

马玉芬,沈桐立,丁治英,等. 台风“桑美”的数值模拟和地形敏感性试验[J]. 南京气象学院学报,2009,32(2):277-286.

台风“桑美”的数值模拟和地形敏感性试验

马玉芬^{1,2}, 沈桐立¹, 丁治英¹, 张广兴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, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:用 WRF 模式对 0608 号台风“桑美”进行了数值模拟研究,较为成功地模拟出了台风路径和降水,但模拟的台风中心气压远高于实况。为研究“桑美”登陆期间地形的抬升作用对其降水及结构的影响,通过改变特定区域内的地形高度设计了一组敏感性试验。结果表明,台风登陆过程中地形抬升作用对台风降雨量有显著的增幅作用;台风中心位势涡度、气流垂直上升速度、水平水汽通量散度明显增大;地形抬升机制在台风登陆时刻达到最强。

关键词:台风数值模拟;地形敏感性试验;位势涡度;垂直速度; Q 矢量散度;水汽通量散度

中图分类号:P458.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-2022(2009)02-0277-10

Numerical Simulation and Orographic Sensitive Experiments of Typhoon Saomai during Landfall

MA Yu-fen^{1,2}, SHEN Tong-li¹, DING Zhi-ying¹, ZHANG Guang-xing²

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. Urumqi Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: A simulation experiment is conducted using the WRF model and the track and 24 h accumulative rainfall is successfully modeled, but the simulated central pressure of Saomai is much higher than that of the real situation. To study the orographic uplifting effect upon the rainstorm and the structure of typhoon Saomai (0608) during the landfall, a set of orographic sensitive experiments are further carried out by changing the terrain altitude within the selected area. It is concluded that during the landfall of Saomai, the orographic uplifting is able to enlarge the rainfall of the typhoon, and also to enhance the centre potential vorticity, vertical velocity as well as the convergence of moisture flux obviously. Meanwhile, the orographic uplifting peaks at the moment of typhoon Saomai's landfall.

Key words: numerical simulation of typhoon; orographic sensitive experiment; potential vorticity; vertical velocity; moisture flux divergence

0 引言

0608 号热带风暴“桑美”(SAOMAI)于 2006 年 8 月 5 日晚在关岛东南方的西北太平洋洋面上生成,8 月 7 日凌晨加强为强热带风暴,下午加强为台风,8 月 9 日上午加强为强台风,傍晚加强为超强台风。8 月 10 日 17 时 25 分,在浙江省苍南县马站镇沿海登陆。登陆时,中心附近最大风力达 17 级(60 m/s),中心气压为 920 hPa,是近 50 a 来登陆

中国大陆最强的台风。据民政部统计,截至 8 月 14 日 16 时,浙江、福建、江西和湖北四省共有 592.0 万人受灾,因灾死亡 215 人,失踪 160 人,紧急转移安置 180.1 万人,因灾直接经济损失 116.7 亿元。

对台风的研究历来是气象学家所关注的重要课题,随着各种数值模式的发展,利用模式对台风进行数值研究^[1-5]也逐渐成为一种主要手段。很多对登陆台风个例进行精细的数值模拟研究都表明地形强迫作用对登陆台风外围环流的响应影响了降水的强

收稿日期:2008-03-04;改回日期:2009-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40775033);中国气象科学院灾害天气国家重点实验室基金项目(2006LASW01)

作者简介:马玉芬(1982—),女,新疆乌鲁木齐人,硕士,研究方向为中尺度数值模拟与资料同化, mayf@yahoo.cn.

度、落区等。黄安丽^[6]通过对6513号台风影响浙江期间降水的定量分析论证了地形对降水量的增幅是通过“地形雨”与扰动系统降水两者之间的相互作用,并定量分析了地形增幅的两个方面:扰动降水强度的增幅和扰动影响时数的延长。陈联寿等^[7]在登陆台风的研究中,主要分析了地形强迫下台风的异常运动,热带气旋与中纬度环流系统的相互作用等问题。郑庆林等^[8]通过对中国东南海岸线分布对9216号台风暴雨增幅影响的数值研究发现,地形动力抬升形成的对流降水是台风暴雨增幅的一个重要原因。蔡则怡等^[9]用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室坐标数值模式对一次登陆台风造成的特大暴雨进行了数值模拟试验,发现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等对暴雨的强度是非常敏感的,地形稍有改变,其暴雨强度将减少3/4以上。钮学新等^[10]使用MM5对0216号台风降水及影响降水机制进行了数值模拟试验,结果表明,地形作用使迎风坡降水中心增加雨量,背风坡雨量减少,从而使降水分布更不对称,更不均匀。解以扬等^[11]在登陆台风暴雨地形增幅的数值试验中指出,下垫面地形的动力、热力强迫对台风的运动可以产生较为显著的影响,地形的动力强迫可使500 hPa垂直运动在有地形偏差场上构成一对上升与下沉运动的偶结构,即地形强迫对登陆台风外围环流的响应。Wu等^[12]使用高分辨数值模式进行的数值模拟表明,模式准确模拟台风降水的能力主要取决于模式的水平分辨率和模式对地形的描述能力,地形对台风降雨具有明显的增幅效应。钮学新等^[13]统计华东台风暴雨表明,迎风坡强迫抬升和辐合可使台风降水明显增加。胡伯威^[14]综合评述了国外关于地形(特别是中尺度地形)强迫大气扰动的一些经典工作,其中特别注意到Pierrhumbert用解析^[15]和数值^[16]的方法比较系统地研究了山脉阻挡的上游效应,胡伯威^[14]的评述中还根据Pierrhumbert的结果对不同情况下地形上游扰动中的铅直运动及其对暴雨触发的地点特征作了一些推论。Tuleya等^[17]、Bender等^[18]对登陆台风作了理想化模拟,指出山脉对登陆台风的路径、衰减速度及降水分布均有影响。吴启树等^[19]对地形敏感性试验的结果说明福建东部沿海的特殊地形对登陆福建中部沿海的台风暴雨有着明显的增幅作用,地形对台风暴雨的最大增幅作用发生在山脉迎风坡的地形坡度与气流正交速度乘积最大的时段。王晓

芳等^[20]通过地形对0604号“碧利斯”登陆台风暴雨的影响的研究发现,地形强迫上升及其对暴雨的触发主要不在山坡上,而是在迎风坡气流上游平原地区。冀春晓等^[21]对台风Rananim登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验得出结论,台风登陆期间,地形的影响对台风降雨量有明显的增幅作用。地形的强迫作用有利于在低层台风眼的西北侧形成明显的辐合带,高层为明显的辐散区;在中尺度环流场上,地形的影响有利于台风中心西北侧低层中尺度气旋性涡旋系统的发生发展,从而激发中尺度对流云团,形成中尺度雨团,造成了台风中心南北雨区和雨量的不对称分布。陈云蔚^[22]通过对0509号台风“麦莎”造成临安市局部地区特大暴雨的环流形势和云系演变及地形对台风降水影响的综合分析,揭示了特殊地形对降水增幅效应显著。

然而,应用下一代中尺度天气预报数值模式和研究模式(WRF)并利用NCEP $1^\circ \times 1^\circ \times 6\text{ h}$ 一次的再分析资料分析在台风登陆期间地形对其路径、降水和动力热力结构影响的综合分析与研究目前尚为少见。本文通过数值模拟对0608号台风“桑美”登陆前后的降水、路径及其结构特征的变化进行了研究,并通过改变特定区域内的地形高度进行了敏感性试验,对地形在台风“桑美”登陆过程中的影响作用给予了合理的分析与解释。

1 数值模拟试验

本文采用WRF(v2.1.2)对0608号超强台风“桑美”进行数值模拟。使用NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料作为初始场及边界条件,取双重嵌套区域,区域中心均为(120°E , 28°N),粗网格水平方向为 90×90 个格点,格距为30 km,细网格水平方向为 145×145 个格点,格距为10 km,垂直分层为31层,模式顶为100 hPa,时间步长为60 s。微物理过程内外层均采用Lin方案,长波辐射采用rttm方案,短波辐射采用Dudhia方案,积云对流方案采用Eta的Kain-Fritsch浅对流方案,侧边界采用YSU。此次模拟过程初始时刻选为2006年8月10日00时(世界时,下同),积分48 h,每1 h输出一次模拟结果。

1.1 10日00时—11日00时24 h累积降水量

预报由台风直接或间接在陆地上造成的特大暴雨是台风预报的首要任务。根据大量的关于台风和暴雨的研究成果,最强的暴雨常常是由台风或与台风有关的天气系统造成的。

2006年8月10—12日,受0608号超强台风

“桑美”影响,浙江温州、丽水、台州南部以及福建宁德、南平和江西中北部的部分地区出现了暴雨到大暴雨,其中浙江温州、丽水以及福建宁德等地的部分地区出现了特大暴雨。“桑美”降雨特别集中、雨势急,过程雨量主要集中在8月10日下午至傍晚。

从模式模拟的24 h累积降水量(图1b)可以看到,模拟浙江省东南沿海的24 h累积降雨量在陆地上的极值中心位于(120.0°E,26.8°N),与实况(图1a)极值中心位置(120.20°E,27.33°N)偏离约62.7 km,中心极值仅为205 mm,比实况极值小257 mm。雨带走向与实况也有偏差:实况雨带略呈纬向分布,日降水量在50 mm以上的暴雨区最西端到达了117.5°E,而模拟的雨带略呈东北西南走向。实况中位于(118.0°E,27.7°N)、量级达到100 mm以上的暴雨区在模拟试验中没有模拟出来。与此同时,与实况相比,模拟雨带的东北侧和西南侧出现了量级分别超过50 mm和100 mm的零散的小范围虚假暴雨区。整体来看,此次数值试验对台风降水的模拟是较为成功的。

1.2 10日00时—12日00时48 h台风路径

台风登陆以后的影响范围和大风、暴雨分布均与其陆地路径密切相关。陆地路径是指台风登陆以后的路径。图2给出了2006年8月10日00时—12日00时的实况路径与模拟路径。

从图2中可以看出,模拟路径与台风实际路径是比较接近的。从实况路径来看,登陆前台风向西

北偏西方向移动,登陆后略微西折然后继续向西北偏西方向前进,从10日12点—11日06点,台风走向基本保持不变。此后,台风路径继续向西北方向移动。模拟的台风路径走向与实况接近,登陆点基本一致,登陆时间略晚。然而,从10日12时—11日12时,模拟的台风移动速度比实况偏快,路径比实况偏北。10日12时—11日12时,各个时次的中心位置均比实况略超前。

整体来看,此次数值试验模拟的台风路径走向与实况基本一致,模拟台风中心位置与实况接近,偏差略大的时段为10日12时—11日12时。

1.3 10日00时—12日00时48 h台风强度

从模拟的台风中心气压(图略)来看,模拟的台风中心气压在登陆前减小,登陆后增大,其变化趋势与实况基本接近,但模拟的台风中心气压大于实际台风中心气压。

1.4 垂直速度、位势涡度

图3a、b分别为积分5 h和10 h沿台风近中心27.1°N的垂直速度、位势涡度、水汽混合比的垂直剖面图。从图3可知,在台风登陆前的10日05时,台风眼壁前方的气流垂直上升速度大值区位于400~500 hPa之间,垂直速度的最大值达到了0.31 m/s,指示了太姥山脉迎风坡一侧低层存在着倾斜上升运动。随着台风逐渐向陆地靠近,台风强度逐渐减弱,地形对台风的强迫作用明显增加。当积分到10日10时,此时台风刚刚登陆,台风眼壁前

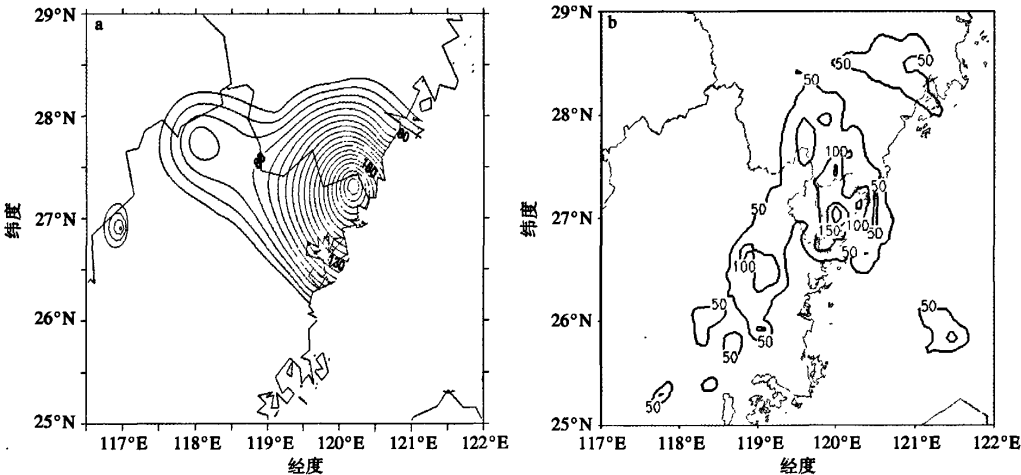


图1 2006年8月10日00时—11日00时24 h累积降水量(单位:mm)

a. 实况;b. 控制实验模拟

Fig. 1 24 h accumulated precipitation(mm) from 0000 UTC 10 to 0000 UTC 11 in August 2006

a. observations;b. simulations

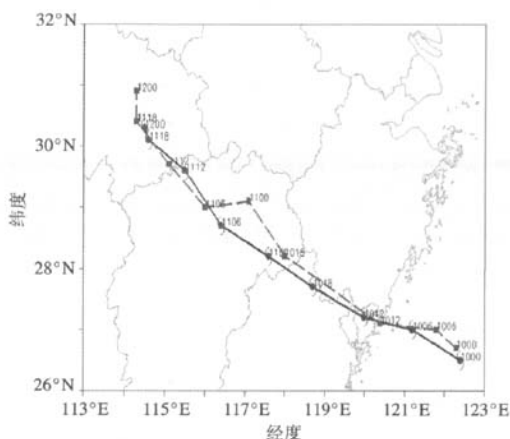


图2 2006年8月10日00时—12日00的台风路径
(实线:实际路径;虚线:模拟路径)

Fig.2 The track of typhoon Saomai
from 0000 UTC 10 to 0000 UTC 12 August 2006
(solid line; observed track; dash line; simulated track)

方位于太姥山脉迎风坡一侧,有两个垂直上升速度大值中心,位于550 hPa附近的大值中心极值为1.19 m/s,而位于300 hPa附近的大值中心极值为1.23 m/s。气流的下方,即700 hPa以下湿度场上的相应区域,存在着水汽混合比的高值区,中心值为22 g/kg(图3a)。这样,台风眼壁中的强上升气流把低层的高湿空气向高空输送。此时位势涡度的高值区位于350 hPa附近(图3b),中心数值较10日05时增大,达到了 $4.77 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在位温场上的相应区域(图略),垂直运动区上空400 hPa以上,等温线下凹,这是降水过程引起潜热释放的结果。在湿度场上的相应区域(图3b),水汽混合比等值线在台风近中心附近上凸,即在等压面上台风近中心附近湿度更大,这是地形抬升作用引起的强烈的上升运动将低层水汽向高空输送的结果。位势涡度的增大反应了台风涡旋的增强,而低层位势涡度的高值区与相应时刻的暴雨区(图略)有很好的对应关系。这与冀春晓等^[21]所得到的结论一致。

2 地形敏感性试验

分析台风登陆前后的垂直速度场、涡度场得知,台风“桑美”登陆期间地形影响作用明显。为了进一步研究浙江省、福建省一带的地形对台风“桑美”的结构、强度以及台风降雨量的影响,在其他参数保持不变的情况下,通过改变图4b中方框所示区域内

地形高度设计了一组地形敏感性试验,其试验方案设计如下:

方案1:去掉图4b中方框所示区域内地形;

方案2:保持原地形高度不变;

方案3:使图4b中方框所示区域内地形高度增加一倍。

本文主要针对以上3种方案中细网格输出的模拟结果进行相应的诊断分析。

2.1 台风降水量分析

图5为方案1和方案3模拟的2006年8月10日00时—11日00时24 h累积降水量;图6为暴雨区地形图;图7为方案1、3与方案2模拟的2006年8月10日00时—11日00时24 h降水量差值。

从图5a可以看到,地形高度为0 m时,台风暴雨的雨量极值约为160 mm,与方案2相比明显减小。同时,与方案2相比,方案1中暴雨落区在太姥山和戴云山东侧的东北西南向带状分布特征几乎完全消失,暴雨落区范围远远小于方案2、3,主要集中在福建省东北部沿海地区。结合暴雨落区的地形高度场(图4)可知,与方案2相比,方案1的雨量的减幅区(图5a)主要位于太姥山东北部和戴云山北部的迎风坡一侧,减幅极大值达90 mm,而增幅区位于太姥山南侧。

从图5b、7b可以看到,地形高度升高一倍时,台风暴雨的雨量极值达270 mm,与方案1、2相比显著增大。方案3中,沿海的暴雨落区沿太姥山和戴云山东侧的东北西南向带状分布特征较方案2更加明显,分布范围远大于方案1、2。与方案2相比,方案3的雨量的增减幅区(图7b)主要位于太姥山东北部和戴云山北部的迎风坡一侧,增幅极大值达到了200 mm,而减幅区位于太姥山西南侧。

综合对比3个方案模拟的暴雨落区分布和降水量可知,随着地形的升高,雨带在山脉迎风坡一侧的带状分布特征越明显,迎风坡一侧的降水量极值越大。这说明地形的抬升作用对台风暴雨在沿海山脉迎风坡一侧的降雨量有明显的增幅作用,对其雨带分布也有显著影响。

2.2 水汽通量散度

0608号超强台风“桑美”登陆前后,为中国浙江、福建沿海地区带来了充沛的水汽。源源不断的水汽向台风暴雨区输送,使暴雨区低空形成了高温高湿环境,为对流的不稳定增长创造了条件。但暴雨产生还需要水汽在暴雨区的汇聚辐合,水汽通量散度反映的正是该项。图8所示为3种方案

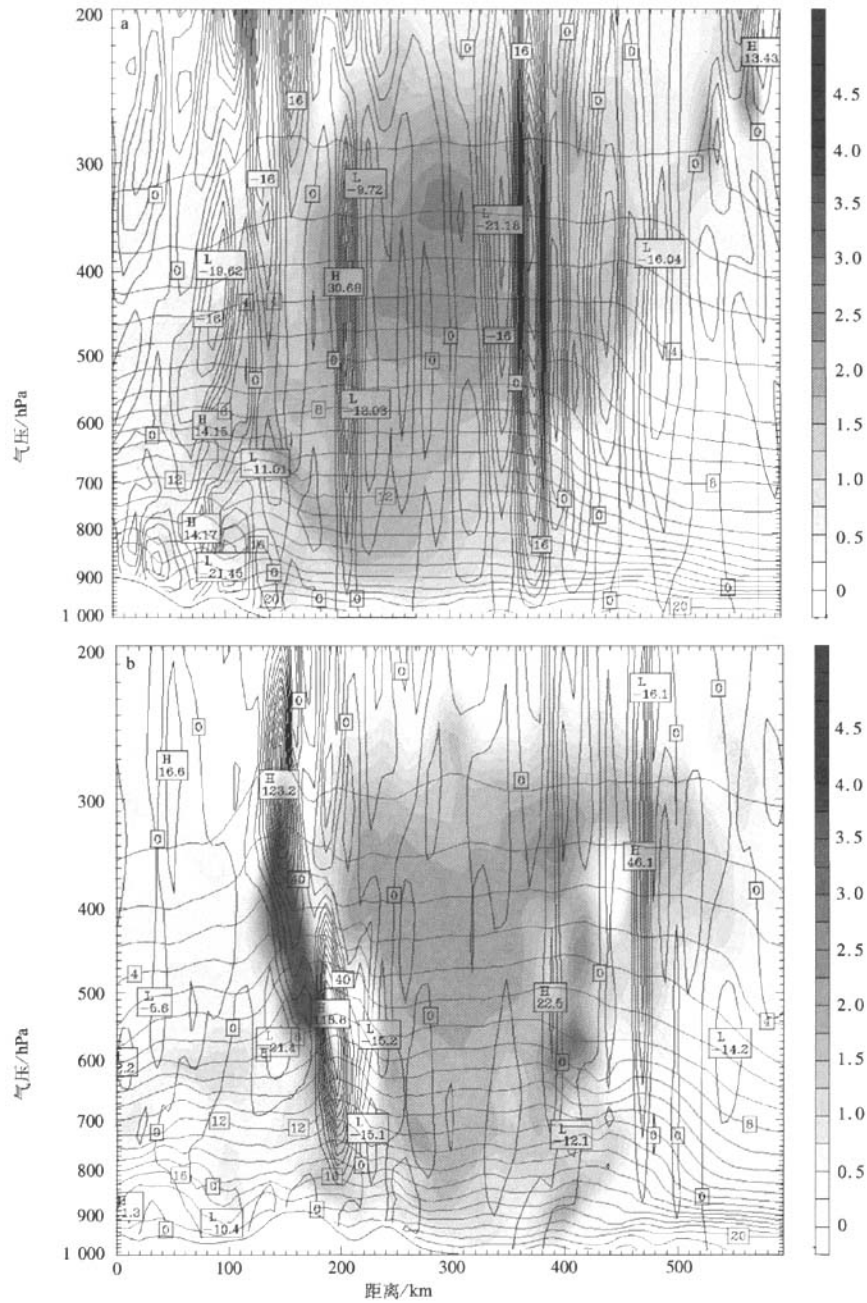


图3 登陆后台风近中心附近垂直速度场(闭合等值线;cm/s)、位势涡度场(阴影为正涡度区,空白为负涡度区;
 $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)和水汽混合比(水平等值线;g/kg)的垂直分布 a.10日05时;b.10日10时
Fig.3 The vertical distributions of simulated vertical velocity(solid contours;cm/s),potential vorticity
($10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) and moisture mixing ratio(horizontal contours;g/kg) near the typhoon eye
along 27.1°N during Saomai's landfall(the shaded area indicates the positive vorticity field,the blank
area indicates the negative vorticity field) a.0500 UTC 10 August;b.1000 UTC 10 August

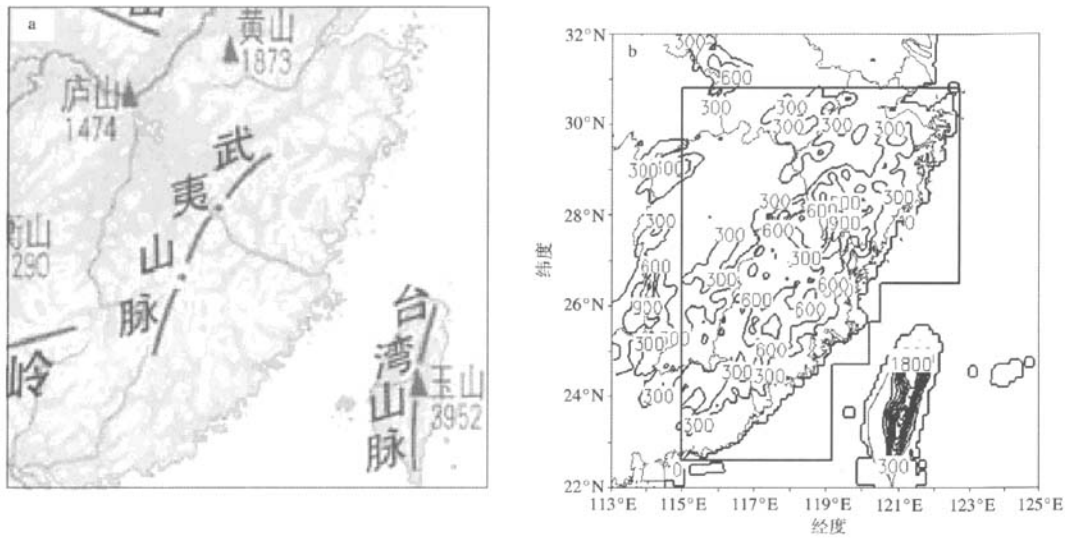


图 4 浙江省、福建省、台湾省一带的地形 a. 实际山脉地形;b. 模式包络地形(m)
Fig. 4 The topography of Fujian, Zhejiang and Taiwan Provinces of China
a. real terrain;b. terrain used in the WRF model(m)

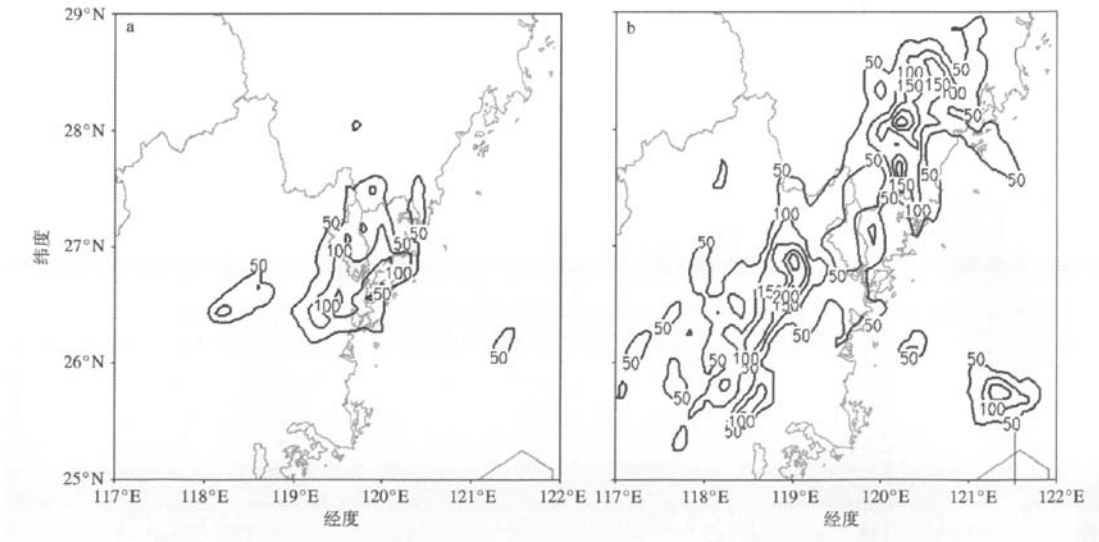


图 5 2006 年 8 月 10 日 00 时—11 日 00 时 24 h 累积降水量(单位:mm)
a. 方案 1;b. 方案 3
Fig. 5 Simulated 24 h cumulative precipitation(mm) from 0000 UTC 10 to 0000 UTC 11 in August 2006
a. scheme 1;b. scheme 3

850 hPa 水汽通量散度极值与相应时次流场的比较状况。

保持原地形高度不变时(方案 2),2006 年 8 月 10 日 10 时(台风刚刚登陆),850 hPa 上的水汽通量散度达到最大(图 8b),数值达到了 -1×10^{-3}

$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$,极值中心出现在 $(118.9^\circ \text{E}, 26.3^\circ \text{N})$ 附近,正好位于太姥山和戴云山交界的喇叭口地形(图 5)处,亦即台风登陆点附近。从图 8b 中可以看到,此喇叭口地形使 850 hPa 上的流场发生了明显的变化,使该处低空暖湿气流强烈辐合上

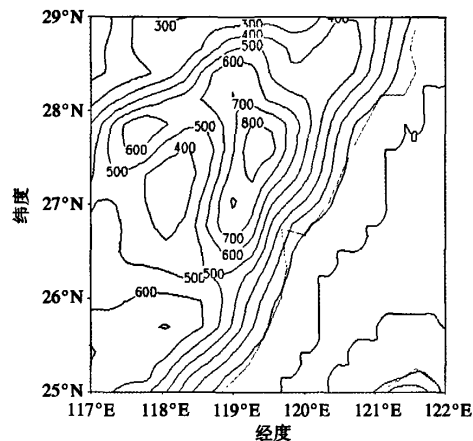


图 6 暴雨区地形(单位:m)

ig. 6 Topographic contours of the rainstorm region(units;m)

升,从而形成了水汽通量散度的极小值区。在方案 1 中(图 8a),10 日 10 时台风中心位置与方案 2 相比向内陆偏移,水汽通量散度极小值中心向西南内陆偏移,位于福建省中部(118.°E,26. 7°N)附近,数值为 $-7 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$ 。这是方案 1 中陆地上无地形抬升作用而海上水汽输送充沛造成的。在方案 3 中,因地形高度增高了一倍,台风中心西侧部分地区的地面气压已低于 850 hPa。该方案中 10 日 10 时台风中心尚未登陆,其西北侧的东北

气流带着来自中国东海洋面上充沛的水汽在太姥山东北部迎风坡一侧辐合上升,使该处出现了水汽通量散度负的极值区,数值达到了 $-1.4 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$ 。这是福建、浙江以东海面上低空的偏南气流受沿海山脉的阻挡继续北上,在太姥山北侧地形高度较小处转为东南气流登陆,在该处地形抬升作用下,产生了较为明显的辐合上升运动,将水汽向高空输送造成的。

可见,地形对低空水平流场及水汽通量散度区的分布均有显著的影响。随着地形高度的升高,沿海山脉迎风坡一侧的水汽通量散度越小,即水汽辐合上升运动越强烈,而背风坡一侧的水汽通量散度越大,即水汽辅散下沉运动越强烈。

2.3 Q 矢量散度

以 Q 矢量散度为强迫项的非地转 ω 方程^[23]为

$$\nabla_h^2(\delta\omega) + f\frac{\partial^2\omega}{\partial p^2} = -2\nabla \cdot \boldsymbol{Q}。$$

Q 矢量表示作用在位温梯度上的地转速度水平形变的大小。上式中 ω 表示垂直速度,f 是科氏力,p 表示气压场。上式中,非地转 Q 矢量散度表示的是产生垂直运动的强迫机制的强弱。从上式可以看出,当 ω 具有波状特征时,上式左边与 $-\omega$ 成正比,从而 $\nabla \cdot \boldsymbol{Q}$ 与 ω 成正比。因此,当 $\nabla \cdot \boldsymbol{Q} < 0$ 即 Q 矢量辐合时, $\omega < 0$,非地转上升运动会在一定时间尺

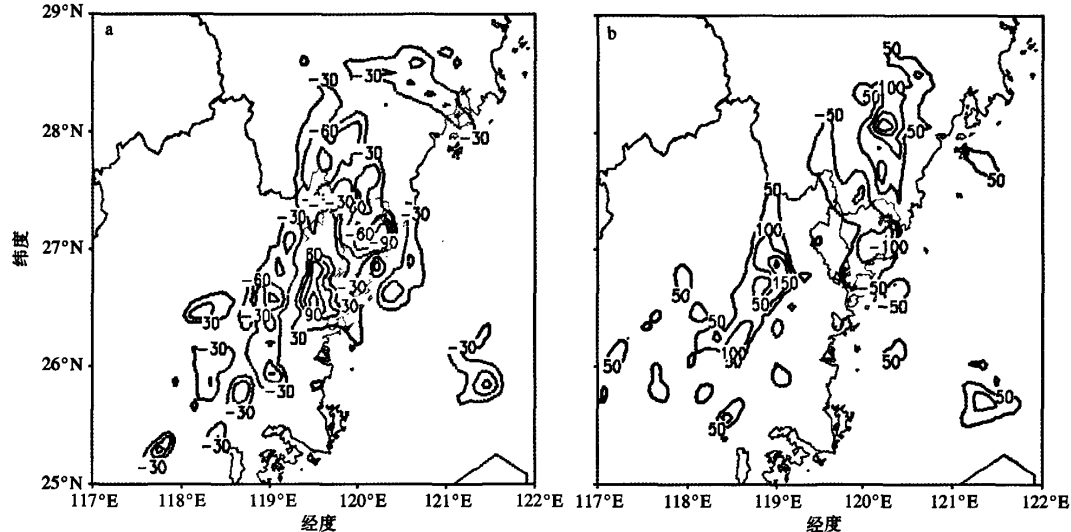


图 7 2006 年 8 月 10 日 00 时—11 日 00 时 24 h 降水量差值(单位:mm)

a. 方案 1 减方案 2 ; b. 方案 3 减方案 2

Fig. 7 The differences of simulated 24 h cumulative rainfall(mm) from 0000 UTC 10 to 0000 UTC 11 August 2006
a. scheme 1 minus scheme 2 ; b. scheme 3 minus scheme 2

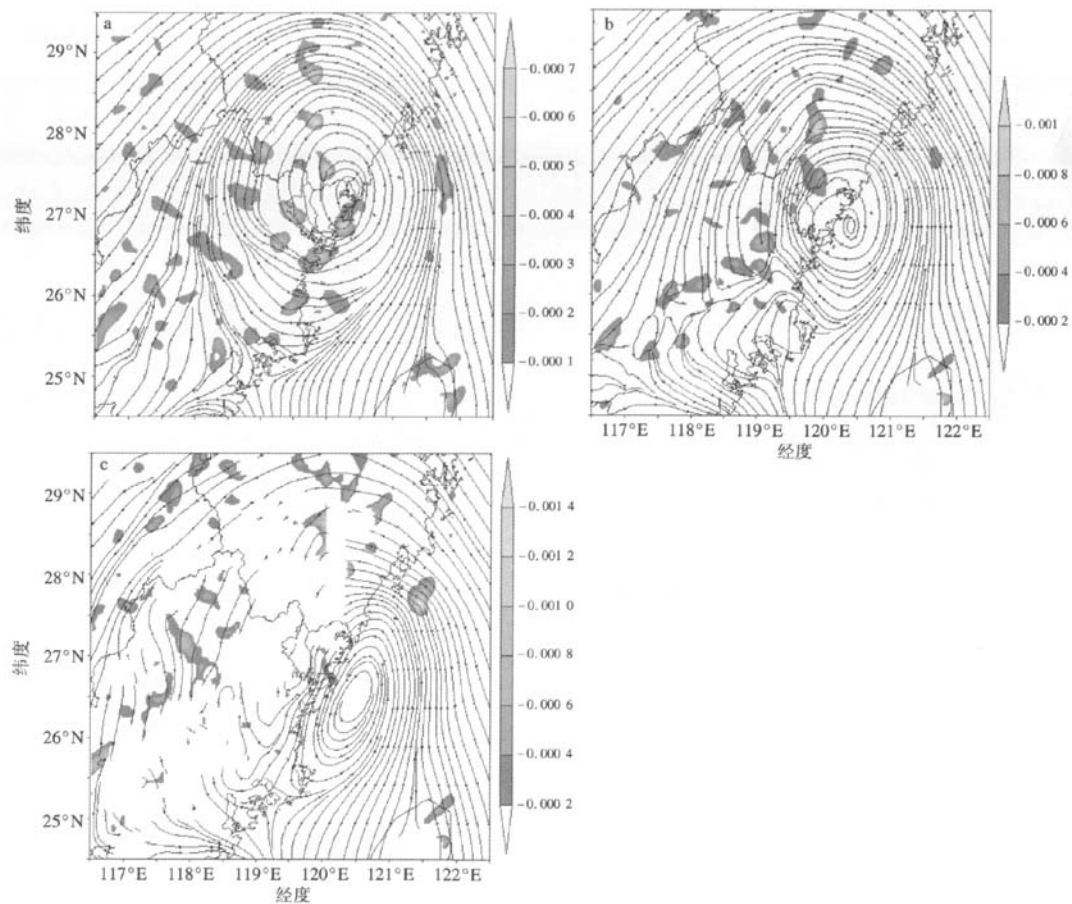


图 8 2006 年 10 月 10 时 850 hPa 水汽通量散度 (阴影; $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$) 最大值及相应时次流场 (流线) 比较
a. 方案 1; b. 方案 2; c. 方案 3
Fig. 8 Maximum divergences of moisture fluxes($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hPa})$) and streamline field at 850 hPa
at 1000 UTC 10 August 2006
a. scheme 1; b. scheme 2; c. scheme 3

度内得以维持,持续一定强度的上升运动,为降水提供有利的动力条件;反之 $\omega > 0$,垂直方向上为下沉运动。所以可以通过诊断 Q 矢量的辐合与辐散来判断垂直运动。

图 9 是 3 种方案模拟的台风刚刚登陆时(2006 年 8 月 10 日 10 时)900 hPa 上的 Q 矢量散度场。从图中可以看到,此时方案 1(图 9a)中产生垂直运动的强迫机制很弱。在方案 2(图 9b)中,该时刻 Q 矢量散度极小值明显增大,中心数值为 $-14.73 \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,位于浙江省东南沿海 120°E 附近太姥山中部迎风坡一侧。当地形高度抬升一倍时(图 9c),在太姥山东北部 120°E 以东、 30°N 以南的沿海陆地上,来自福建、浙江以东洋面上的东南气流因受

地形的强迫抬升作用,垂直上升运动更加剧烈, Q 矢量散度极小值达 $-15.88 \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。地形高度越高,产生垂直运动的地形强迫抬升作用越明显,地形强迫抬升作用产生的垂直上升运动越剧烈, Q 矢量辐合程度越大, Q 矢量散度极小值越小。

为进一步研究台风登陆过程中产生垂直运动的地形强迫抬升机制的强弱,本文计算了 10 日 04 时—10 日 15 时各个时次在太姥东北部迎风坡一侧的 Q 矢量散度极小值。此区域内 Q 矢量散度极小值随时间的变化如图 10 所示。

从图 10 中可以看到,在台风未登陆前, Q 矢量散度极小值并无明显变化。随着台风中心位置向陆地靠近,在台风登陆点附近产生垂直上升运动的地

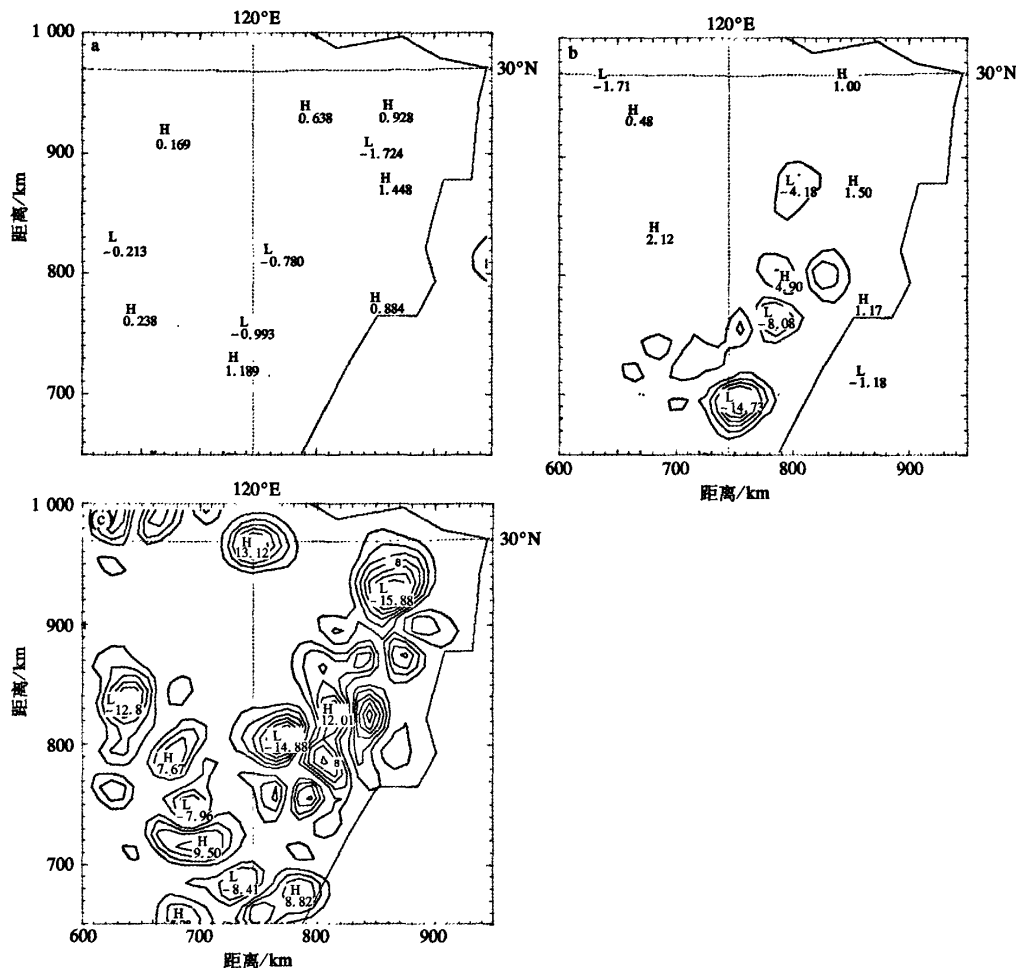


图9 2006年8月10日10时900 hPa上的 Q 矢量散度(单位: $\text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)
a. 方案1;b. 方案2;c. 方案3
Fig.9 Q -vector divergence($\text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) at 900 hPa at 1000 UTC 10 August 2006
a. scheme 1;b. scheme 2;c. scheme 3

形强迫抬升机制越强。在台风登陆时刻附近(10日10时)其值达到了该时段内最小,达 $-11.1 \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。随着台风中心登陆后进一步向内陆的行进,台风登陆点附近产生垂直上升运动的地形强迫抬升机制开始逐渐减弱。

3 结论

- (1)此次对台风登陆过程中降水和路径的数值模拟试验是比较成功的。
- (2)台风登陆期间,沿海山脉对台风降雨量有明显的增强作用。由地形抬升作用产生的降雨区域沿山脉迎风坡一侧有明显的带状分布特征。

- (3)地形高度越高,台风登陆后位势涡度增幅越大,沿海山脉迎风坡一侧气流垂直上升速度越大,相应时刻的降水越强。
- (4)地形对低空水汽通量散度有显著的影响。随着地形高度的升高,沿海山脉迎风坡一侧850 hPa的水汽通量散度越小,即水汽辐合上升运动越强烈,而背风坡一侧的850 hPa水汽通量散度越大,即水汽辐散下沉运动越强烈。
- (5)地形高度越高,产生垂直运动的地形强迫抬升作用越明显,地形抬升机制在台风登陆时刻最强。台风登陆前,随着台风中心位置向陆地的靠近,在台风登陆点附近产生垂直上升运动的地形强迫抬

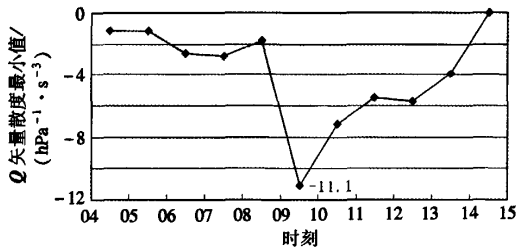


图 10 2006 年 8 月 10 日 04 时—10 日 15 时太姥山
东北坡 900 hPa 上的 Q 向量散度极小值

Fig. 10 The minimum of Q -vector divergence at 900 hPa
over the NE slope of the Tailaoshan mountains
from 0400 UTC to 1500 UTC 10 August 2006

升机制逐渐加强,并在台风登陆时刻达到最强;台风登陆后,随着台风中心进一步向内陆行进,台风登陆点附近的地形强迫抬升机制开始逐渐减弱。

参考文献:

- [1] 周国兵,沈桐立,韩余. 台风对西南低涡影响的数值模拟与诊断个例分析[J]. 气象科学,2006,26(6):620-626.
- [2] 赖绍钧,何芬,沈桐立,等. “龙王”(LONGWANG)台风过程湿位涡的诊断分析[J]. 气象科学,2007,27(3):266-271.
- [3] 狄利华,姚学祥,解以扬,等. 冷空气入侵对 0509 号台风“麦莎”变性的作用[J]. 南京气象学院学报,2008,31(1):18-25.
- [4] 朱健,何海滨. 0604 和 0605 号台风的数值模拟与暴雨成因对比分析[J]. 南京气象学院学报,2008,31(4):530-538.
- [5] 季亮,费建芳,黄小刚,等. 台风“云娜”(2004)近海加强的数值模拟研究[J]. 气象科学,2007,27(5):530-535.
- [6] 黄安丽. 浙江省暴雨与地形[J]. 浙江气象科技,1992,13(4):1-4.
- [7] 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等. 热带气旋动力学引论[M]. 北京:气象出版社,2002:168-313.
- [8] 郑庆林,吴军. 我国东南海岸线分布对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究[J]. 热带气象学报,1996,12(4):304-313.
- [9] 蔡则怡,宇如聪. LASG_坐标有限区域数值预报模式对一次登陆台风特大暴雨的数值试验[J]. 大气科学,1997,21(4):459-471.
- [10] 钮学新,杜惠良,刘建勇. 0216 号台风降水及影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报,2005,63(1):57-68.
- [11] 解以扬,徐祥德. 登陆台风暴雨地形增幅的数值试验[J]. 南京气象学院学报,1993,19(4):451-456.
- [12] Wu C C, Yen T H, Kuo Y H. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect[J]. Wea Forecasting,2002,17(5):1001-1015.
- [13] 钮学新,董加斌,杜惠良. 华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析[J]. 应用气象学报,2005,16(3):402-407.
- [14] 胡伯威. 中尺度地形对大气铅直运动和强降水的影响[J]. 暴雨灾害,2000,19(1):8-23.
- [15] Pierrhumbert R T. Linear results on the barrier effects of mesoscale mountains[J]. J Atmos Sci,1984,41:1345-1367.
- [16] Pierrhumbert R T, Yman B W. Upstream effects of mesoscale mountains[J]. J Atmos Sci,1985,42:977-1003.
- [17] Tuleya R E, Bender M A, Kurihara Y. A simulation study of the landfall of tropical cyclones using a movable nested mesh - model[J]. Mon Wea Rev,1984,112:124-138.
- [18] Bender M A, Tuleya R E, Kurihara Y. A numerical study of the effect of a mountain range on a landfall tropical cyclone[J]. Mon Wea Rev,1985,113:567-582.
- [19] 吴启树,沈桐立,李双锦. 影响福建沿海的 0010 号“碧利斯”台风暴雨的地形敏感性试验[J]. 台湾海峡,2005,24(2):236-242.
- [20] 王晓芳,胡伯威. 地形对 0604 号“碧利斯”登陆台风暴雨的影响[J]. 暴雨灾害,2007,26(2):97-102.
- [21] 冀春晓,薛根元,赵放,等. 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,2001,21(2):233-244.
- [22] 陈云蔚. “麦莎”台风过程回顾及地形对台风降水影响[J]. 浙江气象,2006,27(3):1-9.
- [23] 朱健,沈晓玲. “云娜”台风暴雨的 Q 向量与螺旋度诊断分析[J]. 科技通报,2007,23(1):22-27.

(责任编辑:张福颖)