

孟加拉湾风暴 Mala 登陆期间地形敏感试验^{* 1}

王 曼^{1,2} 段 旭^{1,2} 李华宏^{2,3} 刘建宇^{1,2} 符 睿^{1,2}
WANG Man^{1,2} DUAN Xu^{1,2} LI Huahong^{2,3} LIU Jianyu^{1,2} FU Rui^{1,2}

1. 云南省气象科学研究所,昆明,650034

2. 季风与气象灾害研究开放实验室,昆明,650034

3. 云南省气象台,昆明,650034

1. *Yunnan Institute of Meteorology, Kunming 650034, China*

2. *Monsoon & Meteorological Disaster Study Lab, Kunming 650034, China*

3. *Meteorological Observatory of Yunnan Province, Kunming 650034, China*

2009-04-20 收稿,2011-01-26 改回.

Wang Man, Duan Xu, Li Huahong, Liu Jianyu, Fu Rui. 2011. A sensitivity experiment to the orographic effect on the Bengal storm of Mala during its landing. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(3):486-495

Abstract The Bay of Bengal is among the eight areas where tropic cyclones appear frequently. When a Bengal storm moves northward or eastward, it will affect weather over the Qinghai-Tibet Plateau and the westnorthern part of China, and also the large-scale topography of the Qinghai-Tibet Plateau and the Yunnan-Guizhou Plateau will affect the moving path of the Bengal storm. To analyze the effect of the this topography on the path, the structure and the precipitation for the Bengal storm. The Bengal storm of Mala landfall process from 29 to 30 April in 2006 is simulated by the Weather Research and Forecast meso-scale numerical model (WRF). The results show that although there are certain errors between the simulated track and intensity for the storm and the observation, both the general moving tend and the intensity are properly simulated with small errors. The WRF can well simulate the track and precipitation of Mala occurring in Yunnan province. The sensitivity experiment results from the respective schemes with the full height, half height and zero height effect on changes in the storm track are discussed, and the circulation, the dynamical structure and the precipitation over Yunnan are analyzed as well. The results show that before the storm landfall, the topography affects the storm structure in an indirect way, with its structure in higher levels becoming slant. During its landfall, the topographic countercheck and friction are able to significantly affect the moving track and velocity of the storm. After its landfall, the topography caused the storm intensity to weaken and its moving velocity to quicken. On the other hand, its structure goes through the course from a basic symmetric storm to an asymmetric one with evident baroclinicity. The topographic effects on the precipitation are embodies in the two aspects, one is to make the precipitation increase and another is to cause the storm intensity to weaken and thus the precipitation to decrease.

Key words The Bengal storm, The WRF, Sensitivity experiment to the topography, Numerical simulation

摘 要 孟加拉湾是全球8个热带气旋易发生的地区之一。孟加拉湾风暴向偏北和偏东方向移动,会对中国青藏高原和西南地区形成重大影响,而孟加拉湾风暴的移动方向受到青藏高原和云贵高原大地形的影响很大。为了分析大地形对孟加拉湾风暴路径、结构变化和降水分布的作用和影响,文中利用 WRF 模式对 2006 年 4 月 29—30 日孟加拉湾风暴 Mala 的登陆过程进行数值模拟研究。试验结果表明:模拟风暴中心的路径和强度与实况虽有一定误差,但移动趋势均为东北方向,强度误差较小,表明 WRF 模式对本个例的模拟可以参考。通过不同地形高度敏感试验,分析风暴在登陆前后分别在全地形、半地形和零地形高度情况下的移动路径和速度、环流结构、动力结构以及在云南省产生的降水分布和强度。结果表明:风暴登陆前,大

* 资助项目:国家公益性行业科研专项(GYHY201106005, GYHY201006054)。

作者简介:王曼,主要从事中尺度数值预报研究。E-mail: wangmanbox@163.com

地形对风暴结构有间接影响,使高层出现倾斜。在风暴登陆过程中,地形的阻挡和摩擦作用能较明显影响风暴的移动路径和速度。风暴登陆后,地形抬升使风暴强度减弱,移动速度加快;结构由基本对称变为非对称,且斜压结构明显。地形对降水存在双重作用,一方面地形抬升使风暴产生的降水增加,另一方面地形摩擦使风暴强度减弱从而减少降水。

关键词 孟加拉湾风暴, WRF 模式, 地形敏感试验, 数值模拟

中图法分类号 P458.1⁺24

1 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。初夏和秋末孟加拉湾风暴极易向东北方向移动并在孟加拉国东部至缅甸一带登陆(段旭等,2009),对中国西南地区造成重大影响。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,孟加拉湾风暴东北方向登陆时受大地形影响很大,地形对风暴的结构变化、移动路径以及降水分布等的作用值得深入研究。有关孟加拉湾风暴登陆地形影响的研究工作较少,仅见许美玲等(2006)和鲁亚斌等(2006)利用 MM5V3 模拟了孟加拉湾风暴 02b(2004)登陆后,其流场、动力场和热力场的结构变化以及地形影响对降水有明显的增幅作用等。但热带气旋登陆受海岸、山脉、岛屿等地形影响,其结构、强度、路径以及产生的降水等方面的变化研究较多,可以借鉴和比较。Powell 等(1998)实例分析得到地形对登陆飓风风速的影响,地形粗糙度使风速降低,但陡峭地形使风速增加。Tuleya(1995)用美国地球物理流体力学实验室(GFDL)飓风模式进行地形参数敏感试验,结果表明地形粗糙度和陆地湿度的减少能加速飓风消亡。端义宏等(2005)认为下垫面对成熟台风移动影响较大。谢以扬等(1993)通过对登陆台风数值试验研究表明,地形的动力和热力强迫对台风的运动可以产生较为显著影响,即地形动力强迫对登陆台风外围环流产生响应。陈联寿等(2002,2004)在登陆台风研究中,分析了地形强迫造成台风异常运动等问题。闫敬华等(2005)对台风“黄蜂”进行了数值模拟和中国东南沿海地形敏感试验研究,分析表明地形对热带气旋的强度变化有重要影响。黄伟等(1996)对地形作敏感试验表明地形对降水有重要影响。钮学新等(2005)对台风“森拉克”作了类似敏感试验,着重分析了地形对降水的影响,结果表明地形使迎风坡

降水增加,背风坡降水减少,且降水分布不均匀。余贞寿等(2005)对台风“云娜”进行浙南、闽北范围的地形敏感试验,结果表明地形使台风路径右偏、强度变化明显、台风暴雨有增大作用,且分布更不均匀。段丽等(2006)通过数值敏感试验研究了海南五指山地形对热带风暴“菲特”结构和运动,结果表明,山脉地形能诱生小涡,从而改变风暴移动路径。冀春晓等(2007)对台风“云娜”在浙江、福建东部沿海一带进行有无地形的数值对比试验,着重讨论了台风登陆期间地形对台风降水、台风结构特征变化的影响,认为地形强迫有利于激发中尺度对流系统从而使降水增加和降水分布不均并且改变台风的局部结构。以上研究表明海岸和山脉地形对热带气旋路径、强度和产生的降水有明显影响。台湾岛对登陆中国的台风影响也有大量研究,如孟智勇等(1996)的数值研究表明,台风接近台湾岛时,在岛屿的另一侧会有诱生涡旋,在适当条件下,台风原来的低层中心因地形的阻挡而消失,高层中心移过岛屿,其相应的正涡度中心与低层的诱生涡旋重合,使诱生涡旋得以发展加强而代替原来的台风,造成台风“跳跃”异常路径。闫敬华等(1997)模拟了 9017 号台风经过台湾岛的过程,发现台风的结构和路径发生了复杂变化。余贞寿等(2007)对台风“海棠”异常路径进行了数值试验,表明台湾地形对台风路径产生直接影响。显然,岛屿对台风的结构和移动路径有重要影响。那么,相比东部海岸和台湾岛地形对台风的影响,西南大地形对孟加拉湾风暴的影响有何异同?本文利用中尺度数值模式对 2006 年孟加拉湾登陆风暴 Mala 进行数值模拟试验,侧重分析大地形对风暴的路径、降水分布和结构变化的作用和影响。

2 试验方案设计

本文使用由美国多单位联合研制的新一代细网格中尺度 WRF 模式(V2.2),并利用 NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料作为模式初始场和边界条件。模

式的基本参数设置详见表 1, 模拟初始积分时间为 2006 年 4 月 29 日 00 时(世界时, 下同), 积分 36 h, 30 日 12 时结束。

表 1 试验参数说明
Table 1 Major parameters for the experiment

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, Grell-Devenyi 集合
微物理过程	Lin 等方案
边界层	Mellor-Yamada-Janjic TKE
辐射	Dudhia 短波和 RRTM 长波

为了讨论地形对 Mala 的影响, 在其他参数保持不变的情况下, 针对地形高度设计了 3 种模拟试验方案: (1) 控制试验(Ctl), 保持模式原有的地形特征; (2) 地形减半试验(HT), 把模拟三重网格区域的地形高度分别减小 1/2, 即地形高度作减半处理; (3) 地形为零试验(ZT), 把模拟三重网格区域的地形高度分别取值为 0 m。

3 控制试验对风暴路径和强度的模拟结果

Mala 是 2006 年 4 月 24 日 18 时左右在北印度洋

上生成, 29 日 12 时左右在缅甸(18.4°N, 94.55°E)登陆。登陆后, 受青藏高原东侧槽前西南气流和副热带高压外围西南气流引导, Mala 向东北方向移动, 强度减弱, 并入西风槽从而影响云南。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, 30 日 00 时之后风暴消失。从控制试验(Ctl)对风暴中心移动路径模拟与 NCEP 分析场(实况)的比较(图 1a)可以看出, 风暴登陆前后移动方向模拟与实况基本一致, 但模拟的速度与实况有差异, 29 日 18 时以前模拟速度较实况慢 3 h 左右, 之后模拟速度偏快, 到 30 日 00 时风暴即将消失时模拟与实况十分接近(偏差约 35 km)。控制试验(Ctl)对风暴中心 850 hPa 位势高度的模拟与 NCEP 分析场(实况)的演变(图 1b)趋势一致, 但登陆前中心强度模拟较实况弱, 登陆后较实况强, 风暴中心值最大误差为 18 gpm, 最小仅为 9 gpm。风暴中心路径和强度的模拟结果表明, 模式对 Mala 具有较好的模拟能力, 可以通过进行地形敏感试验, 来分析地形对登陆风暴的影响。

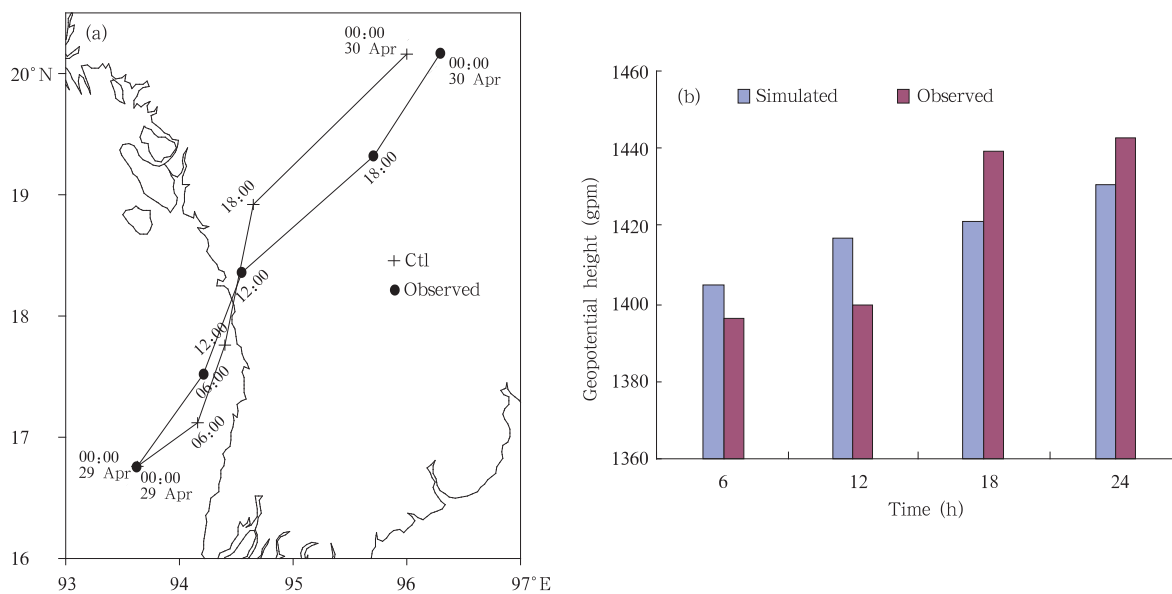


图 1 2006 年 4 月 29 日 00 时—30 日 00 时每 6 h 一次孟加拉湾风暴中心位置(a)和中心 850 hPa 位势高度(b)演变(单位: gpm)

Fig. 1 Control experiments simulated and observed for the location (a) and the 850 hPa geopotential height (b) of the storm center per 6 hour from 00:00 UTC 29 to 00:00 UTC 30 Apr 2006

4 地形敏感数值试验

4.1 地形对水平风场和 500 hPa 高度场的影响

Mala 是 2006 年 4 月 29 日 12 时左右登陆的, 30 日 00 时之后消失。因此, 为了分析地形对登陆前后风暴结构的影响, 取模拟积分 6 h(29 日 06 时) 结果作为登陆前的状况, 积分 18 h(29 日 18 时) 作为登陆后的状况。在 850 hPa 风场上, 登陆前 3 种模拟试验方案(Ctl、HT、ZT)表现出风暴都为比较完整的对称环流(图略)。风暴登陆后, 3 种数值试验的结果有了一些变化(图 2), 其共同特点是水平风场由登陆前的对称环流转变为非对称环流, 在风暴移动的东北方向风速明显大于其他方向。相对比较而言, 风暴外围 10 m/s 风速等值线环流范围, Ctl 试验(图 2a)和 HT 试验(图 2b)小于 ZT 试验(图 2c); 而风暴中心 5 m/s 风速等值线环流范围则正好相反, 并且随地形高度的降低环流相对完整, 表明地形对登陆风暴的减弱有较明显的作用。地形在对登陆风暴环流阻挡减弱的同时, 由于其动力抬升的作

用, 在迎风坡(东北方向)风速加大(登陆前最大风速未达到 20 m/s), 全地形(Ctl)和半地形(HT)20 m/s 范围比零地形(ZT)大。这与 Powell 等(1998)分析认为陡峭海岸能使风速增加 20%—80%一致。尽管 ZT 试验中地形抬升作用为零、风暴减弱较 Ctl 和 HT 试验减弱相对缓慢, 但风暴减弱还是非常明显的, 表明陆地对风暴强度的影响不仅限于地形阻挡和抬升效应, 而且包含下垫面摩擦、水汽和热力条件的影响, 后者的作用不可忽视。与 Tuleya(1995)试验地形粗糙度和陆地湿度的减少能加速飓风消亡结论一致。

从 3 种试验模拟登陆后(29 日 18 时)500 hPa 高度场(图 3)的情况可以看出, Ctl 试验(图 3a)和 HT 试验(图 3b)环流变为不对称形, 特别是 Ctl 试验 500 hPa 环流比较杂乱。与对应青藏高原东南麓复杂地形有关。ZT 试验(图 3c)环流比较完整。随地形高度的降低环流相对完整, 3 种试验最低位势高度大小一致, 但环流范围差别较大。地形高度的变化对风暴中层大气环流结构影响较大。

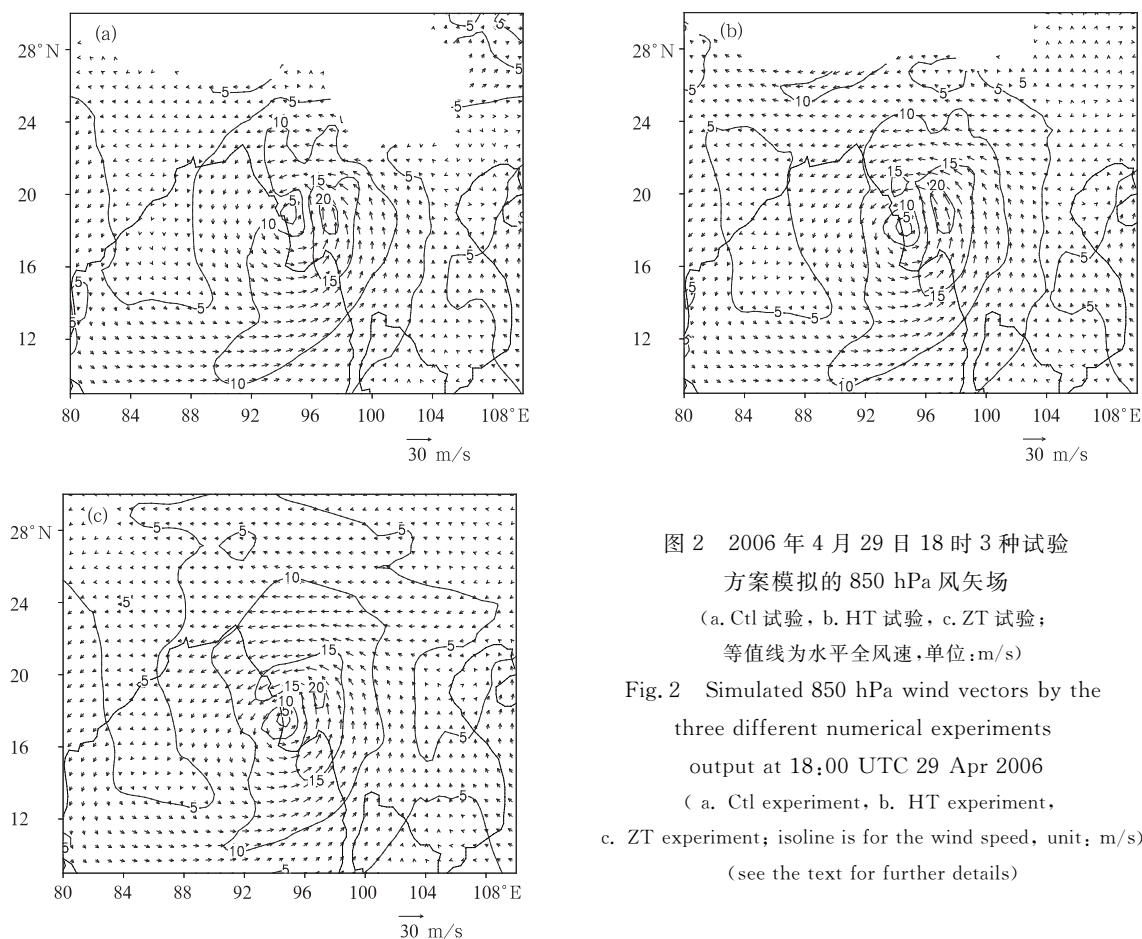


图 2 2006 年 4 月 29 日 18 时 3 种试验
方案模拟的 850 hPa 风矢场

(a. Ctl 试验, b. HT 试验, c. ZT 试验;
等值线为水平全风速, 单位: m/s)

Fig. 2 Simulated 850 hPa wind vectors by the
three different numerical experiments
output at 18:00 UTC 29 Apr 2006
(a. Ctl experiment, b. HT experiment,
c. ZT experiment; isoline is for the wind speed, unit: m/s)
(see the text for further details)

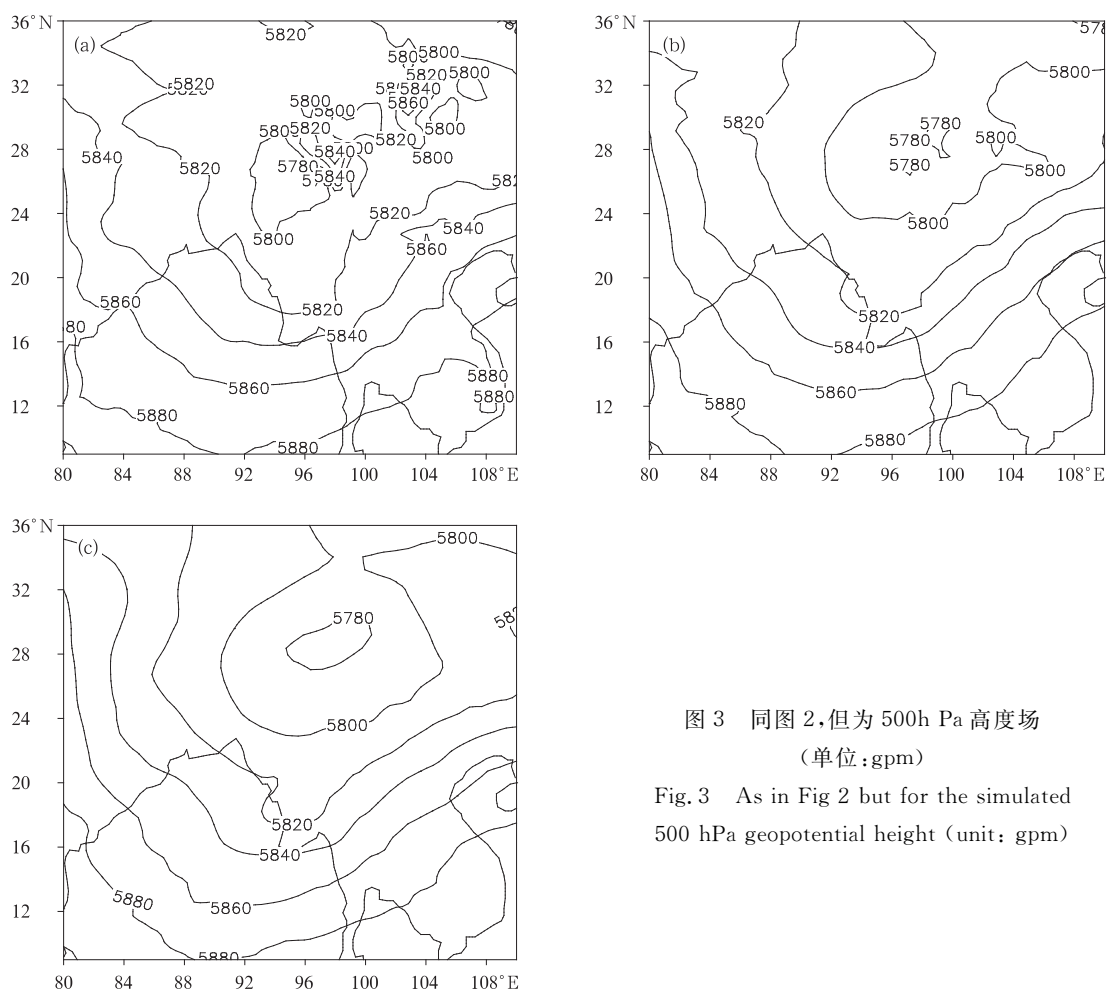


图3 同图2,但为500h Pa高度场
(单位:gpm)

Fig. 3 As in Fig 2 but for the simulated
500 hPa geopotential height (unit: gpm)

4.2 地形对移动路径和速度的影响

风暴登陆路径主要受天气系统活动方式和相互作用的支配,但在孟加拉湾地区周围,大地形的水平尺度和垂直尺度都足以影响风暴的移动路径和速度。从风暴登陆区域的地形高度分布及3种数值试验对路径和速度模拟情况(图4)可以明显看出:在风暴登陆前的海面上,Ctl、HT和ZT试验模拟的移动方向和速度基本一致(29日00—06时);当风暴接近陆地时(29日12时),地形高度为零的ZT试验模拟路径为偏东方向(最短距离登陆),而全地形和半地形的Ctl、HT试验模拟路径则为东北方向(沿海岸平行方向),地形的阻挡作用不可忽视;风暴登陆后,Ctl和HT试验模拟的路径基本沿地形相对平缓的方向,Ctl试验后6h运动有明显的偏东分量即运动方向的右偏移。这与陈联寿等(2002)研究的

地形使台风路径右偏的结论一致。另外,从风暴的移动速度看,由于受地形影响,Ctl试验模拟强度减弱最快、HT次之、ZT最慢,导致弱的天气系统移动速度比强的系统快,因此风暴登陆以后,Ctl试验模拟速度最快、HT次之、ZT最慢。总之,青藏高原和云贵高原大地形对风暴移动有两方面的作用,一方面对风暴移动有阻挡减速的作用,另一方面对风暴强度有摩擦减弱的作用,从而减弱的系统移动速度加快。此个例中,地形阻挡作用使风暴沿地形相对平缓方向移动,同时地形使风暴强度减弱明显从而加快了移动速度。由于高原大地形与山脉和岛屿地形相比变化相对连续平缓,难以诱生低压系统,因此,风暴路径较少出现偏折(段丽等,2006)和海上打转(余贞寿等,2007)等异常情况。

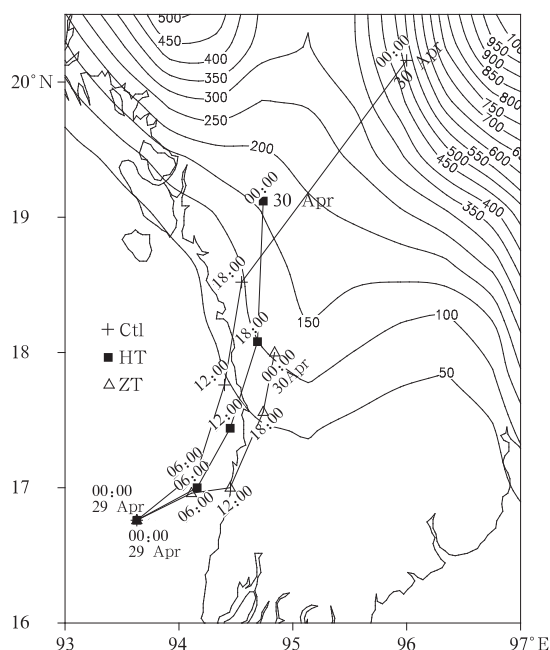


图4 2006年4月29日00时—30日00时
每6h一次孟加拉湾风暴中心数值模拟位置
(等值线表示地形高度,单位:m)

Fig. 4 Three different locations of the storm center as are simulated using the respective experiment schemes from 00:00 UTC 29 to 00:00 UTC 30 Apr 2006 (isoline is for the terrain height, unit: m)

4.3 地形对动力结构的影响

图2中的水平流场显示,风暴登陆后呈准南北向非对称分布,这种非对称分布导致了风暴向风速较大的一侧方向移动,与西太平洋登陆的非对称型台风运动的方向一致(陈联寿等,1996;余贞寿等,2005)。非对称的水平流场从低层到高层气旋性闭合环流发生了变化(图略),低层仍维持闭合低压,但已逐渐演变为椭圆形环流,表明涡旋环流趋于减弱,中高层已演变为西风带上的低压槽。受大地形阻挡的影响,气旋(或低压槽)随高度向移动方向倾斜,下面用3种试验的动力诊断量的差值来讨论地形对其倾斜所起的作用。

图5a、b给出了以风暴为中心的垂直速度差值东西向剖面分布。当地形减半时(图5a, HT - Ctl),风暴中心右侧400 km以内上空中低层为一负的大值区域,中心值为 $-6.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$,说明了地形的阻挡作用加大了风暴系统中低层运动的滞后

性,地形的抬升作用增加了中低层的上升运动。地形为零时(图5b, ZT - Ctl),负的大值区域扩大到右侧450 km范围,上升运动中心值也增强为 $-8.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$,地形对风暴系统的阻挡作用和抬升作用非常明显。从登陆前后3种试验方案的辐合辐散场(图略)看,登陆后,倾斜程度依然明显,除了高空900 hPa以下近地层由于地形高度增加导致辐合增强外,中低层为较强的辐散区,由此导致风暴系统减弱。地形减半时(图5c, HT - Ctl),高空近地层和中低层的辐合辐散中心差值分别为 $3.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $5.9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,地形为零时(图5d, ZT - Ctl),其差值分别为 $4.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $7.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,比较看,地形高度的增加,加大了近地层的辐合,同时也加大了中低层的辐散,总体使风暴系统减弱。涡度场(图5e、f)与散度场有所不同,虽然从低层到高层其结构也向东倾斜,但900 hPa以上涡度差值很小,表明地形对水平风向的影响仅限于高空近地层。随着地形的升高,高空近地层涡度明显减小,风暴中心上空925 hPa高度上,HT与Ctl试验、ZT与Ctl试验的涡度差值分别为 $6.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $9.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,主要原因是 u 分量风速受地形阻挡在南北方向变化较大所致,因此地形升高促使风暴系统减弱。

4.4 地形对垂直环流的影响

与西太平洋台风不同,孟加拉湾风暴由于其生存空间的洋面面积相对较小,且东、西、北三面均为大陆,风暴在登陆前环流结构已发生了很大的改变。从3种试验方案29日06时对风暴的经向剖面垂直环流模拟结果(图6a、c、e)可以看出,风暴中心东西两侧除低层外已完全不对称,东侧为较强的上升气流区,西侧为较强下沉气流区。有所不同的是,Ctl、HT和ZT试验模拟风暴中心区域上升气流分别达到700、600和400 hPa,其东侧区域上升气流分别达到300、250和200 hPa,表明不同的地形高度对风暴强度的间接影响。风暴登陆后,3种试验方案(图6b、d、f)风暴中心区域上空均变为较强的下沉气流,促使风暴迅速减弱,当然程度上还是有所区别,Ctl试验最强、HT试验次之、ZT试验最弱。值得注意的是,在风暴东侧中低层有很强的上升气流区,与风暴系统减弱的趋势正好相反,说明大地形的抬升作用非常显著,与图5a、b给出的结果一致。

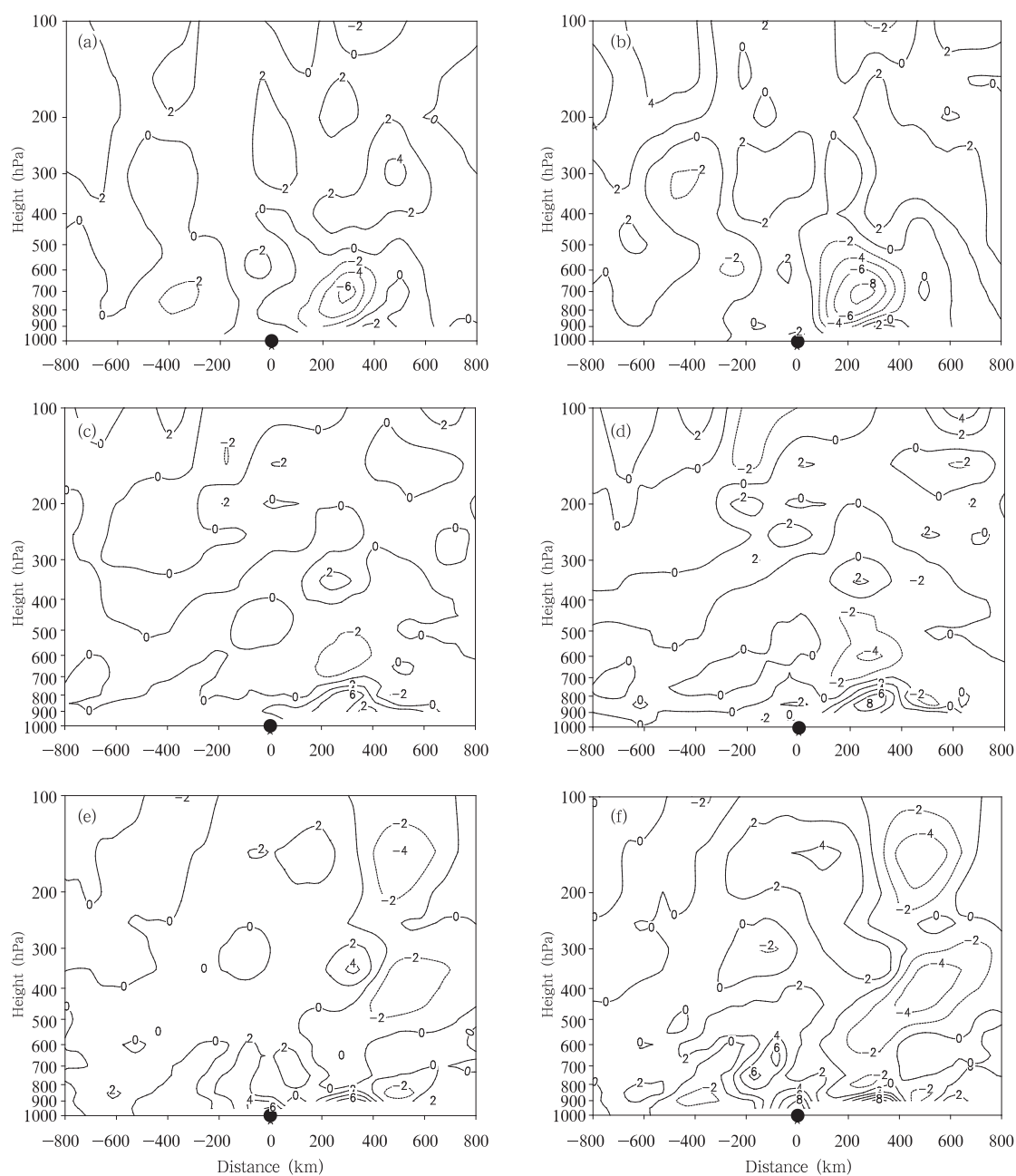


图5 2006年4月29日18时风暴中心东西向垂直剖面3种模拟方案差值分布

(a、b. 垂直速度, 单位: 10^{-2} m/s; c、d. 散度, 单位: 10^{-5} s $^{-1}$; e、f. 涡度, 单位: 10^{-5} s $^{-1}$;

a、c、e. HT与Ctl试验差值; b、d、f. ZT与Ctl试验差值; 黑点表示风暴中心)

Fig. 5 Pressure-latitudinal cross sections of the differences along the storm center at 18:00 UTC 29 Apr 2006

(a, b. vertical velocity, unit: 10^{-2} m/s; c, d. divergence, unit: 10^{-5} s $^{-1}$ and

e, f. vorticity, unit: 10^{-5} s $^{-1}$; a, c, e. the difference between the HT and Ctl experiment and

b, d, f. the difference between the ZT and Ctl experiment; the dark circle denotes the storm center)

4.5 地形对降水分布和强度的影响

从2006年4月29日12时—30日12时云南境内累计降水量实况(图7a)和3种试验方案的第3

重网格模拟降水(图7b、c、d)结果的比较可以看出,与实况相比,3种试验方案降水模拟的范围偏西偏北,50 mm等值线范围中心距离约相差200 km,这

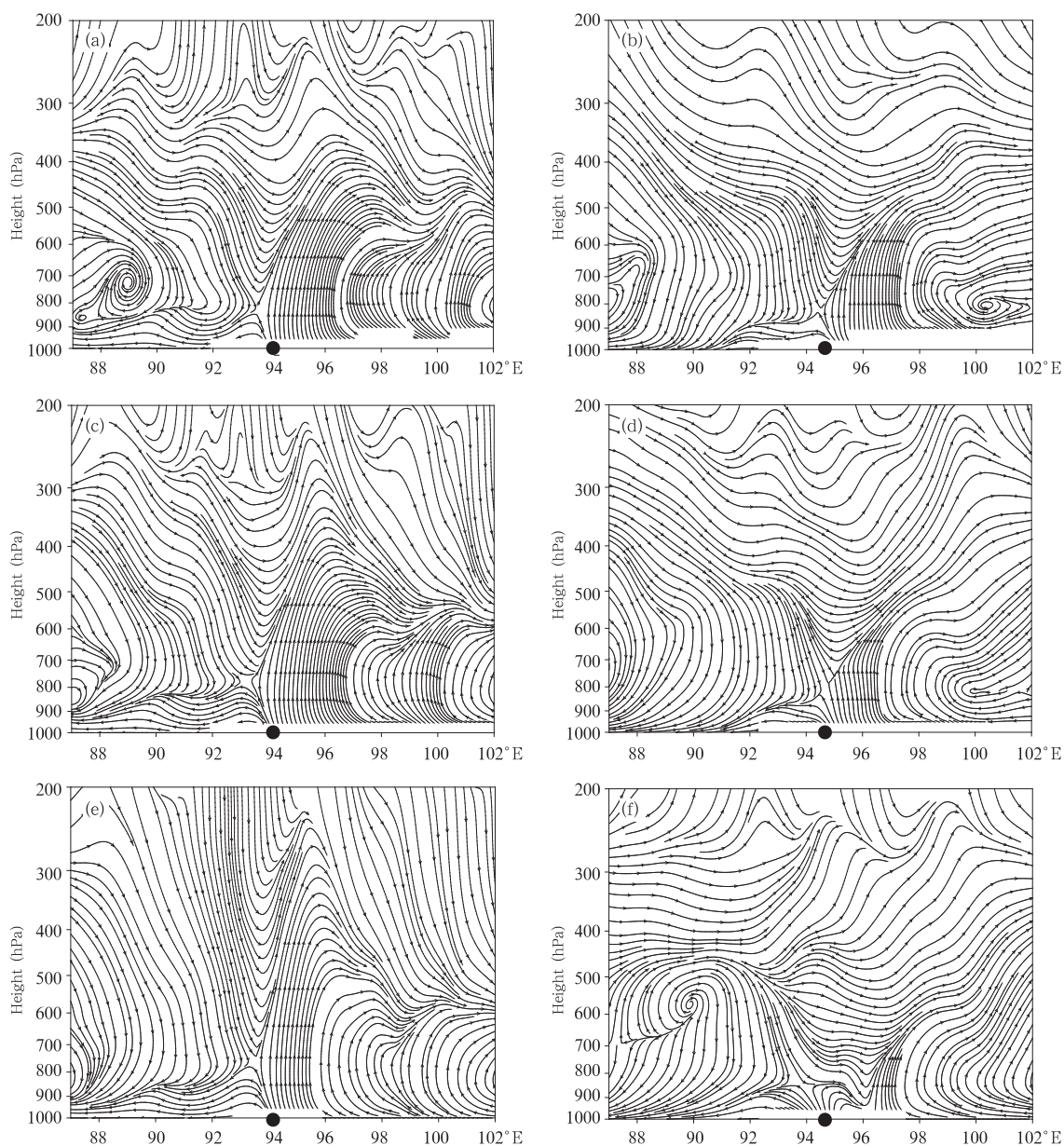


图 6 2006 年 4 月 29 日 06 时(a,c,e)和 18 时(b,d,f) 3 种试验方案模拟风暴中心纬向剖面垂直环流

(a,b. Ctl 试验, c,d. HT 试验, e,f. ZT 试验;黑点表示风暴中心)

Fig. 6 Pressure-latitudinal cross sections of the vertical circulation along

the storm center at 06:00 UTC (a, c, e) and 18:00 UTC (b, d, f) 29 Apr 2006

(a, b. Ctl experiment, c, d. HT experiment, e, f. ZT experiment; dark circle denotes the storm center)

与风暴的模拟路径(图 1)偏西有关。比较 3 种试验方案对降水量模拟的结果,控制试验(图 7b) 25 mm 范围最大,半地形试验(图 7c)次之,零地形试验(图 7d)最小,说明地形的抬升作用使风暴系统减弱而加快了移动速度,造成降水面积扩大。控制试验全地形模拟降水分布不均匀,而随着地形高度的降低降水分布趋于均匀,与钮学新等(2005)、余贞寿等

(2005)数值试验得到的地形使台风降水分布不均匀结论一致。从降水强度看,Ctl 和 HT 方案模拟出了 100 mm 以上降水,而 ZT 方案没有达到此量值(最大为 85 mm),地形抬升对降水是增加的。虽然如此,但比较 Ctl 和 HT 方案 100 mm 以上降水发现,100 mm 范围 HT 方案略大于 Ctl 方案,中心强度 Ctl 和 HT 方案分别为 120 和 160 mm,这表明地形

对降水并不完全是正贡献。这与钮学新等(2005)、余贞寿等(2005)数值试验得到东部沿海地形减台风降水减小结果有所差别。大地形的存在一方面地形抬升作用对降水增加是有利的,另一方面地形的

阻挡和摩擦作用也会减弱风暴系统而导致降水减少,两者作用的相互消减可能是降水增加或减少的主要因素。

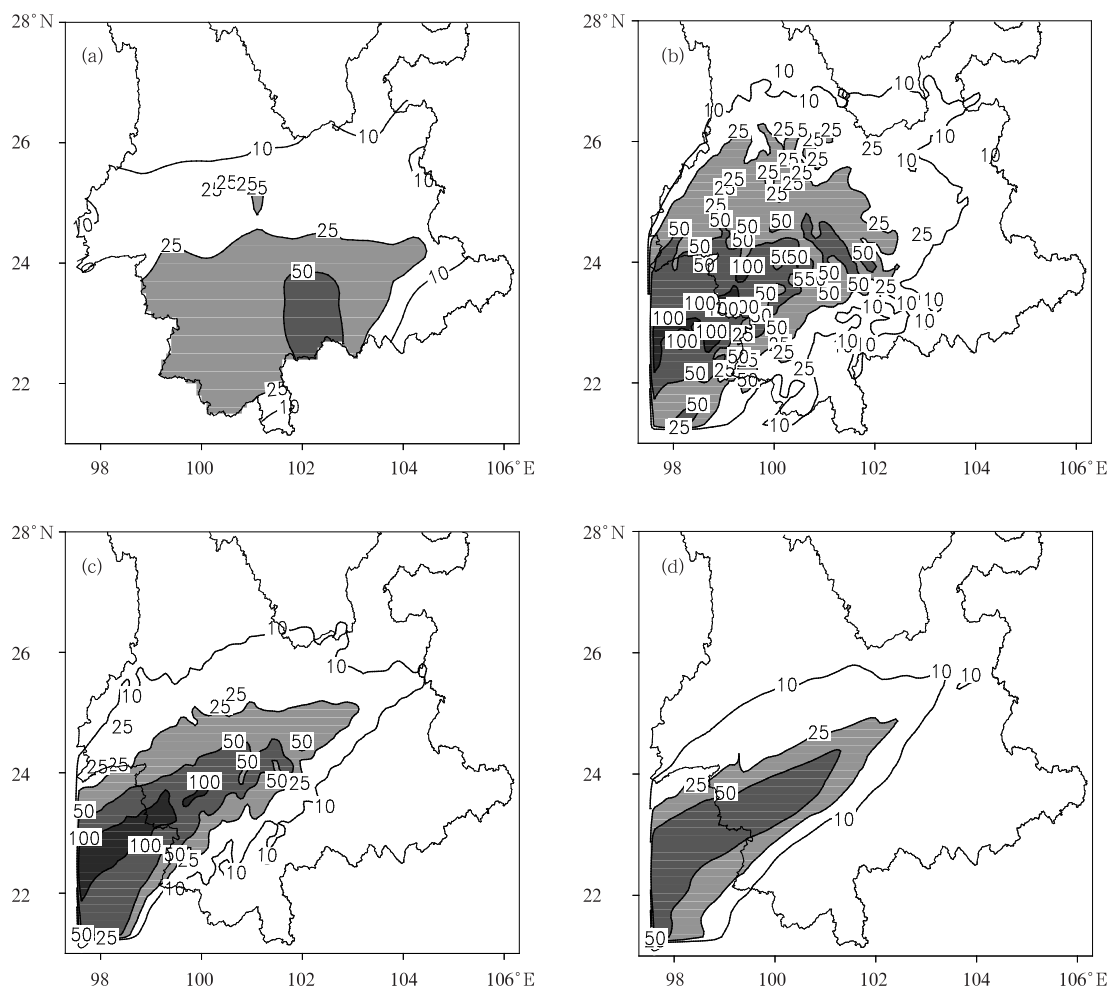


图7 2006年4月29日12时—30日12时累积降水量

(a. 实况, b. Ctl 试验, c. HT 试验, d. ZT 试验; 单位: mm)

Fig. 7 Accumulated precipitations (unit: mm) from 12:00 UTC 29 to 12:00 UTC 30 Apr 2006

(a. observation, b. Ctl experiment, c. HT experiment, d. ZT experiment)

5 结 论

(1) 控制试验对风暴中心强度和移动路径的模拟误差较小,降水强度和范围有一定误差,但降水趋势还是比较吻合,说明 WRF 模式对该孟加拉湾风暴个例模拟有一定的参考价值。

(2) 通过改变地形高度进行敏感试验发现,地形对风暴的移动有明显阻挡作用,在引导气流控制下,风暴基本上是沿地形相对平缓方向移动。通过

风场和 500 hPa 高度场分析,地形对风暴强度减弱明显。风暴强度的变化从而影响移动速度变化,强度越弱,移动速度越快。

(3) 通过分析 3 种方案模拟的动力结构发现,地形摩擦作用使风暴明显减弱,垂直方向产生倾斜作用,使风暴变为斜压结构,随地形高度降低,斜压程度降低。由于地形抬升作用,使风暴局部垂直速度有所增加。

(4) 通过分析登陆前后 3 种方案模拟的垂直环

流,风暴登陆前,大地形对风暴的垂直结构有间接影响,风暴中心高层出现了倾斜结构。登陆后,地形抬升作用显著。

(5) 通过分析 3 种方案模拟的降水,降水是地形抬升增幅和地形阻挡摩擦减弱风暴从而减少降水的综合反映。此个例中大地形存在较无地形高度产生的降水中心强度增加约 2/5,但如果地形减半,降水中心强度却有增加,增幅约 1/3。

参考文献

- 陈联寿,罗哲贤.1996.非对称结构与台风移动的若干联系.台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(二).北京:气象出版社,371-374
- 陈联寿,徐祥德,罗哲贤等.2002.热带气旋动力学引论.北京:气象出版社,168-313
- 陈联寿,罗哲贤,李英.2004.登陆热带气旋研究的进展.气象学报,62(5):541-549
- 端义宏,余晖,伍荣生.2005.热带气象强度变化研究进展.气象学报,63(5):636-645
- 段丽,陈联寿,徐祥德.2006.山脉地形对热带风暴 Fitow 结构和运动影响的数值试验.气象学报,64(2):186-193
- 段旭,陶云,寸灿琼等.2009.孟加拉湾风暴时空分布和活动规律统计特征.高原气象,28(3):634-641
- 黄伟,陶祖钰.1996.1993 年 16 号台风的数值模拟研究.气象学报,54(2):225-231
- 冀春晓,薛根元,赵放等.2007.台风 Rananim 登陆期间地形对其降水
- 水和结构影响的数值模拟试验.大气科学,31(2):233-244
- 鲁亚斌,晏红明,张腾飞等.2006.地形对云南暴雨的数值模拟敏感性试验分析.科学研究月刊,19(7):41-42
- 钮学新,杜惠良,刘建勇.2005.0216 台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验.气象学报,63(1):57-68
- 解以扬,徐祥德.1993.登陆台风暴雨地形增幅的数值试验.南京气象学院学报,19(4):451-456
- 许美玲,段旭,张秀年.2006.登陆孟湾风暴结构演变特征数值模拟研究.高原气象,25(5):1139-1145
- 闫敬华,董克勤.1997.台湾附近地形对台风影响的数值模拟.热带气象学报,13(3):217-226
- 闫敬华,徐建平,丁伟钰等.2005.地形对登陆热带气旋“黄蜂”(2002)强度影响的模拟研究.大气科学,29(2):205-213
- 余贞寿,廖胜石,黄克慧等.2005.0414 号台风“云娜”的数值模拟.气象学报,63(6):903-914
- 余贞寿,郝增周,谢海华等.2007.台湾岛地形对台风“海棠”(0505)移动路径影响的数值试验研究.热带气象学报,23(6):575-580
- Meng Zhiyong, Nagata Masashi, Chen Lianshou. 1996. A numerical study on the formation and development of island-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion. Acta Meteor Sinica, 10(4):430-443
- Powell M D, Houston S H. 1998. Surface wind fields of 1995 hurricanes Erin, Opal, Luis, Marilyn and Roxanne at landfall. Mon Wea Rev, 126: 1259-1273
- Tuleya R E. 1994. Tropical storm development and decay: Sensitivity to surface boundary conditions. Mon Wea Rev, 122: 291-304