层延伸到高层 100 hPa, 最大涡度中心位于 900 hPa 附近。低层辐合, 辐合达到 850 hPa 左右, 中层为无辐散层, 高层辐散。风暴中心北侧从低层到中高层有一条向北倾斜的辐合辐散带, 散度场在登陆前就表现出非对称性。随着孟湾风暴的登陆, 风暴中心附近仍为正涡度区 (图 3b), 涡度值减小明显, 正涡度区只伸展到 150 hPa, 且低层到 500 hPa 有明显北倾的正涡度带。风暴北侧, 倾斜的辐合辐散带加强, 风暴登陆过程中虽然强度减弱, 但与北侧的低压槽合并, 同时登陆后受地形阻挡抬升作用更大, 所以倾斜辐合辐散带维持并加强。

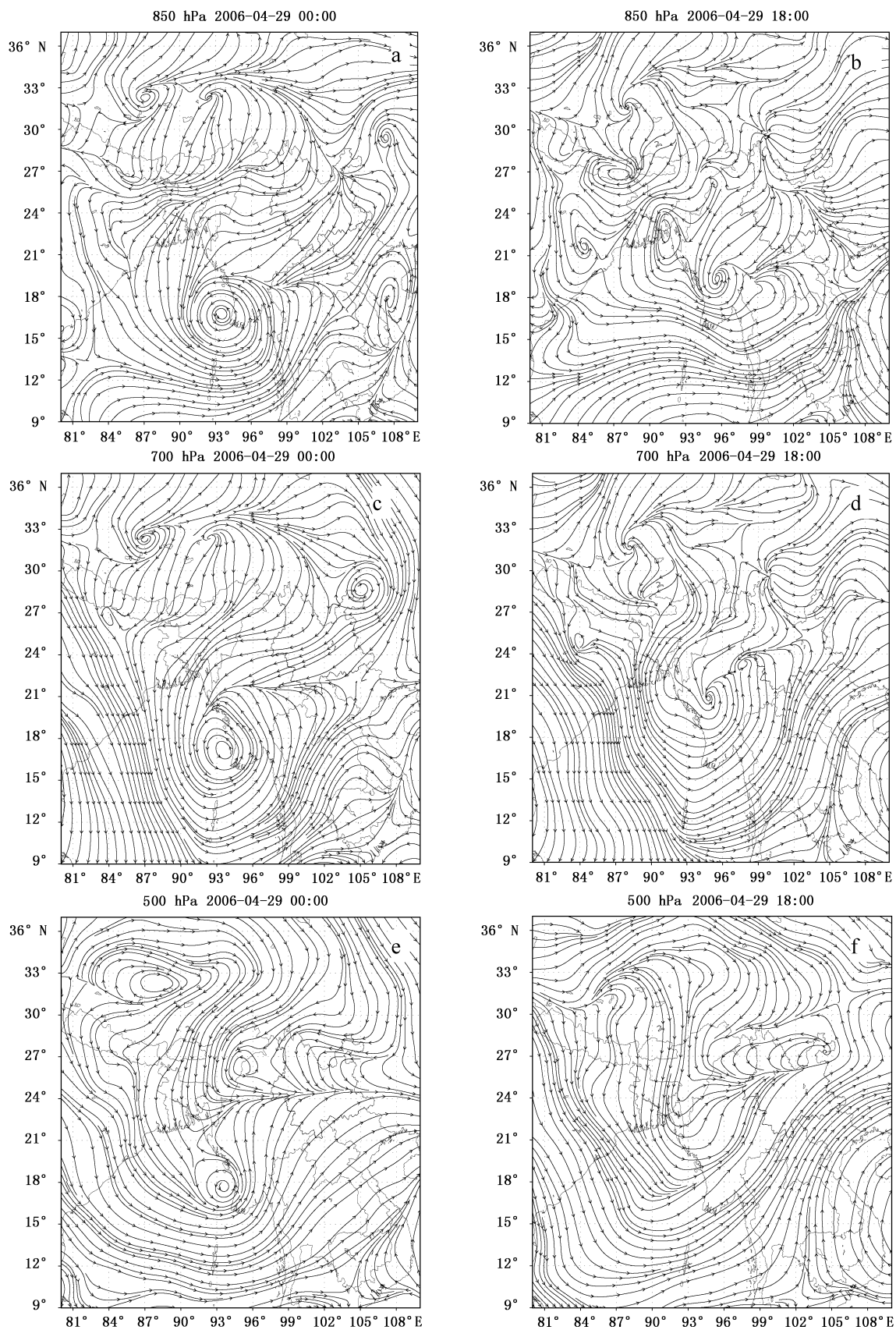


图 1 2006 年 4 月 29 日 850 hPa、700 hPa、500 hPa 00:00 UTC(a,c,e)及 18:00UTC(b,d,f)流场

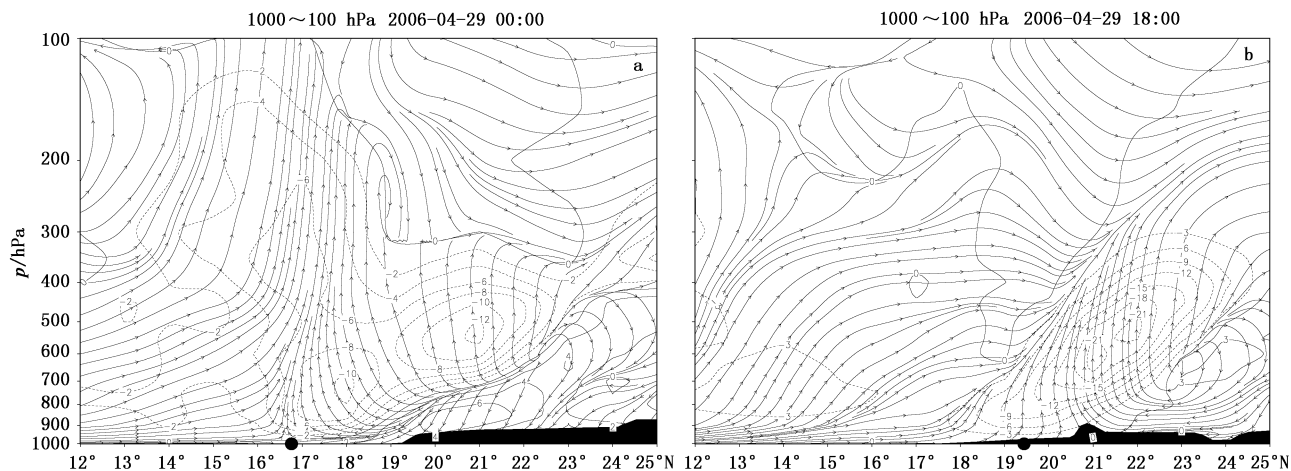


图 2 2006 年 4 月 29 日风暴中心垂直环流流线(用 $V \times (-100 \omega)$ 合成)和垂直速度场(等值线, 单位: $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) 经向剖面: (a) 00:00 UTC, (b) 18:00 UTC (横轴上的黑圆点为风暴中心位置, 阴影部分为地形, 下同)

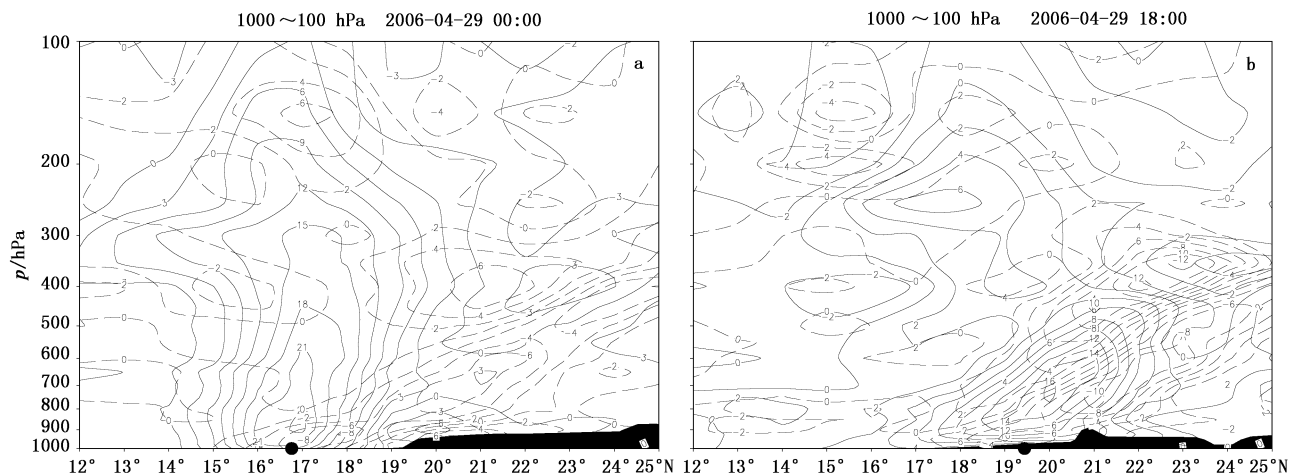


图 3 2006 年 4 月 29 日风暴中心涡度(实线)和散度(断线)经向垂直剖面(单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 00:00 UTC, (b) 18:00 UTC

2.2 热力结构

风暴登陆前后热力结构也发生了明显变化。登陆前(图 4a)风暴中心附近, 750 hPa 以下为相当位温高值区, 中心达到 360 K。风暴中心附近低层为高温高湿区。垂直方向相当位温 θ_e 密集, 梯度变化较大。在对流层中层出现一个相对低值区。风暴中心中高层为比较对称的“V”形结构。登陆后(图 4b), 风暴中心低层的 θ_e 高值区消失, 高层“V”形结构中层出现明显的北倾, 底部明显下凹。北侧等 θ_e 线密集, 与 2.1 节冷空气楔入风暴中心相对应, 以及地形对风暴的阻挡作用, 从而在地面形成明显的冷暖锋区。

3 模拟结果分析

3.1 风暴移动路径

根据 FY-2 静止卫星云图和 NCEP-NCAR 再分析资料来确定其真实路径。图 5 给出了模式模拟孟加拉湾风暴和实况对比。从总的移动路径看, 模拟的孟加拉湾风暴中心位置和实况均向北稍偏东的方向移动。但移动速度上有所差异。模拟初始 18 h 风暴移动较慢, 较实况慢 6 h 左右。但到风暴登陆后移动速度较实况快, 30 日 00:00 UTC 模拟风暴的位置与实况十分接近。

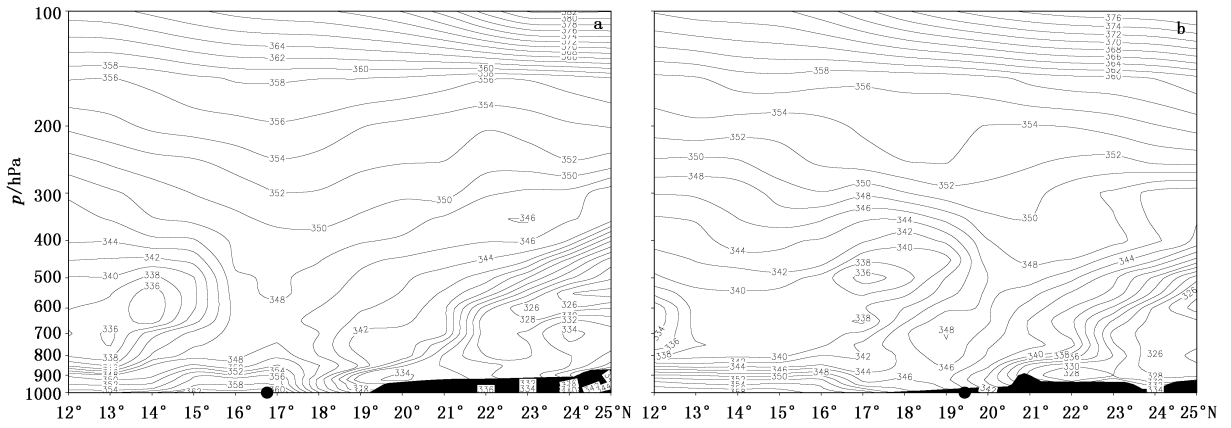


图 4 2006 年 4 月 29 日相当位温经向(通过风暴中心)垂直剖面(单位:K):(a)00:00UTC, (b)18:00UTC

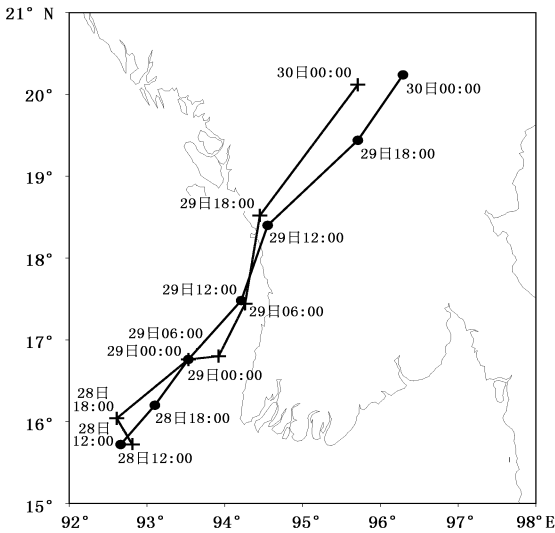


图 5 2006 年 4 月 28 日 12:00UTC 至 30 日 00:00UTC 孟湾风暴中心位置(“·”为实况,“+”为模拟)

3.2 降水模拟分析

孟湾风暴往北偏东方向移动,受其影响,云南省 4 月 29 日 12:00UTC 至 30 日 12:00UTC 出现强降水过程,全省出现 30 站大雨,6 站暴雨,大的降水集中在云南省的西南部,10 mm 以上降水分布具体见图 6a。图 6b 是 WRF 模式模拟的同样时段的降水,与实况对比,模拟的省内的雨带偏小。这与模拟风暴移动速度较实况慢相关。但总的来说 WRF 模式能模拟出风暴造成的降水带和降水量级。

3.3 结构模拟

通过分析 WRF 模式模拟的涡度散度场(图 7),发现在模式模拟风暴登陆前的 29 日 06:00UTC,通过模拟风暴中心的涡度场对称,正涡度区由对流层低层一致伸展到 200 hPa。900 hPa 以下风暴中心附近辐合,以上辐散。风暴在 29 日 18:00 UTC 登陆

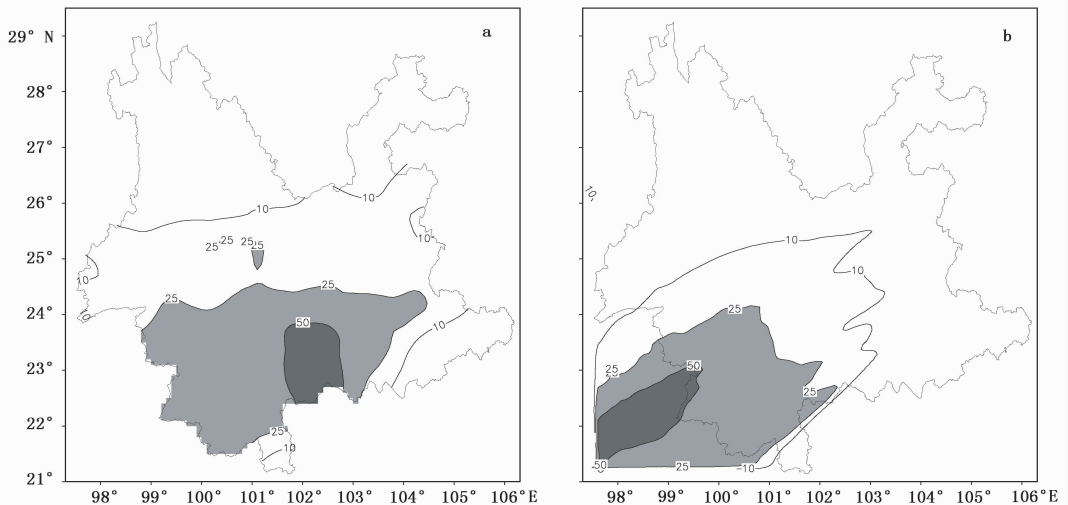


图 6 2006 年 4 月 29 日 12:00UTC 至 30 日 12:00UTC 降水分布(单位:mm): (a) 实况, (b) 数值模拟结果

后,其结构在 3 h 后,即 21:00 UTC 演变较明显,其正涡度带向北倾斜,正涡度区风暴中心伸展到 400 hPa 左右,且在风暴中心的北侧,对流层中层有负涡度区出现。风暴中心北侧出现倾斜弱辐合带。从模拟的涡度散度场与 NCEP-NCAR 再分析资料涡度散度场比,较实况偏弱。但风暴结构从对称到非对称的

演变特征,WRF 模式能较真实再现。从模拟的相当位温看(图 8),29 日 06:00 UTC,风暴中心低层处在较对称高值区。到 18:00 UTC,风暴中心高值区发生明显的随高度增加向北倾斜。且受地形影响,风暴中心北侧的等 θ_e 密集。风暴在登陆前后模拟的热力结构也发生了明显变化。

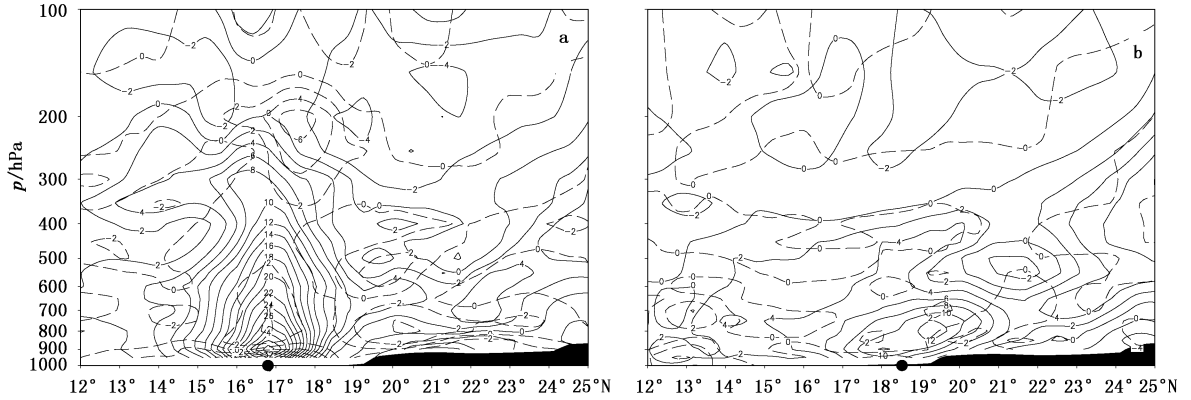


图 7 2006 年 4 月 29 日 WRF 模式模拟涡度(实线)和散度(断线)经向(通过风暴中心)垂直剖面(单位: 10^{-5} s^{-1}): (a) 06:00 UTC, (b) 21:00 UTC

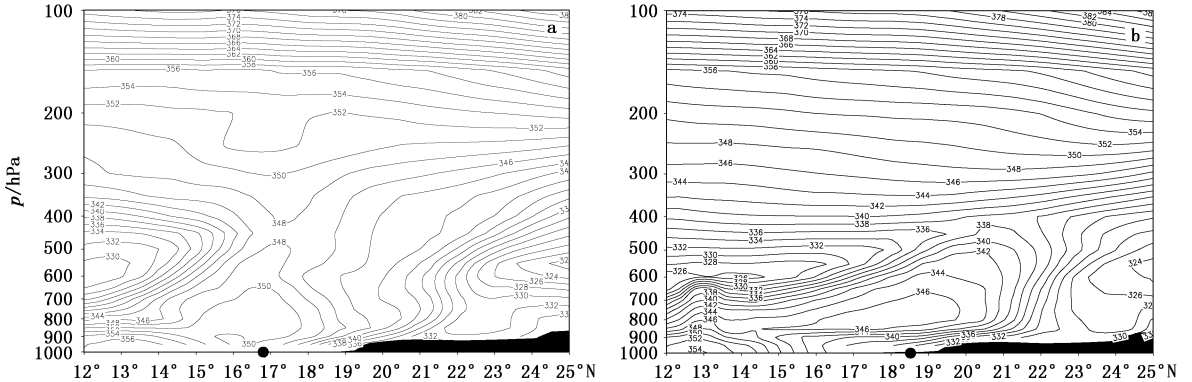


图 8 2006 年 4 月 29 日 WRF 模拟的相当位温经向(通过风暴中心)垂直剖面(单位: K): (a) 06:00 UTC, (b) 21:00 UTC

4 结论与讨论

本文利用 NCEP-NCAR 再分析资料,对 2006 年 4 月 29 日登陆的孟湾风暴的结构进行分析,发现风暴登陆前后,其结构由水平和垂直分布基本对称演变为斜压非对称结构。从风暴的水平流场上看,对流层低层对称的圆形气旋环流演变为非对称环流,对流层中层基本对称圆形环流减弱并入西风带上的西风槽。垂直环流由一致伸展到平流层的上升气流降低到对流层中层。垂直速度场表现为较对称

的上升演变为上升高度降低,且向移动方向倾斜。涡度场表现为对称结构演变为向风暴移动的偏北方倾斜。散度场在风暴登陆前表现为随高度增加北倾的辐合辐散带。相对位温场表现为风暴中心低层的高值区演变为相对低值区,中高层对称结构演变为北倾结构。风暴向北倾斜结构特征对预报风暴移动路径预报有一定的指导意义。与文献[8]讨论的风暴相比,Mala 在登陆前受大气环流和地形的影响,经向方向上向移动方向倾斜结构特征更加明显。而风暴登陆前后的结构演变特征基本一致。

用 WRF 模式对此次风暴进行了数值模拟。该模式模拟风暴登陆前后的路径趋势与实况十分接近,但移动速度在前 36 h 预报较实况偏慢,基本相差 6 h。第 48 h 时模拟风暴位置与实况十分相近。由于移动路径模拟差异,模式模拟的降水带在云南省范围偏小,但量级与实况一致。从模拟风暴动力热力结构上看,该模式基本能再现风暴登陆前后风暴的结构演变特征。

参考文献

- [1] 秦剑, 琚建华, 解明恩. 低纬高原天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 73-74.
- [2] 李英, 郭荣芬, 索渺清, 等. 初夏孟加拉湾对流云团北上低纬高原的初步研究[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 278-284.
- [3] 张秀年, 段旭, 郭世昌. 孟湾风暴合成分析极其中尺度特征[J].

云南大学学报, 2005, 27(2): 133-138.

- [4] 张腾飞, 段旭, 张杰. 初夏孟湾风暴造成云南连续性强降水的中尺度分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(1): 67-73.
- [5] 张建海, 薛根元, 沈桐立. 台风 Rananim 数值模拟试验及其结构特征分析[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 370-375.
- [6] 陈光华, 裘国庆. 热带气旋强度与结构研究新进展[J]. 气象科技, 2005, 33(1): 1-6.
- [7] 毛冬艳, 程明虎. TRMM 资料研究 1999 年 Sam 台风[J]. 气象科技, 2001, 29(2): 37-40.
- [8] 许美玲, 段旭, 张秀年. 登陆孟湾风暴结构演变特征数值模拟研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 1139-1145.
- [9] 刘宁微, 王奉安. WRF 和 MM5 模式对辽宁暴雨模拟的对比分析[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 364-369.
- [10] 段旭, 李英, 许美玲, 等. 低纬高原地区中尺度天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 169-174.

Structure Analysis and Numerical Simulation of a Landing Bengal Storm

Wang Man^{1,3} Li Huahong^{2,3} Duan Xu^{1,3} Liu Jianyu^{1,3}

(1 Yunnan Institute of Meteorology, 2 Yunnan Meteorological Office, 3 Monsoon & Meteorological Disaster Study Lab., Kunming 650034)

Abstract: The NCEP-NCAR data is used to analyze the structures of the Bengal storm landing on 29 April 2006, before and after the landfalling, by means of the WRF (Weather Research and Forecast) meso-scale numerical model. The results show that the structure of the Bengal storm changed remarkably before and after the landfalling, from a symmetric tropical cyclone to a baroclinic asymmetric cyclone, and the structure and moving track of the storm, as well as the rain belt in Yunnan Province, are well reproduced by the WRF model.

Key words: Bengal storm, landfall, structural evolution, numerical simulation