

运动学效应对登陆台风近地面风场模拟的影响

汤胜茗¹, 黄穗¹, 余晖¹, 顾明²

(1. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以 2016 年超强台风“莫兰蒂”为例, 采用天气研究与预报模型(WRF)耦合加利福尼亚气象模型(CALMET)的方法, 提出了适用于台风条件下的 CALMET 运动学效应改进方案(KETT)。结果表明, KETT 方案可以成功消除 CALMET 原有运动学效应带来的风场模拟系统性误差, 并且 10 m 高度风速和风向模拟误差比原有方案分别降低 10.8% 和 5.4%。在石蛇山区域, 与不采用运动学效应相比, KETT 方案 10 m 高度风速和风向的模拟误差均降低 12% 以上, 能够更准确地反映局地地形对台风近地面精细化风场的影响。

关键词: 台风; 运动学效应; 风场; 复杂地形; 莫兰蒂

中图分类号: P49

文献标志码: A

Impact of Kinematic Effects on Simulated Near-Surface Wind Field of Landfall Typhoons

TANG Shengming¹, HUANG Sui¹, YU Hui¹, GU Ming²

(1. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A WRF (weather research and forecasting model)/ CALMET (California meteorological model) coupled system was used to simulate the near-surface wind field of super typhoon Meranti in 2016. An improved scheme of kinematic effects of terrain for typhoons (KETT) was proposed. The results show that the systematic error of simulated wind fields near the typhoon center can be successfully eliminated by using the KETT scheme. Compared with the original kinematic effects, the root mean squared errors (RMSEs) of 10-m wind speed and wind direction can be reduced by 10.8% and 5.4%, respectively. Besides, both RMSEs of 10-m wind

speed and wind direction with the KETT scheme can be reduced by over 12% than those without the kinematic scheme at Shishe Mountain, indicating that the impact of local terrain on the fine-scale typhoon wind structure near the surface can be better expressed by the KETT scheme.

Key words: typhoon; kinematic effect; wind fields; complex terrain; Meranti

虽然台风通常会造成经济损失和人员伤亡, 但伴随台风而来的强风和降水对风能开发、干旱缓解等具有积极正面的影响^[1]。近地面台风风场的预测和研究在风资源评估、大气污染物扩散和土木工程等方面具有重要的应用价值。因此, 准确计算登陆台风的近地面风场, 尤其是复杂地形条件下的高分辨率风场, 对台风防灾减灾和工程应用具有重要的参考意义。

采用中尺度数值天气预报模式, 是研究复杂地形条件下台风近地面风场的重要方法之一。著名的中尺度天气预报模式有: 区域大气模型系统(RAMS)^[2]、Eta 模型(Eta)^[3]、第五代宾夕法尼亚州立大学/美国国家大气研究中心中尺度模型(MM5)^[4]、天气研究与预报模型(WRF)^[5]等。然而, 文献[6]认为由于物理机制上的简化, 以及初始状态、侧边边界条件和表面特征的不确定性, 这些中尺度预报模式具有较大的局限性。近年来, 将中尺度预报模式与诊断模式相结合的方法越来越多地用于高分辨率风场的模拟研究。通常, 中尺度模式求解水平网格间距为几公里的大气原始方程组, 诊断模型基于连续性方程来考虑更高分辨率的局部地形影响^[7]。其中, 加利福尼亚气象模式(California

收稿日期: 2019-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1501104); 国家重点基础研究发展计划(2015CB452806); 国家自然科学基金(41805088, 41875080); 上海市自然科学基金(18ZR1449100); 土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SLDRCE1-A-05)

第一作者: 汤胜茗(1987—), 男, 工学博士, 主要研究方向为台风。E-mail: tangsm@typhoon.org.cn

通信作者: 顾明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构风工程。

E-mail: minggu@tongji.edu.cn



Meteorological Model, CALMET)是目前相关研究中较为常用的诊断模式之一^[8-11],它主要为三维非稳态拉格朗日扩散模式(California Puff Model, CALPUFF)提供三维气象场,其中风场通过质量守恒定律进行诊断。Yim等^[8]以MM5嵌套CALMET得到100 m水平分辨率的风场,研究发现即使CALMET中不加入观测资料同化,也可以再现香港地区时长一年风场的三维结构特征,测站的风速、风向对比较好。Lu等^[9]利用WRF/CALMET耦合模式将风场降尺度到水平分辨率100 m,对广东省海陵岛风场进行了为期一年的模拟,研究发现,在大气层结稳定时期,耦合模式对风速诊断表现较好,与4个风塔的数据对比较好。Gonzalez等^[10]利用WRF/CALMET模式模拟西班牙西北部复杂地形和海岸区域,发现CALMET模型比WRF模型能提供更精确的行星边界层(PBL)高度。值得注意的是,Lu等在文献[9]中提到,CALMET对边界层高分辨气象场的有效模拟是基于稳定大气状况,是否适用于极端天气条件下需要进一步研究。

运动学效应是CALMET模式中对风场调整的重要步骤,其理论基础为Liu等^[12]提出的方法,用以计算水平风分量受地形强迫的影响。主要步骤为通过大气稳定度来调整由于地形强迫的垂直速度在不同高度的衰减,并进一步基于质量守恒方程获得水平风场的调整。Liu等^[12]提出的诊断模型原用于模拟复杂地形下的风场,并由此预报野外灌木丛火灾的蔓延。辛渝等^[13]在使用CALMET进行风场预报时指出,运动学效应在大部分情况下均为负效应,因此建议在不稳定天气背景会对模拟的局地风特性产生何种影响情况下,CALMET诊断风场模块以不采用运动学效应调整为佳。由此看出,CALMET运动学效应最好是应用于较为稳定的大气状态下,若要应用于台风条件下的近地面风场研究,则需要加以改进。

为此,本文以中尺度模式WRF结合诊断模式CALMET,提出了适用于台风条件下的CALMET改进运动学效应,对2016年第14号超强台风“莫兰蒂”进行了数值模拟,进一步对比分析了改进CALMET运动学效应对风场模拟的效果,然后开展了CALMET运动学效应敏感性试验,探讨运动学效应对复杂地形条件下登陆台风近地面风场模拟的影响。

1 超强台风“莫兰蒂”简介

2016年9月8日夜间(世界标准时间,下同),“莫

兰蒂”(Meranti)在美国关岛以西约200 km的洋面上生成。其后缓慢向西北方向移动,并于9月10日06时增强为热带风暴。9月11日,“莫兰蒂”快速加强,并在24 h内连跳3级:11日06时增强为强热带风暴,18时增强为台风,12日00时增强为强台风,12日03时达到了超强台风级别。13日中午,“莫兰蒂”强度达到最大,中心附近最大风速为 $75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心最低气压为890 hPa。通过巴士海峡后,由于受台湾岛地形影响,“莫兰蒂”强度逐渐减弱,并于14日19时在福建省厦门市登陆,登陆时中心附近最大风速为 $52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心最低气压为940 hPa。登陆后,“莫兰蒂”强度快速减弱,并在6 h内减弱至热带风暴级别。15日中午,“莫兰蒂”在福建省内转为东北方向移动,随后进入江西境内,17日下午在黄海海域减弱消散。

“莫兰蒂”结构比较紧实,台风眼较小,破坏性极大。“莫兰蒂”的强风区主要集中在其中心附近10 km范围内,登陆后速度呈现不对称性,台风北侧风速大于南侧风速^[14]。

2 数值模式设计

2.1 WRF模式设置

本文使用的中尺度模式是由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和奥克拉荷马大学(University of Oklahoma)共同研发的新一代中尺度模式WRF (Weather Research and Forecast Model) V3.8^[5]。WRF模式共设置3层双向嵌套网格,由外至内分别简称为D1、D2、D3,水平分辨率分别为27、9、3 km,网格数分别为 135×101 、 343×241 、 445×421 ,D1的网格中心点位于 25°N , 125°E ,如图1所示。垂直方向共30层,模型的顶部压力设置为50 hPa,模拟时间从2016年9月11日至9月16日,共计120 h。

WRF初始场和侧边界数据来自NCEP全球再分析资料,时间分辨率为6 h,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。地形高程数据来自美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)全球30 s分辨率地形数据集(GTOPO30);土地利用数据来自USGS中分辨率成像光谱仪(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)全球30 s分辨率的21种分类的土地利用数据集。WRF模式主要参数化方案设置如表1所示。

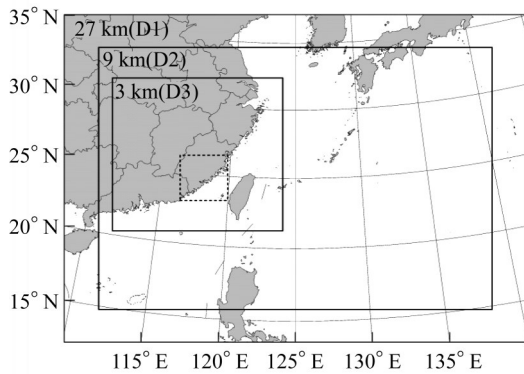


图1 WRF三层网格嵌套示意图

Fig. 1 Area coverage for three nested domains in WRF

表1 WRF模式主要参数方案设计

Tab. 1 Parametrization design in WRF

参数化方案	方案设置
微物理方案	Lin方案 ^[15]
边界层方案	QNSE-EDMF方案 ^[16]
积云参数化方案	Kain-Fritsch方案 ^[17] (仅D1区域)
长波辐射方案	RRTMG方案 ^[18]
短波辐射方案	RRTMG方案 ^[18]

2.2 CALMET模式设置

本文使用的微尺度诊断模式为CALMET V6.5.0,它为三维非稳态拉格朗日烟团扩散模式CALPUFF提供三维气象场与必要的边界层参数,包括诊断风场模块和微气象模块^[19]。

2.2.1 CALMET运动学效应

CALMET模式中,地形运动学效应采用Liu等^[15]方法,用以计算水平风分量受地形强迫的影响。首先,在笛卡尔坐标系 (x, y, z) 下计算受地形强迫的垂直气流 w ,并满足大气稳定度递减指数函数。

$$w = (V_h \nabla h_t) \exp\left(-\frac{N}{|V_h|} z\right) \quad (1)$$

$$N = \left[\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}\right]^{1/2} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: V_h 为水平风矢量; h_t 为地形高度; N 为维萨拉频率; g 为重力加速度; θ 为位温。然后,将笛卡尔坐标系下的垂直速度 w 转换至地形跟随坐标系下的速度 W ,如下式所示:

$$W = w - u \frac{\partial h_t}{\partial x} - v \frac{\partial h_t}{\partial y} \quad (3)$$

式中: (u, v) 为笛卡尔坐标系 (x, y, z) 下的水平速度分量。最后,假定 W 不变,对初猜风场重复进行辐散最小化调整,直到整个风场的三维散度小于阈值 ϵ ,即

$$\nabla V = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} < \epsilon \quad (4)$$

式中: V 为三维风矢量; ϵ 默认取值为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

由公式(1)~(4)可知,CALMET模式中使用运动学效应的默认前提是,大气环流为静力稳定、没有强烈垂直运动的流动,即水平无辐散流动。在此条件下,通过三维辐散最小化对水平风场进行调整。然而,在台风这一天气系统中,由于内核区眼墙附近存在较强烈的垂直运动,大气流动并不满足水平无辐散条件,因此采用上述方法对台风近地面风场进行运动学效应的调整是不合适的。

2.2.2 改进的运动学效应方案KETT

为了研究登陆台风近地面水平风场受地形强迫的影响,针对CALMET原始方案的不足,本文提出了适用于台风风场的改进运动学效应方案,取名为KETT(Kenematic Effects of Terrain for Typhonns),具体的方案流程如图2所示。图中小写变量为笛卡尔坐标系变量,大写变量为地形跟随坐标系变量。

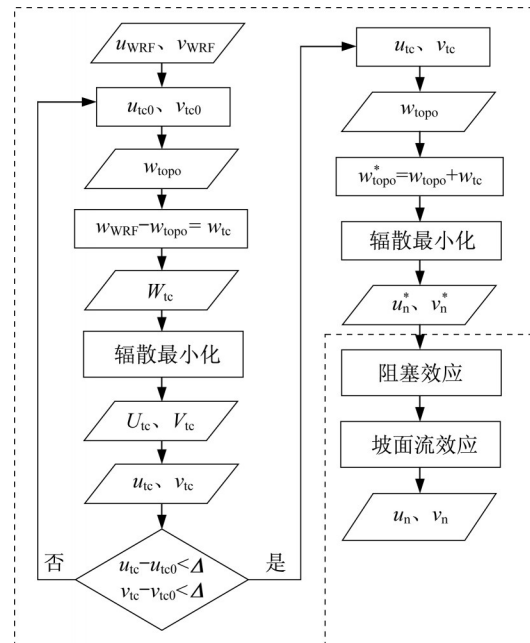


图2 KETT方案流程图

Fig. 2 Flow chart of KETT

图2中, (u, v, w) 为笛卡尔坐标系 (x, y, z) 下的三维速度分量, (U, V, W) 为地形跟随坐标系 (X, Y, Z) 下的三维速度分量。假定相同水平分辨率下,WRF模式和CALEMT模式中的地形对风场的影响一致,则KETT方案的具体做法如下:

(1) 以WRF水平风场数据 u_{WRF} 、 v_{WRF} 作为CALMET模式初猜场 u_{ic0} 、 v_{ic0} ,利用公式(1)求得地

形强迫出来的垂直风速 w_{topo} , 然后根据 WRF 模式输出的垂直风速 w_{WRF} 减去 w_{topo} , 便可得到笛卡尔坐标系下台风环流本身的垂直速度 w_{tc} 。

(2) 将 w_{tc} 转换至地形跟随坐标系下的垂直风速 W_{tc} 后, 利用公式(4)进行辐散最小化迭代计算, 求得地形跟随坐标系下的水平风场 U_{tc} 、 V_{tc} 。

(3) 将 U_{tc} 、 V_{tc} 转换为笛卡尔坐标系的水平速度 u_{tc} 、 v_{tc} , 并计算其与 CALMET 初猜场 u_{tc0} 、 v_{tc0} 的残差, 若小于阈值 Δ (本文取 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 则计算通过进入下一步, 否则将 u_{tc} 、 v_{tc} 作为新的 CALMET 初猜场重新迭代计算, 直到小于阈值 Δ 。

(4) 根据 u_{tc} 、 v_{tc} , 利用公式(1)再次求得地形强迫出来的垂直风速 w_{topo} , 然后将台风环流本身的垂直速度 w_{tc} 加入到 w_{topo} 中形成新的垂直速度 w_{topo}^* , 该垂直速度同时考虑了 CALMET 地形强迫效应和台风环流本身垂直运动。

(5) 根据 w_{topo}^* 进行辐散最小化迭代计算, 求得笛卡尔坐标的水平速度 u_n^* 、 v_n^* , 下角标 n 代表水平分辨率, 本文取 3 km 或 500 m 。

(6) 最后, 进行 CALMET 的阻塞效应与坡面流效应计算, 得到最终的水平风场 u_n 和 v_n 。

2.2.3 CALMET 模式设计

CALMET 仅设置 1 层嵌套网格, 水平分辨率为 500 m , 网格数为 745×745 , 如图 1 虚线方框所示。垂直方向共 17 层, 模式顶部高度为 3500 m , 底层较密、顶层较疏, 模拟时间从 2016 年 9 月 13 日 21 时至 9 月 15 日 21 时, 共计 48 h 。

CALMET 初猜场数据来自 WRF 最内层网格 D3 的模拟结果。高程数据来自美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的航天飞机雷达地形测绘任务 (Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM) SRTM90 version 4 数据, 水平分辨率为 90 m ; 土地利用数据来自中国基础地理信息中心的全球地表覆盖数据库 GL30 (GlobeLand30), 水平分辨率为 30 m 。

基于 CALEMT 运动学效应, 本文共设置三组对比试验: 第一组试验采用 CALMET 原始运动学效应方案, 记为 CAL1; 第二组试验采用改进的运动学效应方案 KETT, 记为 CAL2; 第三组试验不采用运动学效应, 记为 CAL3, 如表 2 所示。三组试验中, 均采用阻塞效应和坡面流效应, 均不采用客观分析。

2.2.4 观测数据简介

台风“莫兰蒂”影响期间, 共收集到福建省境内 981 个自动观测站的风速观测记录。自动观测风速

表 2 CALMET 三组对比试验设计

Tab. 2 Three simulations in CALMET

方案	运动学效应
CAL1	原始方案
CAL2	KETT
CAL3	无

为 10 m 高度处 1 min 平均的风速风向记录, 时间分辨率为 5 min , 观测时间从 2016 年 9 月 13 日 00 时至 16 日 00 时, 涵盖 CALMET 全部模拟时间。

3 数值模拟结果

3.1 WRF 模拟结果

图 3 对比了 WRF 数值模拟结果和再分析资料有关台风“莫兰蒂”路径和强度随时间的变化情况, 竖虚线代表台风登陆时间 (2016 年 9 月 14 日 19 时)。本文采用的再分析资料来源于中国气象局上海台风研究所整编的台风最佳路径数据集 (BST)^[20]。从路径模拟 (图 3a) 来看, WRF 模拟在厦门市的登陆时间为 9 月 14 日 23 时, 比实际登陆时间晚约 4 h , 说明模拟的台风移动速度在 9 月 14 日较慢。但总体而言, WRF 模式很好再现了“莫兰蒂”在洋面上的西北行、从台湾岛南侧经过后在福建南部登陆以及登陆后的北折过程, 模拟效果较好。从强度模拟 (图 3b、3c) 来看, WRF 模式成功模拟了“莫兰蒂”快速增强阶段, 模拟最大风速为 $68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最低海平面中心气压为 905 hPa , 与再分析结果非常接近。9 月 14 日 19 时, “莫兰蒂”在厦门登陆后, WRF 模拟的台风强度衰减较慢, 并没有出现实际情况中快速减弱的过程。赵玉春等^[21]认为, “莫兰蒂”登陆后快速减弱可能是由于涡旋暖湿中心消失以及气旋性涡柱水平尺度减小所导致。总体而言, WRF 模式对台风“莫兰蒂”的路径和强度模拟都较成功, 其最内层网格 D3 模拟结果将为 CALMET 诊断模式提供初猜场数据。

3.2 CALMET 模拟结果

图 4 给出了台风“莫兰蒂”登陆前 (9 月 14 日 17 时) 和登陆后 (9 月 15 日 01 时), CAL1 试验和 CAL2 试验中地表 10 m 高度处的风速差值场图。其中, 差值风场为水平分辨率 500 m 的 CALMET 格点风场减去水平分辨率 3 km 的 CALMET 格点风场。在 CAL1 试验中, 由于采用了 CALMET 原始的运动学效应方案, 辐散最小化调整并未考虑台风本身垂直运动的影响, 因此无论在台风登陆前或登陆后, 台风

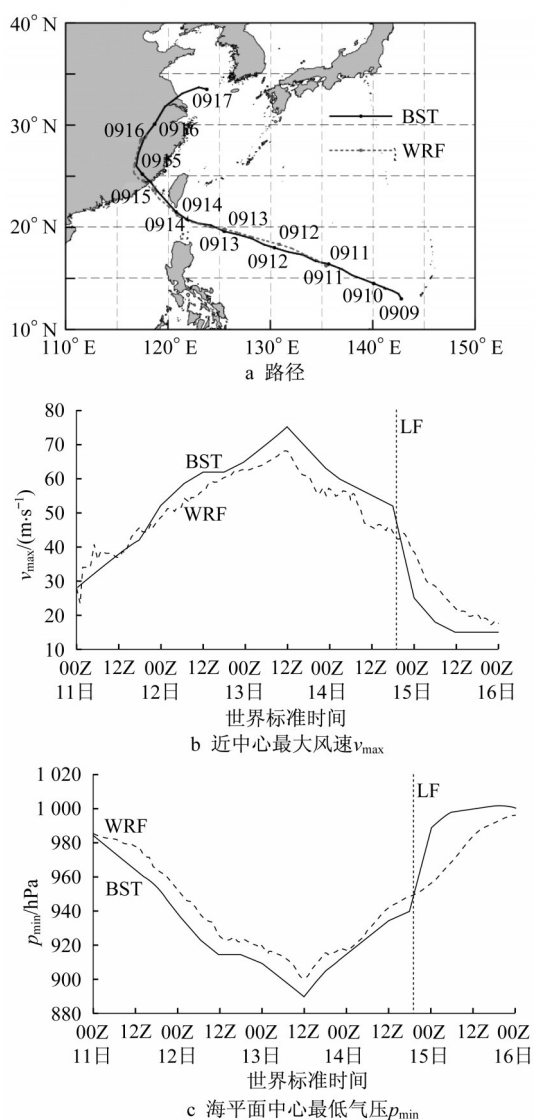


图3 2016年9月台风“莫兰蒂”的WRF模拟结果和再分析资料对比图

Fig. 3 Vortex development in both BST analysis and WRF simulation of typhoon Meranti in September 2016

中心附近均存在一个明显的系统误差,风矢差值指向台风中心(图4a、4b)。在CAL2试验中,由于采用了改进的运动学效应方案KETT,考虑了台风中心附近的垂直运动,台风中心附近的系统误差得到了消除(图4c、4d)。

为了定量对比CALMET运动学效应改进前后地表风场的差异,分别计算了台风七级风圈(10 m高度平均风速大于 $17.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,简称R17)内CAL1、CAL2和WRF模拟中地表10 m高度处风速 v_{10} 和风向 d_{10} 的均方根误差(RMSE)随时间的变化,如图5所示。从风速统计结果来看,使用CALMET原有

运动学效应(CAL1试验)时, v_{10} 均方根误差在 $6\sim 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,相对WRF模拟有 $20\%\sim 30\%$ 的改进;采用改进的运动学效应方案KETT(CAL2试验)

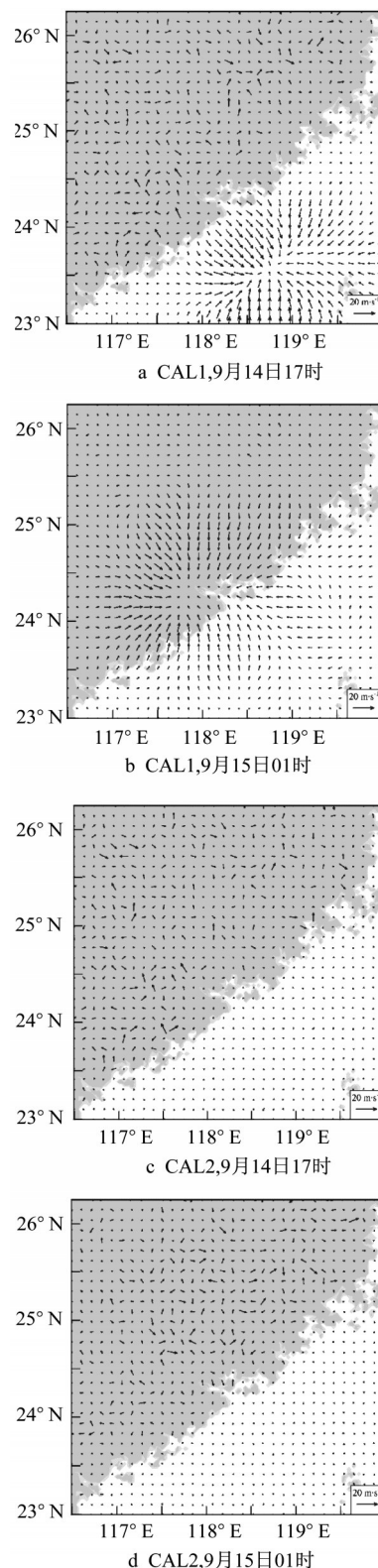


图4 CAL1和CAL2试验10 m高度风速差值场。

Fig. 4 Differences of 10 m wind vectors between CAL1 and CAL2

后, v_{10} 均方根误差在 $6 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 相对于 CAL1 其风速误差在台风登陆前后平均减小 10.8% (14 日 18 时至 15 日 04 时)。从风向统计结果来看, CAL1 相对于 WRF 模拟结果并没有明显改善, 这主要是由于台风条件下, CALMET 原始运动学方案不适用, 地表风场主要受阻塞效应控制而非运动学效应控制, 从而导致模拟风向的改变几乎为零; 而采用了 KETT (CAL2 试验) 后, d_{10} 的均方根误差有了较为明显的改善, 比 CAL1 平均减小 5.4% 。综合来讲, 改进后的运动学效应方案 KETT 对台风大风区域的地表风场模拟能力有较显著提升。

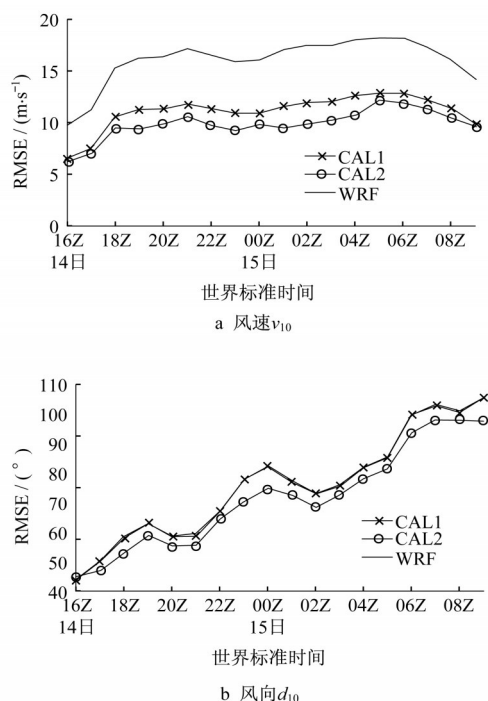


图5 2016年9月台风“莫兰蒂”七级风圈内风速和风向均方根误差时序图

Fig. 5 Time series of RMSE for wind speed and wind direction within R17 of typhoon Meranti in September 2016

4 运动学效应敏感性分析

为了研究复杂地形条件下 CALMET 运动学效应对近地面风场模拟的影响, 选取了位于台风登陆位置东侧一个山体——石蛇山作为目标研究区域 (图6)。石蛇山区域范围大小为 $45 \text{ km} \times 30 \text{ km}$, 山体主要为东西走向, 石蛇山主峰呈现倒“T”型, 其东南侧有一副峰, 南面主要为平原地区, 北面是更为复杂的山地群, 该区域内最高点海拔 1118.5 m , 位于 118.186°E , 24.905°N 。由于该区域为单峰结构, 且

周围地势较为平坦, 可作为典型区域进行研究分析。

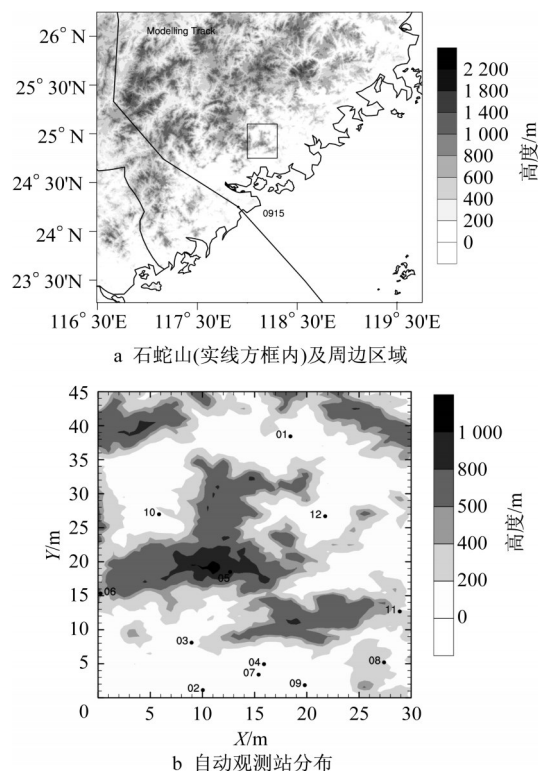


图6 石蛇山区域及自动观测站分布

Fig. 6 Shishe Mountain and automatic surface observational stations

为了定量研究石蛇山区域内 CALMET 运动学效应对登陆台风近地面风场模拟的影响, 分别统计了 CAL2、CAL3 和 WRF 模拟中地表 10 m 高度的风速 v_{10} 和风向 d_{10} 与该区域内 12 个观测站点数据的均方根误差, 如图7所示。在该统计中, 可根据“莫兰蒂”强风区 (风速 $\geq 17.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 影响石蛇山区域的时间分为三个时间段: (I) 台风强风区影响前; (II) 台风强风区影响时; (III) 台风强风区影响后。

从风速统计结果来看, 采用改进后的运动学效应方案 KETT (CAL2) 比不使用运动学效应 (CAL3) 得到的 v_{10} 误差要小, 三个时间段平均均方根误差分别减小 12.1% 、 17.9% 和 15.1% 。从风向统计结果来看, 使用 KETT 方案 (CAL2) 比不使用运动学效应 (CAL3) 得到的 d_{10} 误差总体上减小, 三个时间段平均均方根误差分别减小 15.5% 、 20.3% 和 14.6% 。综合来讲, 改进后的运动学效应方案 KETT 对登陆台风影响下的复杂地形近地面风场模拟能力有较显著提升。

图8给出了台风“莫兰蒂”强风区影响前后, CAL2 和 CAL3 在石蛇山区域的 10 m 高度风速散点分布图。由图8可知, 在台风强风区影响前, CAL2

和CAL3方案模拟的地表10 m风速较接近(图8a);在台风强风区影响时,两个方案模拟风速发散度增大并呈“圆形”分布(图8b);台风强风区影响后,在10~20 m·s⁻¹风速模拟区间,CAL2模拟风速小于CAL3(图8c)。

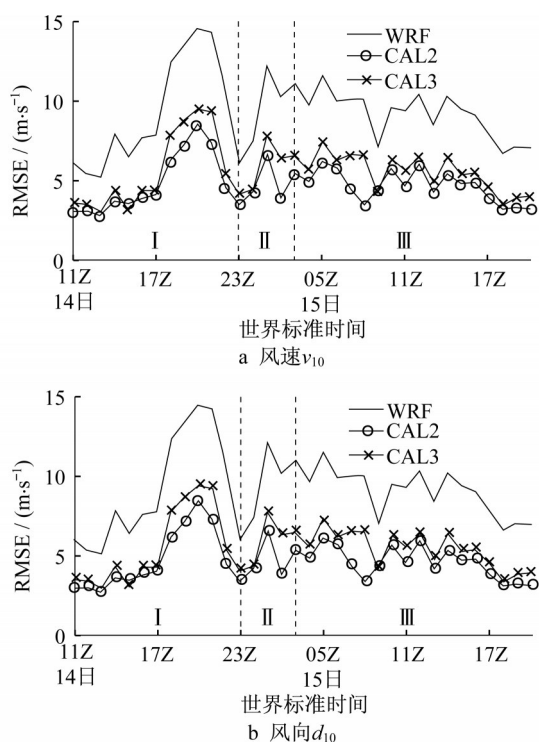


图7 石蛇山区域内,2016年9月台风“莫兰蒂”风速和风向均方根误差时序图

Fig. 7 Time series of RMSE for wind speed and wind direction of typhoon Meranti in September 2016 at Shishe Mountain

为了进一步对比CAL2和CAL3在不同地形条件下模拟风速的不同,现选取典型测站风速进行对比分析。本文共选取3个测站作为个例进行分析:测站1、测站4和测站5,其位置如图6b所示。其中,测站1位于石蛇山北侧的丘陵区域,其北面为其他山脉;测站4位于石蛇山南侧,其南面基本为地势较低的平原;测站5位于石蛇山主峰。图9给出了CAL2、CAL3和WRF模拟在10 m高度处的风速 v_{10} 、风向 d_{10} 在3个测站处与观测数据(OBS)对比的时间变化图。由于台风登陆位置位于石蛇山西南侧,因此该区域的测站风向变化基本经历从东北风转为东风再转为东南风,最后转为偏南风的过程,而风速大小出现先增加后减小的趋势。

台风强风区影响前(阶段I),各方案的风向差别不大,但是CAL2的风速值比CAL3和WRF的更加接近观测值,说明KETT方案可以更有效地模拟出

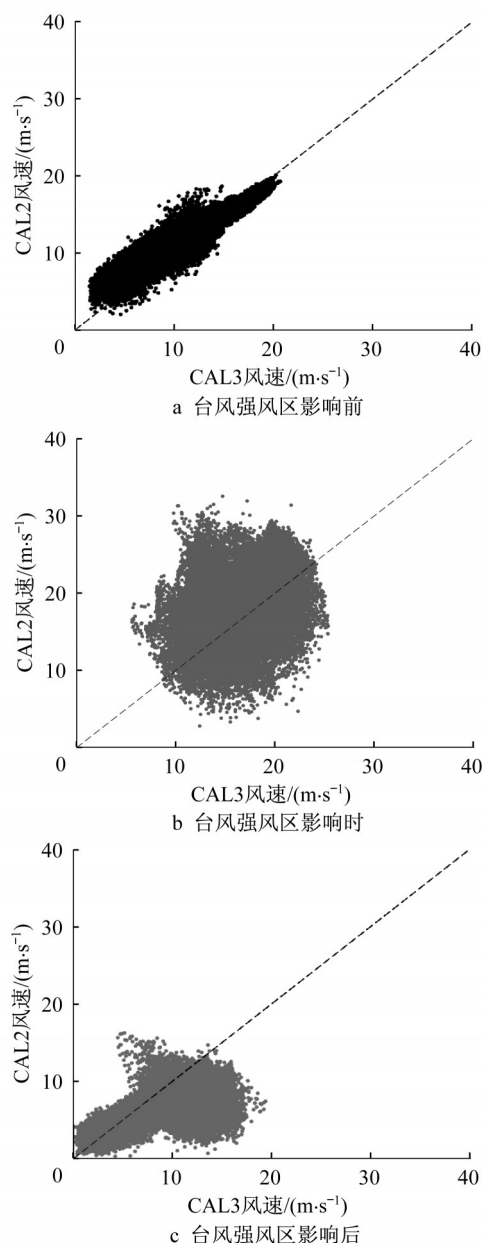


图8 CAL2和CAL3在石蛇山区域10 m高度处风速散点图
Fig. 8 Scatterplots of 10-m wind speed of CAL2 and CAL3 simulations at Shishe Mountain.

测站风速变化趋势。另外在阶段I,测站5的 v_{10} 大于测站1和测站4,这主要是因为此时主导风向为东北风,测站1和测站4分别位于石蛇山的迎风坡和背风坡,地形阻塞效应导致了其风速小于位于山顶的测站5。台风强风区影响时(阶段II),无论是风速还是风向,CAL2的模拟值与观测值更为接近,尤其是在测站4与测站5,其风速最大值几乎与观测最大值完全一致。台风强风区影响后(阶段III),采用改进后的运动学效应方案KETT可以大致描绘实测风速风向的变化特征,但其效果不如阶段I和阶段II好,主要是由于WRF模式在“莫兰蒂”台风登陆后其路径

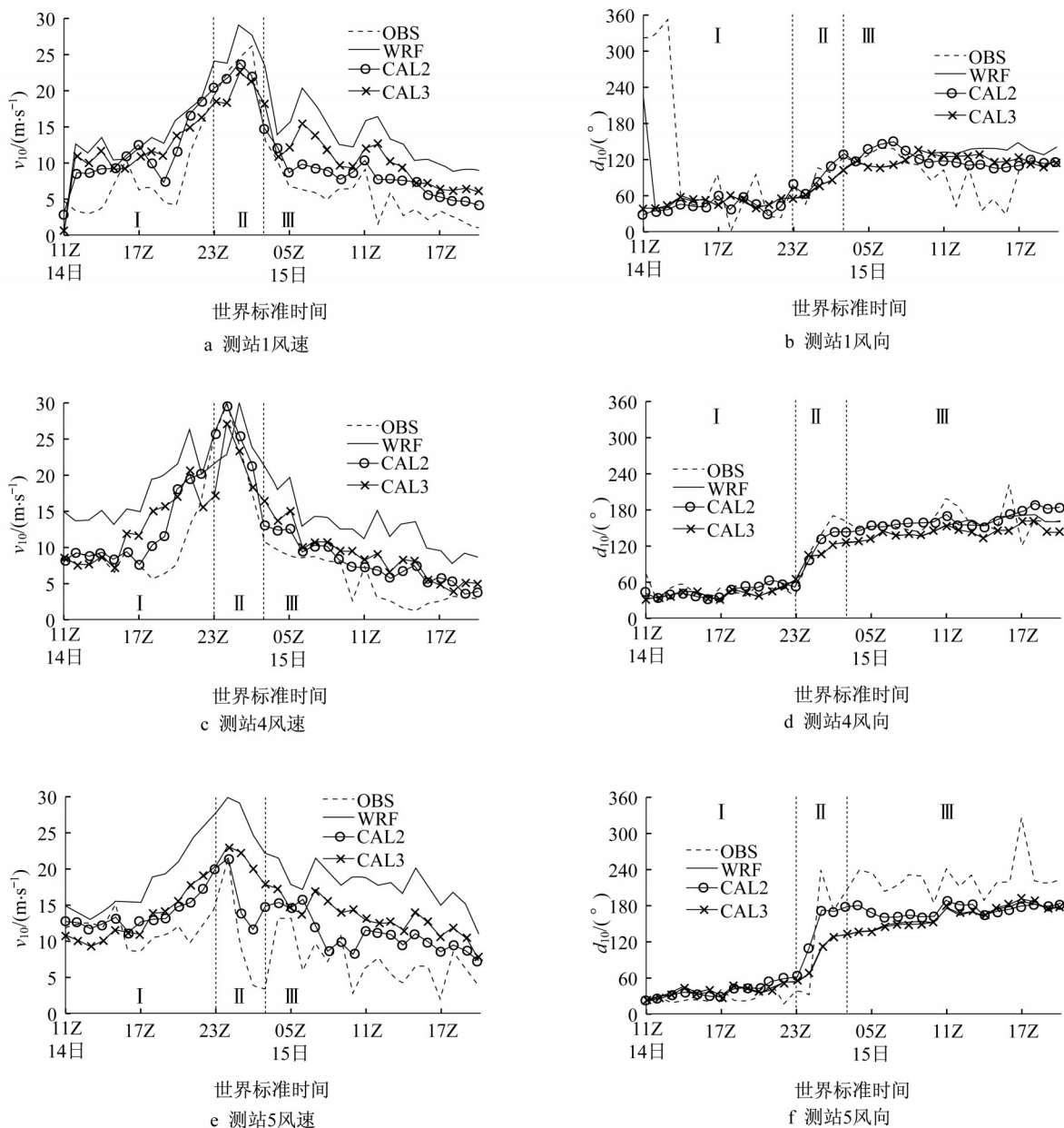


图9 CAL2、CAL3、WRF模拟与观测数据的站点时序图

Fig. 9 Time series of v_{10} and d_{10} in both WRF simulation and CALMET simulations of CAL2 and CAL3 observed at three stations

和强度模拟效果较差,不如登陆前效果好。

对比CAL2、CAL3与观测数据的偏差可以发现,除了测站4的第II阶段,CAL2得到的10 m高度风速偏差普遍比CAL3更小。对于以上3个测站来说,KETT方案会引起 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内的风速改变量,位于低位势的测站1和测站4,在I、III阶段使得风速减弱(I阶段5%以下,III阶段10%以上),II阶段使风速增大。对于测站5来说,KETT方案会在所有三个阶段均引起风速减小,在阶段II和阶段III其减小量约20%。另外,在台风强风区影响时(阶段II),KETT方案的风向模拟效果有较大提升,尤其是对

高位势测站(测站5)的风向改进比较明显,而对于南面较为平坦地区的测站4的风向改善相对较小。

5 结论

本文以2016年第14号超强台风“莫兰蒂”为例,采用中尺度气象模式WRF与微尺度诊断模式CALMET相结合的方法,提出了适用于台风条件下的CALMET运动学效应改进方案KETT,并得出以下结论:

(1)采用改进的运动学效应方案KETT后,由于

考虑了台风本身的垂直运动,台风中心附近模拟风场的系统误差得到了消除。

(2)使用CALMET原有运动学效应方案得到的10 m风速均方根误差比WRF模拟结果减小20%~30%,风向模拟结果与WRF相近。采用CALMET改进运动学方案KETT后,其风速模拟误差在台风登陆前后相比原有方案平均减小10.8%,风向模拟误差平均减小5.4%。改进后的运动学效应方案KETT对台风大风区域的地表风场模拟能力有较显著提升。

(3)运动学效应可以较好地反应局地地形对近地面风场的影响。运动学效应敏感性分析研究表明:采用运动学效应KETT和不采用运动学效应得到的模拟结果相比,在台风强风区影响前、影响时和影响后,石蛇山区域10 m高度风速误差分别减小12.1%、17.9%和15.1%,风向误差分别减小15.5%、20.3%和14.6%,说明改进后的运动学效应方案KETT对登陆台风影响下的复杂地形近地面风场模拟能力有较显著提升。

参考文献:

- [1] LAM H, KOK M H, SHUM K K Y. Benefits from typhoons—the Hong Kong perspective[J]. *Weather*, 2012, 67 (1): 16.
- [2] PIELKE R A, COTTON W R, WALKO R L, *et al.* A comprehensive meteorological modeling system—RAMS [J]. *Meteorology & Atmospheric Physics*, 1992, 49 (1/4): 69.
- [3] BLACK T L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples[J]. *Weather & Forecasting*, 1994, 9 (2): 265.
- [4] GRELL G A, DUDHIA J, STAUFFER D R. A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5)[R]. Boulder: NCAR, 1995.
- [5] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, *et al.* A description of the advanced research WRF version 3 [R]. Boulder: NCAR, 2008.
- [6] AL-YAHYAI S, CHARABI Y, GASTLI A. Review of the use of numerical weather prediction (NWP) models for wind energy assessment [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14 (9): 3192.
- [7] LUDWIG F L, MILLER D K, GALLAHER S G. Evaluating a hybrid prognostic-diagnostic model that improves wind forecast resolution in complex coastal topography[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45 (1): 155.
- [8] YIM S H L, FUNG J C H, LAU A K H, *et al.* Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112: D5106.
- [9] LU Y X, TANG J P, WANG Y, *et al.* Validation of near-surface winds obtained by a hybrid WRF/CALMET modeling system over a coastal island with complex terrain[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 18 (3): 284.
- [10] GONZALEZ J A, HERNANDEZ-GARCES A, RODRIGUEZ A, *et al.* Surface and upper-air WRF-CALMET simulations assessment over a coastal and complex terrain area [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2015, 57 (3/4): 249.
- [11] 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉. MM5/CALMET模式系统在风能资源评估中的应用[J]. *自然资源学报*, 2010, 25 (12): 2101.
ZHOU Rongwei, HE Xiaofeng, ZHU Rong. Application of MM5/CALMET model system in wind energy resource assessment [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25 (12): 2101.
- [12] LIU M K, YOCKE M A. Siting of wind turbine generators in complex terrain[J]. *Journal of Energy*, 1980, 4 (1): 10.
- [13] 辛渝, 陈洪武. XJRUC/CALMET及CALMET不同参数调整对达坂城—小草湖区风场预报影响[J]. *高原气象*, 2014, 33 (6): 1674.
XIN Yu, CHEN Hongwu. Influence of CALMET parameter adjustment in the XJRUC coupling of CALMET over Dabanchen-Xiaocaohu wind area [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33 (6): 1674.
- [14] 陈德花, 张玲, 张伟, 等. “莫兰蒂”台风致灾大风的结构特征及成因[J]. *大气科学学报*, 2018, 41 (5): 692.
CHEN Dehua, ZHANG Ling, ZHANG Wei, *et al.* Structure characteristics and cause analysis of catastrophic wind caused by super typhoon Meranti [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018, 41 (5): 692.
- [15] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1983, 22 (6): 1065.
- [16] SUKORIANSKY S, GALPERIN B, PEROV V. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 117 (2): 231.
- [17] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43 (1): 170.
- [18] IACONO M J, DELAMERE J S, MLAWER E J, *et al.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113: D13.
- [19] SCIRE J S, ROBE F R, FERNAU M E, *et al.* A user's guide for the CALMET meteorological model (version 5) [R]. Concord: Earth Tech Inc, 1998.
- [20] YING M, ZHANG W, YU H, *et al.* An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31 (2): 287.
- [21] 赵玉春, 王叶红, 陈健康, 等. “莫兰蒂”台风(2016)登陆前后精细结构及其引发福建特大暴雨的模拟研究[J]. *暴雨灾害*, 2018, 37 (2): 135.
ZHAO Yuchun, WANG Yehong, CHEN Jiankang, *et al.* Numerical investigation on detailed structure of typhoon “Meranti”(2016) and extreme heavy rainfall event induced by it before and after landfall in Fujian [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37 (2): 135.