

薛文博,沈菲菲,王琛,等.不同边界层方案对台风灿都路径和强度模拟的影响[J].陕西气象,2019(2):13-18.

文章编号:1006-4354(2019)02-0013-06

# 不同边界层方案对台风灿都路径和强度模拟的影响

薛文博,沈菲菲,王琛,许冬梅

(南京信息工程大学,南京 210044)

**摘要:**采用中尺度数值模式 WRF3.8.1,以 2010 年 03 号台风“灿都”为研究个例,采取控制变量的思想设计 YSU、MYJ、QNSE、MYNN2 四组不同边界层方案进行模拟试验,通过比较模拟和实况台风路径、MSLP( Minimum sea level pressure)和 MSW(Maximum surface wind),发现四组试验的模拟结果与实况都有一定的差异,路径偏差相似,强度均偏弱。总体而言,边界层方案为 YSU 的试验 WRF\_YSU 模拟效果最佳。对试验 WRF\_YSU 引入雷达观测资料后的同化试验(WRF\_YSURD)后发现 WRF\_YSURD 试验对台风强度的模拟结果有显著改善。通过进一步的诊断发现,不同边界层方案及是否进行雷达资料的同化会造成五组模拟试验中台风的散度、涡度及风场等的模拟结果不同,从而造成台风范围内的水汽场不同,进而影响最终的台风强度和路径模拟结果。

**关键词:**边界层方案;台风路径和强度;中尺度数值模式;雷达同化资料

**中图分类号:**P458.124;P456.7

**文献标识码:**A

热带气旋是发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋,它是一种强大而深厚的热带天气系统。我国是受台风影响较多的国家之一,根据彭敏瑞<sup>[1]</sup>的研究,仅在 2016 年生成于西北太平洋的

26 个热带气旋中就有 8 个在我国沿海登陆,福建、浙江、海南、广东、广西、上海等 8 省(自治区、直辖市)1 544 万人次受灾,全年直接经济损失高达 614 亿元。故准确预报台风的路径和强度对保

**收稿日期:**2018-05-09

**作者简介:**薛文博(1995—),女,陕西榆林人,本科,主要从事台风精细化风场研究。

**基金项目:**江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201710300052Y);江苏省自然科学基金项目(BK20170940、BK20160954);江苏省气象局北极阁基金项目(BJG201604);南京信息工程大学人才启动基金项目(2016r043、2016r27);国家重点研发计划(2017YFC1502102,2017YFC1502103)

## 参考文献:

- [1] 赵思健.自然灾害风险分析的时空尺度初探[J].灾害学,2012,27(2):1-6,18.
- [2] 金少华,段旭,艾永智,等.“070812”云南元江特大山洪泥石流气象成因分析[J].自然灾害学报,2011,20(6):62-66.
- [3] 张雅斌,杜继稳,蔡蕊,等.陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J].灾害学,2011,26(3):28-34.
- [4] 张弘,侯建忠,乔娟.陕西暴雨若干特征的综合分析[J].灾害学,2011,26(1):70-74.
- [5] 杜继稳,李明娟,张弘,等.青藏高原东北侧突发性暴雨地面能量场特征分析[J].高原气象,2004,23(4):453-457.
- [6] 苑海燕,侯建忠,杜继稳,等.黄土高原突发性局地暴雨的特征分析[J].灾害学,2007,22(2):101-113.
- [7] 雷向杰,程肖侠,毛明策.陕西 2012 年极端天气气候事件与气象灾害[J].灾害学,2013,28(3):105-110.
- [8] 吴勇征.陕西气象灾害[G].西安:陕西省气象科学研究所,1992.

护人们的生命财产安全至关重要。

目前,对台风的分析和预报主要依赖于数值预报。然而,由于当前探测技术及理论知识的发展还不够完善,数值模式中对众多重要的物理过程仍需进行参数化处理。当前针对数值模式中物理过程参数化对于台风模拟的影响,已经有不少专家学者进行了一系列研究工作。陈德辉<sup>[2]</sup>和刘还珠等<sup>[3]</sup>就针对台风模式进行了不同物理过程参数化对台风预报影响的研究,研究结果均表明选取合适的物理过程参数化方案能显著提高台风模式的预报能力。郝士峰等<sup>[4]</sup>采用了5种不同的积云参数化方案,对不同台风进行集合预报,认为热带气旋路径对积云参数化方案的选取是敏感的,且集合预报可以降低模式系统误差影响,得到最优的模拟结果。王丽霞等<sup>[5]</sup>研究表明不同的边界层方案模拟出的兰州冬季边界层高度不同,边界层方案在WRF模式中的地位十分重要,尤其是在对降水和台风的模拟过程中。邓国等<sup>[6]</sup>通过比较不同的边界层方案输出的台风地表特征量以及形势场和风场,说明台风边界层过程对台风的结构有明显的影响。孙敏等<sup>[7]</sup>的研究进一步指出,在WRF模式中选择不用的边界层参数化方案能够造成台风轴对称结构的差异,进而影响台风路径和强度的模拟。温晓培等<sup>[8]</sup>的研究表明在台风的初生阶段,热带扰动的形成和发展与大气边界层的物理过程密切相关,造成边界层中扰动低涡强度的差异,进而影响强盛时期台风整层大气状态。

本文以2010年第3号台风灿都为研究对象,利用中尺度WRF3.8.1模式,采用不同的边界层方案对台风灿都进行数值模拟研究,并就模拟的台风强度和路径进行对比分析,进一步通过诊断分析旨在揭示边界层方案对台风模拟的影响以及造成模拟差异的原因。本文在选取边界层方案模拟台风路径效果较好的基础上进一步进行雷达径向风的同化试验并进一步进行诊断分析和研究。

## 1 个例介绍及试验设置

### 1.1 个例介绍

台风灿都是2010年7月18日于中国南海生成的一个热带低压,在7月19日12时(UTC,下

同)加强发展为热带风暴,随后向西北方向移动。20日22时,台风路径转向西南方向,在21日06时再次转为西北方向并不断发展加强并于21日18时达到台风强度。22日06时,台风灿都在广东省吴川市登陆,为中国广东、广西带来强降水之后,风暴强度在23日减弱成为热带低压。据统计,台风灿都共造成广东、广西、云南3省份622.3万人受灾,因灾直接经济损失高达55.4亿元。

### 1.2 WRF模式及资料介绍

本文采用的WRF中尺度预报模式是集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体的模式系统。由美国国家大气研究中心、国家海洋和大气管理局等美国多家科研机构共同研究开发,被广泛应用于目前的天气预报等业务和大气科学领域的研究中。WRF版本为3.8.1,文中使用的资料为美国国家环境预报中心NCEP全球预报系统GFS提供的再分析资料,时间间隔为6h,水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ;台风观测资料(下文称为台风实况)来源于中国气象局热带气旋最佳路径资料集。

### 1.3 试验设置

采用WRF模式对2010年03号台风灿都进行模拟。模拟时间段为2010年7月21日06时至22日18时,共计36h,模拟中心定为 $19.9^{\circ}\text{N}$ , $110.2^{\circ}\text{E}$ ,水平方向 $401\times 401$ 个水平网格,分辨率为5km,垂直方向将地表到50hPa间垂直划分为41层。物理过程的参数化方案为:Purdue Lin微物理方案;Monin-Obukhov近地面层方案;Noah地表方案;RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射方案;Dudhia短波辐射方案。为了研究不同边界层方案对台风灿都路径和强度模拟的影响,本文采用控制变量的思想,即在其他物理过程参数化方案选定的基础上,选择四种不同的边界层方案:YSU(Yonsei University),MYJ(Mellor-Yamada-Janiic),QNSE(Quasi-NormalScale Elimination),MYNN2(Mellor-YamadaNakanishi-Niino,level 2.5)进行数值模拟试验。通过对四组试验结果的分析,选取模拟结果较好的一组试验WRF\_YSU加入雷达观测资料进行同化试验,即试验WRF\_YSUD。同化

试验首先从7月21日06时至18时做起转(spinner-up)预报,7月21日18时至22日00时进行每小时间隔的雷达资料3DVAR循环同化,同化的观测资料是阳江和海口两部雷达的径向风观测资料。7月22日00时至18时作18h确定性预报<sup>[9-11]</sup>。

## 2 不同边界层方案对台风灿都路径和强度模拟的试验结果

### 2.1 四组不同边界层方案试验模拟结果中的台风路径分析

图1是四组不同边界层方案模拟出的台风灿都路径与最佳观测路径的比较。从图1中可以看出,除了试验WRF\_MYNN2,其他三个方案模拟试验的路径预报基本相似。方案WRF\_MYJ, WRF\_YSU和WRF\_QNSE在模拟起始的12h中,由于初始场的不准确和模式自身起转(spinner-up)问题,预报路径与观测到的最佳路径偏差较大:观测的台风最佳路径向西北方移动,而三个模拟试验的预报结果几乎都是向西移动,试验WRF\_YSU和WRF\_QNSE甚至有向西南方向移动的趋势。而在随后的6h中,三组试验模拟的台风路径均为近乎正北方向,且台风移动速度比实况快很多。在随后的24h预报中,即7月21日18时至22日18时,试验WRF\_MYJ, WRF\_YSU和WRF\_QNSE中的台风预报路径与实况较为一致,均为向西北方向。在试验WRF\_MYNN2中,台风在预报的起始12h时段内向西北方向移动,与以上三组试验不同的是,在随后的12h,即7月21日18时至22日06时,台风预报路径发生了一个较大的转向:先向东北方向,又转向近乎向西方向。然后再向西北方向。

图2为四种不同的边界层方案模拟的路径误差随时间的变化,与上段对图1的分析相符。四个不同边界层方案模拟试验路径误差随时间的变化趋势基本相同。在模拟的前12h,各试验模拟的路径误差随时间增大,试验WRF\_MYJ在12h后的路径误差达到98.25 km。之后各试验的路径误差随时间迅速减小,然后均保持较小的误差值。经过数学分析发现,四组试验中试验WRF\_YSU的路径模拟结果相对最佳(路径误差平均值

为45.10 km,均方差为27.41 km),试验WRF\_MYNN2路径模拟结果最差(路径误差平均值为49.95 km,均方差为14.24 km)。

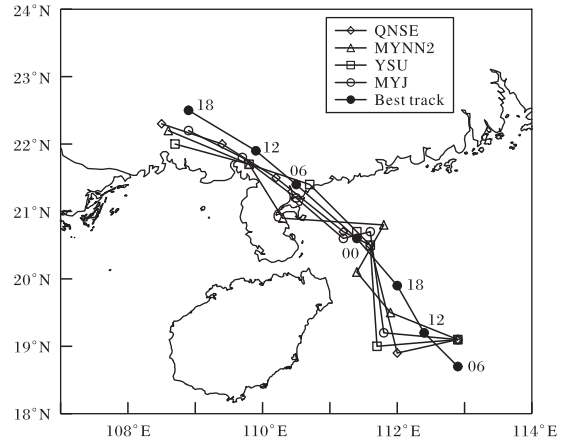


图1 2010-07-21T06—22T18台风灿都试验模拟路径与最佳观测路径比较

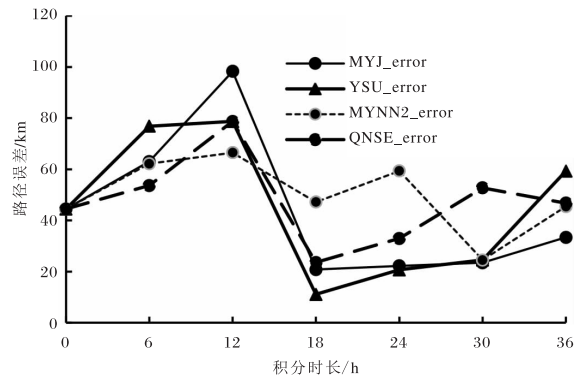


图2 台风灿都各试验模拟的路径误差随时间的变化(初始时间为2010年7月21日06时)

### 2.2 四组不同边界层方案试验模拟结果中的台风强度分析

图3a是各试验模拟的最大近地面风速(Max surface wind, 下简称“MSW”)与最佳路径资料中的MSW,图3b是各试验模拟最小海平面气压(Min sea level pressure, 下简称“MSLP”)随时间的变化。由实际观测资料可以发现,在模拟初期的12h内,即7月21日06时至18时,MSLP随时间减小,MSW随时间增大;随后的12h内,MSLP和MSW都保持稳定;在模拟的后期,7月22日06时至18时,MSLP随时间增大,而MSW随时间减小。可以看出在整个过程中,台风的强度是先增大,然后保持稳定,再减小。四组试验的

台风模拟结果中,MSW 随时间的变化趋势与实况相似(图 3a),但其值均比实况要低。相比而言,各组试验模拟的 MSLP 与实况差距较大(图 3b);模拟试验中的 MSLP 比实况 MSLP 要高,而且都随时间缓慢减小。综合以上分析可以发现四组边界层方案试验模拟的台风灿都强度均较实况偏弱。

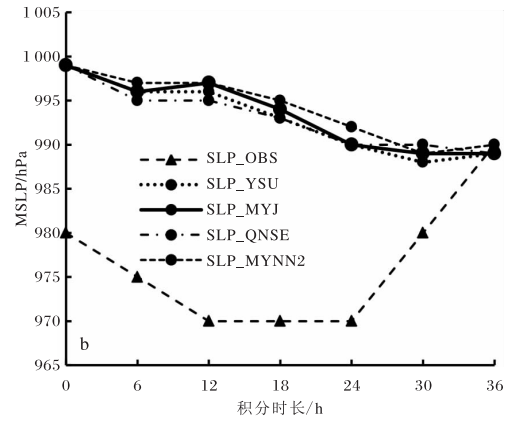
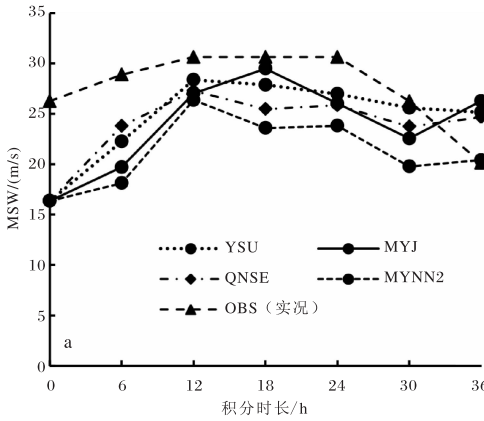


图 3 台风灿都各试验模拟强度(a MSW;b MSLP)与最佳路径资料比较(初始时间为 2010 年 7 月 21 日 06 时)

### 2.3 控制试验与同化试验模拟结果中的台风路径及强度分析

同化雷达观测资料之后的试验在确定性预报初始时间段对台风位置的模拟比同化之前更偏东北,而且移速更快,同化试验中 7 月 22 日 06 时的台风位置与控制试验中 22 日 06 时的台风位置更相近,此后两组试验模拟的台风路径和走向基本一致。

图 4 是控制试验 WRF\_YSU 和同化试验 WRF\_YSURD 中 MSLP 随时间的变化和 MSW

随时间变化图。从图 4a 可以看出,同化试验 WRF\_YSURD 中 MSLP 比对应时刻控制试验 WRF\_YSU 中的值要低。在确定性预报时段的初期,控制试验与同化试验中的 MSLP 差值较大,7 月 22 日 03 时两组试验的 MSLP 差值达到最大值为 24 hPa,随后差值逐渐减小。对于 MSW 而言(图 4b),同化试验在确定性预报的初期明显比控制试验要高,两组试验中的 MSW 在 22 日 03 时的差值达到最大值为 18.5 m/s,随后差值逐渐减小,与 MSLP 的变化趋势一致。

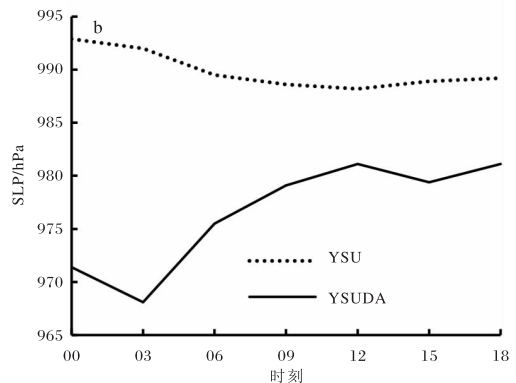
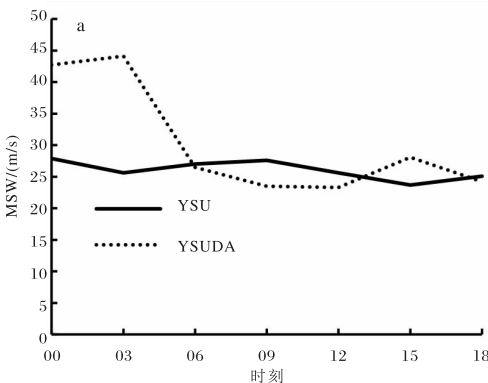


图 4 2010-07-22T00—T18 台风灿都控制试验与同化试验的强度比较(a MSLP;b MSW)

从图4中可以发现,同化试验在确定性预报时段的初期,尤其是前6h内对台风的位置及强度的改善较为明显,随后则与控制试验的模拟结果误差逐渐减小。与2.1节和2.2节中的台风实况资料对比后可以发现,同化试验模拟的台风路径相比控制试验更加接近观测,同时其预报的台风强度相比控制试验也有一定程度的改进。

### 3 不同边界层方案对台风灿都路径和强度模拟影响分析

#### 3.1 散度

在4组敏感性试验里,WRF\_YSU和实际观测路径最接近,而WRF\_MYNN2和实际观测路径误差最大,故选取这两种边界层参数化方案进行比较。22日00时的模拟结果中,试验WRF\_MYNN2和WRF\_YSU在台风中心附近并没有很明显的辐合中心。相比较而言,同化试验WRF\_YSURD则可以明显地看到气流辐合中心,与500 hPa的风场环流有较好的对应关系,同时在对应时刻100 hPa的散度图上也有很明显的辐散中心,能够比较好地体现台风中心低层辐合、高层辐散的垂直结构。在台风中心的偏东南方向的涡旋区,也可以看到强烈的低层辐合、高层辐散的垂直结构(图略),可以据此推断该区域出现了强烈的对流性天气。在台风中心的外围,有带状的辐合带出现,与实况台风外围的螺旋云带相对应。处于发展阶段的台风,云系应偏向于台风前进方向一侧。在7月22日00时,台风外围西北部的云系更为发达。与实际情况相比,试验WRF\_MYNN2,WRF\_YSU的模拟结果中台风低层大气的辐合程度较弱,而同化的试验WRF\_YSURD中低层大气的辐合程度加强,对模拟结果有所改善。由此可见散度场模拟的不同是造成整个模拟过程中台风强度模拟差异的重要原因。

#### 3.2 涡度

试验WRF\_MYNN2和WRF\_YSU的模拟结果中22日00时台风中心附近的正涡度很弱。从试验WRF\_YSURD的模拟结果可以看出台风中心附近有较强的正涡度区,涡旋区外围出现了负涡度区域。综合以上分析,试验WRF\_MYNN2和WRF\_YSU对台风850 hPa的涡度场模

拟比实际情况要弱,与3.1中散度场分析类似,同化试验WRF\_YSURD可以使得台风的涡旋强度得到显著改善。对涡度场模拟结果的不同是造成整个模拟过程中台风强度模拟差异的另一个影响因素。

台风实况显示22日00时台风灿都位于副热带高压脊线的西南部,试验WRF\_YSU中的588 dagpm等高线比试验WRF\_MYNN2中偏东北方向,试验WRF\_YSURD中的等高线则更向东北方向收缩。该台风在此时主要受副热带高压西南部的东南气流影响,故台风之后的路径应该是向西北方向继续移动,对副高脊线模拟位置的不同,也会造成不同试验模拟的台风移动过程中路径的差别。

#### 3.3 水汽通量

试验WRF\_MYNN2,WRF\_YSU和试验WRF\_YSURD模拟的水汽通量整体分布相似:台风中心的水汽供应较小,外围区域水汽通量较大,台风中心区域西侧的水汽通量明显低于东侧的。但这三组试验模拟的水汽通量在台风中心区域附近还是有比较大的差异。与试验WRF\_MYNN2和WRF\_YSU相比,试验WRF\_YSURD中的水汽输送最强。台风涡旋区域的水汽通量迅速增大,在台风眼的东南部,有一极大水汽通量区。从3.1节和3.2节中可以看出,模拟试验对台风散度和涡度的模拟都偏弱,从而会直接降低水汽通量强度,而水汽辐合上升释放的潜热是台风的主要能源,所以水汽通量的强弱很大程度上影响了台风的强度。因此,对水汽通量模拟结果过弱会导致对台风强度的模拟较弱。

#### 3.4 台风暖心结构及三维风场结构

台风中心下沉气流所造成的逆温层会使得台风的暖心结构表现为等位温线向下凹。在试验WRF\_MYNN2和WRF\_YSU的模拟结果中,等扰动位温线在对流层中上层的台风眼区附近向下凹,但是并不是很明显,这与台风灿都自身强度较弱,模拟试验又进一步弱化了台风强度有关。相比较而言,试验WRF\_YSURD模拟的等扰动位温线在台风眼区的下凹更加明显,即加入雷达资料同化的试验WRF\_YSURD能够更好地模拟出

台风的暖心结构。可以看到三组试验对台风灿都三维风场结构的模拟还是比较理想的:三组试验中都体现了台风眼区的风速最小,眼区两侧的风速迅速增大的趋势,就总体的模拟效果而言还是试验 WRF\_YSURD 更好,台风的顶部相对较高,风场具有明显的不对称结构。

由于模拟的台风中心位置的不同,导致涡旋环流的位置也有一定的差异:试验 WRF\_YSU 的涡旋位置最偏南,试验 WRF\_YSURD 的涡旋位置纬度最高,最接近观测到的台风中心位置。就环流结构来讲,很明显试验 WRF\_YSURD 中的风场结构更完整。最大的风速增量区出现在台风内核的东南部,达到了 33 m/s。可见雷达风场资料的加入显著地增强了风速,尤其是台风内核东南侧的最大风速达到 36 m/s。

#### 4 结论及讨论

本文以 2010 年 03 号台风灿都为研究对象,利用中尺度 WRF3.8.1 模式,分析四种不同边界层方案和加入雷达资料同化之后的模拟结果,得出以下结论。

(1) 比较不同边界层方案:MYJ、YSU、QNSE、MYNN2 下台风灿都路径模拟结果,边界层方案为 YSU 的试验 WRF\_YSU 模拟结果最好,其次为 MYJ 方案和 QNSE 方案,相对较差的是 MYNN2 方案。

(2) 边界层方案 MYJ、YSU、QNSE、MYNN2 下,台风灿都模拟试验中, QNSE 方案 MMSLP 随时间的变化结果最好,其次为 YSU 方案和 MYJ 方案的模拟结果,相对较差的同样是 MYNN2 方案。四组试验中 MSW 随时间的变化结果与路径模拟结果相同,试验 QNSE 方案模拟结果最好,MYNN2 方案最差。

(3) 四组不同边界层方案数值预报试验中对台风灿都路径和强度模拟结果,YSU 方案最佳,MYNN2 的模拟结果相对较差,并且与台风路径模拟结果相比,所选择的不同边界层方案对台风灿都强度的模拟结果差异更明显。

(4) 同化雷达资料后,与台风路径模拟结果相比,对台风强度模拟结果的改善更加显著,在台风风场的分析中有明显体现。

由于所选择的台风个例强度较弱,而且模拟试验又会弱化台风强度,导致台风的一些内部结构特征表现并不是很明显。因此今后可以选择更多的台风个例进行进一步的研究,得出更具有广泛性的结论。

#### 参考文献:

- [1] 彭敏瑞. 2016 年我国台风防御及减灾成效[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(1): 37-40.
- [2] 陈德辉, 王诗文. 改进的物理过程参数化对台风路径数值预报的影响[J]. 应用气象学报, 1996(1): 1-8.
- [3] 刘还珠, 陈德辉, 滕俏彬. 不同物理过程参数化对模式台风的影响及其动力结构的研究[J]. 应用气象学报, 1998(2): 141-150.
- [4] 郝世峰, 崔晓鹏, 潘劲松. 多积云参数化方案热带气旋路径集合预报试验[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 569-574.
- [5] 王丽霞, 王颖, 赖锡柳, 等. WRF 模式不同边界层参数化方案模拟兰州冬季边界层高度的研究[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 162-172.
- [6] 邓国, 周玉淑, 李建通. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验—I. 对台风结构的影响[J]. 大气科学, 2005, 29(3): 417-428.
- [7] 孙敏. 参数化及资料同化对台风 Morakot 数值模拟的影响[D]. 南京大学, 2012.
- [8] 温晓培, 隆霄, 张述文, 等. 边界层参数化方案对台风 SANBA 初生阶段影响的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(3): 346-357.
- [9] 李昕, 王元, 明杰, 等. 雷达径向风和反演风联合同化在台风灿都(2010)数值预报中的研究[J]. 气象, 2016, 42(6): 649-663.
- [10] LI X, MING J, XUE M, et al. Implementation of a dynamic equation constraint based on the steady state momentum equations within the WRF hybrid ensemble-3 DVar data assimilation system and test with radar T-TREC wind assimilation for tropical Cyclone Chanthu(2010)[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 120(9): 4017-4039.
- [11] 沈菲菲, 闵锦忠, 陈鹏, 等. 多普勒雷达资料同化在台风“桑美”预报中的应用研究[J]. 海洋学报, 2015(3): 25-36.