

何晓彤,徐国强,2018. 1513 号台风苏迪罗云系演变特征及模拟分析[J]. 气象,44(8):998-1008.

1513 号台风苏迪罗云系演变特征及模拟分析*

何晓彤^{1,2} 徐国强²

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 中国气象局数值预报中心,北京 100081

提 要: 用 GRAPES_Meso 模式对 2015 年 13 号台风苏迪罗进行了数值模拟,从台风生成发展、成熟和登陆减弱三个阶段对模拟结果与实况资料进行了台风云系时空演变特征的对比分析,结果表明:(1)模式较好地再现了台风苏迪罗从生成发展、成熟,再到登陆减弱至消亡的整个过程,模拟的台风路径与实况吻合较好,台风强度的变化趋势也得到了较好的模拟再现。(2)“苏迪罗”在发展阶段台风眼模糊,模式对台风云系云量总体分布模拟较好,但模拟的云顶高度比实况偏低。(3)在成熟阶段,“苏迪罗”有一明显的漏斗状台风眼,云系发展更加旺盛,台风西部呈双眼壁结构,云顶高度比实况高度偏低。(4)“苏迪罗”登陆后强度迅速减弱,台风眼不再明显,模式对登陆后的“苏迪罗”云系结构模拟效果总体欠佳。(5)总的看来,模式较好地模拟出了“苏迪罗”云系整体范围,在洋面上的模拟效果好于登陆后,改进 GRAPES 模式的云量方案可能会提高该模式模拟台风云系的能力。

关键词: 台风,数值模拟,云系,时空演变

中图分类号: P435

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.08.002

Characteristics and Simulation Analysis of Cloud Evolution of Typhoon Soudelor (2015)

HE Xiaotong^{1,2} XU Guoqiang²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 CMA Numerical Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: No. 1513 Typhoon Soudelor is simulated by using the GRAPES_Meso model, and the spatio-temporal evolution of the cloud system during the three stages of typhoon generation, maturity and landfall is analyzed. The results show that: (1) The process of Typhoon Soudelor from generation, maturity to landfall, weakening and dissipation is reproduced well with both the track and the trend of typhoon intensity in the simulation, which are close to observation. (2) In the development stage, the typhoon eye is blurred. The overall distribution of typhoon cloud system is well simulated, but the height of cloud top is lower than observation. (3) In the mature stage, there is a clear funnel-shaped eye in the center of “Soudelor” cloud system. Cloud develops more strongly and presents structure of concentric eyewalls in the west of typhoon. The height of the simulated cloud top is lower than the observation. (4) The intensity of “Soudelor” is weakened rapidly after landfall. The eye is no longer obvious. The ability of the model to represent the detailed structure of Typhoon “Soudelor” after landfall is poor. (5) In general, the whole range of the cloud system of “Soudelor” is well simulated by GRAPES_Meso model. The simulated results in the first two stages are better than that in the post-landing stage. In a word, improving the cloud

* 国家自然科学基金项目(41590874)和国家重点研发计划(2016YFC0203300)共同资助

2017 年 1 月 12 日收稿; 2018 年 5 月 17 日收修定稿

第一作者:何晓彤,主要从事数值模式物理过程的研究. Email:hext14@sina.com

通信作者:徐国强,主要从事数值模式的物理过程研究. Email:xugq@cma.gov.cn

amount scheme in GRAPES model might help simulate typhoon cloud system.

Key words: typhoon, numerical simulation, cloud system, spatio-temporal evolution

引言

台风是在热带洋面上生成的天气系统,2000—2013年以来,平均每年有7.6个台风在我国沿海登陆(端义宏,2015),登陆台风成为我国沿海地区尤其是东南沿海地区最严重的灾害性天气系统,给人民生命财产和国家经济建设造成了重大损失。因此,对台风尤其是登陆台风的路径、强度及其造成的强风雨的准确预报十分重要。

台风云系三维空间结构、其内部云微物理结构等与台风降水分布和降水强度有着密切关系(Marks,2014)。登陆台风的云系结构有着自身的特殊性和复杂性。台风具有非对称螺旋状云系,从微观(云微物理结构)到宏观(云覆盖范围和上下层出入流)而言,云的辐射强迫会影响台风云系结构,模式中云-辐射方案对外围风场的强度和尺度大小有着重要的调节作用,而外围风场又潜在地影响着台风路径和风暴潮的大小(Bu et al,2014)。台风结构变化导致其风雨分布的演变机理不清楚,台风风雨分布取决于台风内部精细结构的演变,提高台风风雨分布预报及其影响评估能力必须掌握台风精细化结构演变规律(端义宏,2015)。不同阶段、登陆前后台风云系结构和云内部微物理结构的变化,反映出台风内部热力和动力学性质的差异,影响着降水强度及其分布的时空变化。

当前,气象卫星已经成为气象观测的主要手段之一,卫星云图(红外云图和水汽图等)可以很好地帮助对台风的探测和预报,前人已经利用卫星资料对台风做了很多研究。Dvorak(1975)很早就提出了使用NOAA卫星云图分析和预报台风强度的方法——利用云特征去估计(预报)台风强度和未来强度变化。江吉喜和叶惠明(1987)通过10个登陆我国的台风总共157个时次的GMS云图及6h雨量图进行统计分析,分别给出了台风登陆过程中最大降水量及其出现地区与时段的估计方法和台风登陆前后6h降水量的预报方法。陶祖钰和王洪庆(1995)利用GMS卫星云图资料和物理量诊断场资料,分析了9216号台风的云系结构及其在登陆后发生的变化。Alvey et al(2015)用1998—2012年的

微波卫星数据(tropical cyclone passive microwave, TC-PMW)考察了大西洋和太平洋上台风的降水特性,Tourville et al(2015)总结了Cloudsat卫星和“下午系列卫星(A-Train)”自发射以来对台风的观测信息和人们利用卫星资料所做的科研成果。气象卫星对台风的观测有着明显的特点:TRMM卫星上搭载的测雨雷达(PR)可以获得降水云内部较大的降水粒子的三维信息(Kummerow et al,1998),但对较小的云粒子观测能力不足,而这些粒子在天气和气候变化过程中常常扮演着重要的角色。

近年来,发展高分辨率数值模式已成为国际上提高热带气旋预报能力,尤其是内部精细化结构预报能力的主要手段和发展趋势。利用高分辨率数值模式不仅可以模拟登陆台风造成的强风雨(周冠博等,2015;黄奕武等,2016),还可以利用其中的云方案模拟出三维云量,并结合卫星云图分析云系的时空演变。朱佩君等(2002)利用非静力平衡中尺度模式MM5输出的大气中云水、冰水和雪水成功地模拟出1997年登陆我国台风温妮(Winnie)的云系结构,模拟云图可以给出大气中云的三维空间分布,在台风生命史的不同阶段及不同的台风其相应的云系结构有所不同,从而弥补了卫星只能观测云顶表面的不足。张庆红(2006)成功模拟了台风温妮的特大台风眼及双眼壁结构并分析了内、外眼壁风场和湿度场等。郑晓辉等(2013)将WRF和ECMWF(以下简称EC)模式中的云计算方案引入到GRAPES模式中并做了影响试验,表明EC云计算方案较其他方案更为准确,三维云量对短波辐射和地面温度有直接影响,采用EC云计算方案时模式模拟的短波辐射日总量和地面温度也更接近观测值。

通过以上学者对台风及数值模式云方案等方面的研究可以得知,利用数值模式对台风的模拟技术已经非常普遍,以往的研究更多集中在台风降水、路径和强度等方面,但对台风从生成、发展、成熟再到登陆消亡整个过程中云系及其演变,即台风云系时空演变特征的研究相对较少,模式模拟台风云系云量和观测云量的差别尚不清楚。台风云系发展演变过程中,云顶亮温(TBB)可以较好地定量指示对流云的发展高度(云顶),以往的研究中模式模拟的

TBB 与卫星 TBB 对比分析较少, 本文将利用 GRAPES 模式以 1513 号台风苏迪罗为例, 从生成到登陆进行数值模拟, 并利用观测资料对模拟结果进行验证, 在保证模拟与实况较为一致的情况下, 将模式输出的 TBB 与卫星 TBB 做对比分析, 并结合高云、中云和低云量的对比分析结果, 以期发现 GRAPES 模式云量方案对台风云系模拟的不足, 并为进一步改进方案打下基础。

1 个例简介

2015 年 13 号台风苏迪罗 (Soudelor) 于 7 月 30 日 12 时 (UTC, 下同) 在关岛以东 (13.6°N、159.2°E) 的洋面上生成, 之后强度逐渐加强, 8 月 2 日进入快速增强期, 3 日加强为超强台风级, 之后达到其巅峰强度 17 级以上 ($65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 5 日在经过菲律宾海域时减弱为强台风, 7 日又一次加强为超强台风, 8 月 8 日 05 时左右以中心附近最大风力 15 级 ($48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 在台湾岛花莲市登陆, 并于同日 14 时以中心附近最大风力 13 级 ($38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 在福建省莆田市第二次登陆, 进入内陆后逐渐减弱, 10 日 09 时停止编号。“苏迪罗”生成初期, 发展迅猛, 移动路径相对稳定, 第一次以强台风级登陆台湾岛时 7 级风圈半径达 460 km, 二次登陆福建沿海时风力有所减弱 (台风级), 但 7 级风圈半径仍达 350 km, 其风圈范围之大, 风力之强在两次登陆的台风中极为罕见, 是继 2013 年超强台风海燕以后的西北太平洋最强台风。“苏迪罗”在中国台湾省登陆带来的暴雨和狂风造成大范围电力供应中断, 大陆东部沿海地区则因百年一遇的降雨导致洪水和山体滑坡, 直接经济损失数百亿元。由于给中国东部造成严重灾害和经济损失, 在 2016 年的第 48 届台风委员会会议上台风苏迪罗被除名。

2 数值模拟及检验

2.1 模式、方法及资料介绍

2.1.1 模式

本文利用全球与区域同化预报系统 (Global/Regional Assimilation and Prediction System, GRAPES) 模式模拟台风苏迪罗从生成到登陆的过程。GRAPES 是我国自主研发的一个多尺度通用

模式, 兼顾全球与有限区域可选的预报区域设计, 静力与非静力可选的平衡设计, 采用半隐式-半拉格朗日时间差分方案, 经纬度格点的网格设计, 水平方向取 Aracawa C 格点, 垂直方向采用 Charney-Philips 格式跳层变量配置, 地形追随坐标; 模式物理参数化过程主要有积云、微物理、陆面和辐射过程等 (薛纪善和陈德辉, 2008; 陈德辉等, 2008; 徐国强等, 2008)。本文选取 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料 (间隔 6 h) 经过初始化生成模式初始场, 模式积分时间从 2015 年 8 月 1 日 00 时开始至 9 日 00 时结束, 每 24 h 冷启动一次, 更新一次初边界条件, 即每次只积分 24 h, 共积分 168 h。模拟采用的水平分辨率为 0.09° , 垂直方向上为不等距 49 层, 时间步长 60 s。为了更好地模拟出“苏迪罗”的云系结构, 本文使用了热带气旋的 Bogus 初始化方案。模拟所选物理方案: WSM 6 微物理方案, RRTM 长波和 Dudhia 短波辐射方案, Kain-Fritsch (new Eta) 积云对流参数化方案等。

2.1.2 云量计算方案

本文模拟台风时所用 GRAPES 模式中云量计算方案属于云量诊断方案, 主要是依赖于相对湿度与云量之间的关系。即先通过模式云微物理方案显式计算云水和云冰, 求得云内相对湿度, 再利用经验公式代入相对湿度计算得到云量。

具体过程首先计算出水面和冰面的饱和混合比, 再根据温度确定云水和云冰的比例系数 faf , 运用经验公式, 代入比例系数计算云水云冰的饱和比湿和 rqs :

$$\begin{cases} faf = 0.0 & t > a \\ faf = \frac{273.15 - t}{40} & b < t < a \\ faf = 1.0 & t \leq b \end{cases} \quad (1)$$

$$rqs = (1 - faf) \times Q_{\text{vsw}} + faf \times Q_{\text{vsi}} \quad (2)$$

式中, $a = 273.15 \text{ K}$, $b = 233.15 \text{ K}$, Q_{vsi} 为冰面饱和混合比, Q_{vsw} 为水面饱和混合比。

最后通过相对湿度及其相关云微物理量计算云量:

$$rh = \min \left[1.0, \frac{Q_v}{rqs} \right] \quad (3)$$

$$cc = \min \left\{ 1.0, \exp[0.25 \ln(rh)] \times \left[1.0 - \exp \left(-\frac{100(Q_c + Q_i)}{Q_{\text{vsw}}} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

$$C_c = \min[1.0, cc(1 + 2Q_{\text{vsi}})] \quad (5)$$

式中, Q_v 为水汽混合比, Q_i 为云冰混合比, Q_c 为云水混合比, rh 为相对湿度, C_c 为计算得到的网格云量。

2.1.3 资料

美国 NCEP/NCAR 每日 4 次的再分析资料,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,用于作为模式的初始场和侧边界场。(准)观测资料包括:(1)FY-2 卫星总云量(cloud of total amount, CTA)、黑体亮温(black body temperature, TBB)和云分类(clasifiction of level cloud, CLC)产品;(2)ERA Interim fraction of cloud cover 资料即 EC 再分析云量资料(可通过 EC 官网下载),由于各高度层观测云量资料稀缺,本文以 EC 再分析云量作为准观测云量进行分析;(3)利用中国气象局热带气旋资料中心获取“苏迪罗”路径与强度数据。

2.2 模拟结果检验

图 1 是模拟(红线)与观测(蓝线)的台风苏迪罗路径(世界时,下同)。从图中可以看出,台风苏迪罗从生成开始时向西北方向移动,路径比较稳定,并于 8 月 8 日 04 时 40 分在台湾岛花莲市登陆,模式对第一次登陆地点的模拟较为准确,登陆后路径偏向西南移动到台湾海峡后又偏向西北移动,模式对“苏迪罗”该段路径的模拟能力稍显不足,随后“苏迪罗”继续向西北移动跨过台湾海峡,并于当日 22 时 10 分左右在福建省莆田市再次登陆,登陆后继续向西北移动,模拟的移动速度较实况速度快。图 2 是模拟与实况的

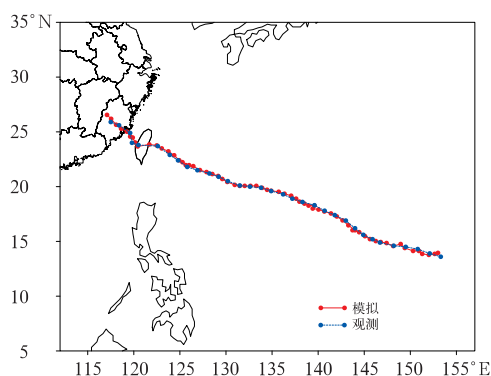


图 1 2015 年 8 月 1 日 00 时至 9 日 00 时
基于 6 h 间隔台风苏迪罗模拟路径
(红线)与实况路径(蓝线)

Fig. 1 Simulated path (red line) and
observed path (blue line) of Typhoon
Soudelor from 0000 UTC 1 to
0000 UTC 9 August 2015

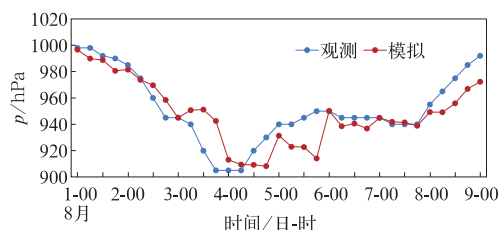


图 2 2015 年 8 月 1 日 00 时至 9 日 00 时
基于 6 h 间隔台风苏迪罗模拟强度(红线)
与实况强度(蓝线)

Fig. 2 Simulated intensity (red line) and
observed intensity (blue line) of Typhoon
Soudelor from 0000 UTC 1 to
0000 UTC 9 August 2015

强度对比,由图可知,模式对台风苏迪罗强度变化趋势模拟与实况较为符合,但模拟强度变化总是稍显“滞后”。经过分析图 1 和图 2 可以发现,GRAPES 模式对台风苏迪罗路径的模拟较为成功,对两次登陆地点的模拟亦较为准确,模式对台风苏迪罗路径模拟较强度模拟准确,但强度模拟误差属于可接受范围。总的来说,GRAPES 模式对台风苏迪罗从生成到发展、演变以及登陆过程的模拟还是比较成功的,故本文将用模式输出的高时空分辨率资料和观测资料对台风苏迪罗云系时空演变特征进行深入分析。

3 台风云系分析

3.1 发展阶段

本文将台风苏迪罗整个生命史分为三个阶段,即发展、成熟和登陆减弱阶段,限于篇幅,只挑出三个时次(8 月 1 日 06 时、4 日 06 时和 8 日 18 时)分别代表各阶段进行云系时空演变分析,重点对比分析模拟云量与实况云量,模拟 TBB 与卫星 TBB 以及垂直速度剖面等。

GRAPES 模式模拟云量和 EC 再分析云量皆为每一模式层的云量,本文将不同高度的模式层云量进行垂直叠加得到总云量、高云(5000 m 以上)、中云(2500~5000 m)和低云(2500 m 以下),叠加方法采用最大值平均,先求每一个云块即两层晴空空间的有云区域的垂直平均云量,再比较垂直方向上不同云块平均云量,取其最大值作为总云量。与整层求平均相比,该方法更加科学,避免了将某些地区总云量叠加减少的可能(该区只有深厚的低云,没有

中、高云),与整层求最大值相比,避免了将某些地区总云量叠加增大的可能(某单层出现了一个大云量值)。

图 3 所示为 8 月 1 日 06 时模拟的总云量、FY-2 卫星总云量、云分类以及 EC 再分析总云量对比,由图可知,在云量整体分布上,模式较好地再现了台风云系尤其是靠近台风中心区域的云系云量,但模式在两个区域模拟出了“虚假云”:日本南部太平洋面上空和台风云系北部与日本东南部太平洋上空对流云团之间(图 3a)。在发展阶段,台风云系几何中心区主要为密卷云和积雨云,两大块积雨云呈南北对峙形式镶嵌在密卷云中,外围零星散布着层积云和高积云(图 3d)。通过仔细对比,发现 EC 再分析总云量较 GRAPES 模拟总云量更接近实况。图 4 是按不同高度叠加所得的高云、中云和低云,对比图 4a 和 4d 可知,上文模式模拟的日本南部太平洋面

上空总云量“虚假云”是高云空报,即正因为在该区域模式模拟的高云量偏大才导致了“无中生有”,而另一区域(台风云系北部与日本东南部太平洋上空对流云团之间)总云量空报则是因在该区域模式模拟的低云量偏大所导致(图 4c,4f),两者有所不同的是,高云空报误差较小,但低云空报误差较大。总的来看,模式对台风云系云量的模拟较为准确,尤其是模拟的中云量与实况更为吻合(图 4b,4e),单从台风云系云量图可以看出,在发展阶段,台风已有模糊的台风眼,中层有较为明显的非对称强对流云团(图 4b)。

TBB 可以反映强天气系统的发生、发展和消亡,尤其能定量指示对流云的发展高度,以上对台风苏迪罗云系云量进行了分析,要了解其发展的高度及旺盛强度,还需分析 TBB 和垂直速度场。本文利用 GRAPES 模式 TBB 后处理模块计算得到模拟的

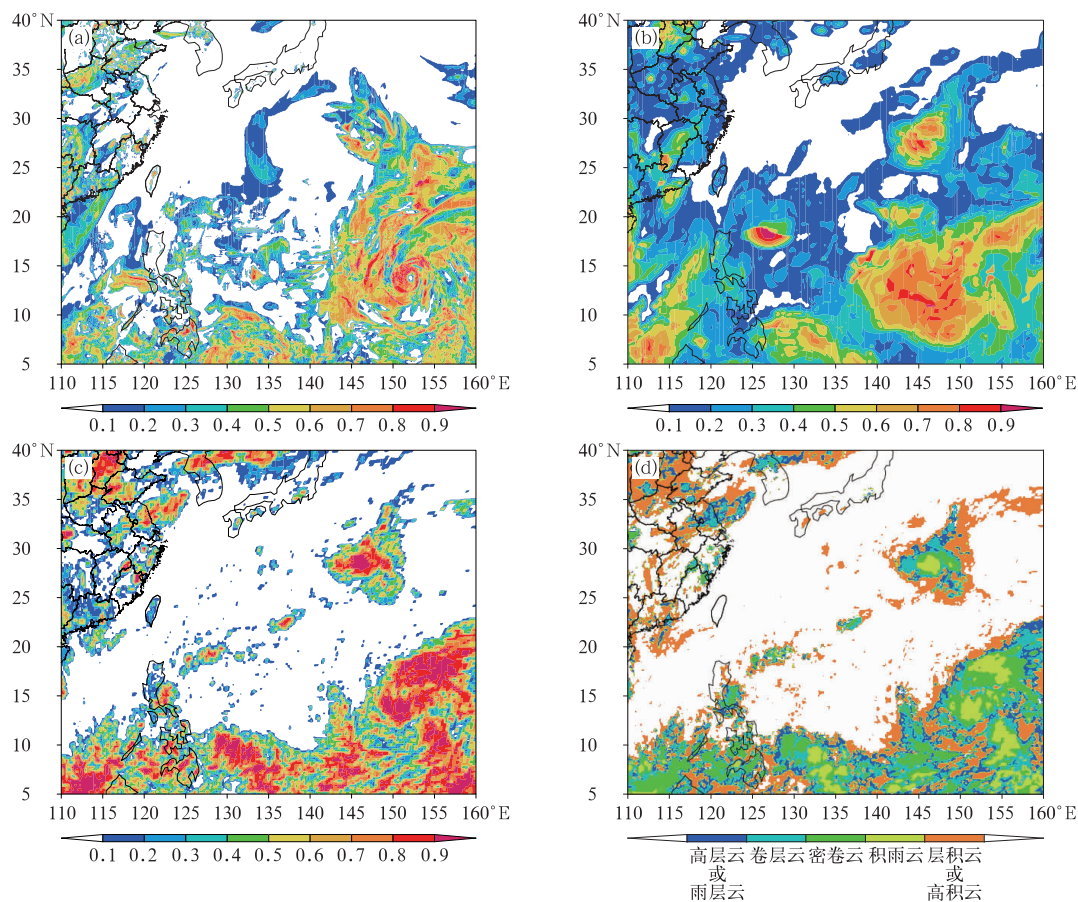


图 3 2015 年 8 月 1 日 06 时模拟总云量与实况云

(a)模拟总云量,(b)EC 再分析总云量,(c)FY-2 总云量,(d)FY-2 云分类

Fig. 3 Simulated total cloud cover (TCC) and observed cloud at 0600 UTC 1 August 2015

(a) model simulation TCC, (b) EC reanalysis TCC, (c) FY-2 satellite TCC, (d) FY-2 satellite CLC

TBB,再结合垂直速度剖面与 FY-2 卫星 TBB 产品进行对比分析。图 5 是 8 月 1 日 06 时的垂直速度经向剖面(沿 152°E)和模拟 TBB 与卫星 TBB,对比图 5a 和 5b 可知,模拟的 TBB 大致范围与实况吻合较好,但强度偏弱(温度偏高),即模拟的云顶高度比实况偏低。分析图 5c 可知,台风中心区(13.5°N 、 152°E)近 100 km 范围内中、低层几乎无垂直上升运动,中心向眼壁(或密闭云区)过渡区中层已有弱

上升运动,说明该区域对流云活动较为旺盛;再向外到眼壁区,可以看出眼壁区垂直上升运动更加剧烈,即发展最为旺盛。

综合分析可以看出,在台风发展阶段,台风中心区近 100 km 范围内中、低层几乎无垂直上升运动,云量较少,TBB 值较高,有非常弱的台风眼;中心向眼壁过渡区中层已有弱上升运动,亮温偏低,说明该区域对流云活动较为旺盛;再向外到眼壁区 TBB 值

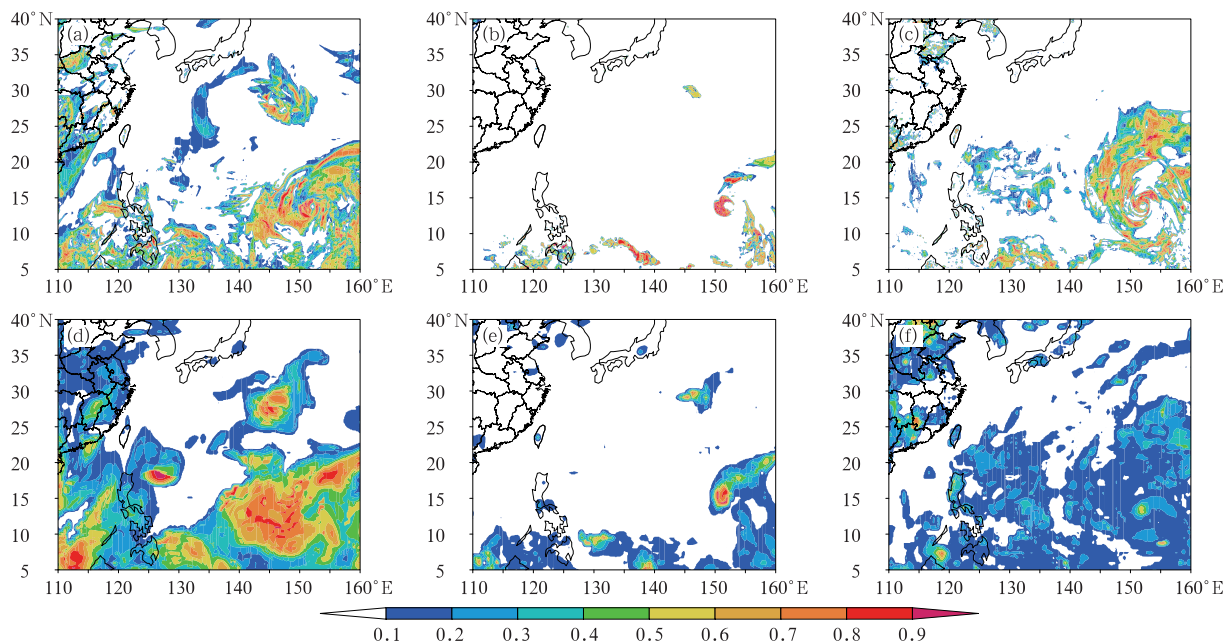


图 4 2015 年 8 月 1 日 06 时模拟云量(a,b,c)与 EC 再分析云量(d,e,f)
(a,d)高云量,(b,e)中云量,(c,f)低云量

Fig. 4 Simulated cloud cover (a,b,c) and EC reanalysis cloud cover (d,e,f)
at 0600 UTC 1 August 2015

(a, d)high cloud cover, (b, e)middle cloud cover, (c, f)low cloud cover,

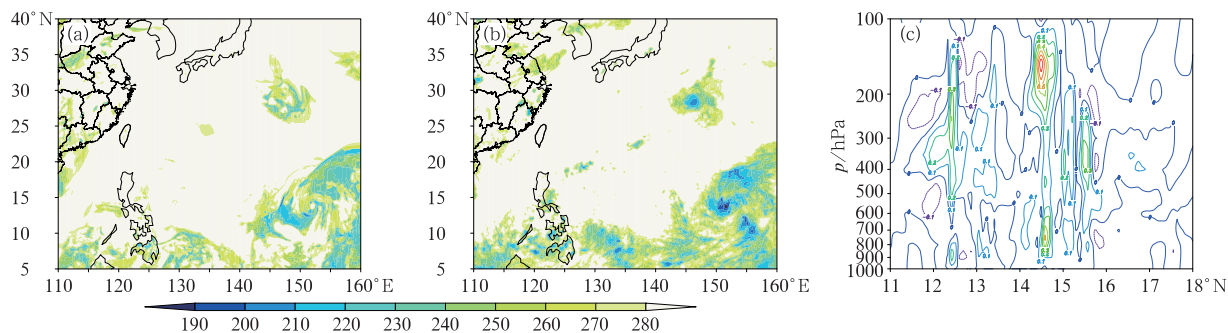


图 5 2015 年 8 月 1 日 06 时模拟 TBB(a,单位:K)、卫星 TBB(b,单位:K)和
沿 152°E 经向垂直速度剖面(c,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Simulated TBB (a, unit: K) and FY-2 satellite TBB (b, unit: K) and profile of
vertical velocity along 152°E (c, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0600 UTC 1 August 2015

再度降低尤其是在台风西部、南部和东北部,TBB 值在 $190\sim 220\text{ K}$,说明这些区域内对流云发展高度较高,即对流发展最为旺盛,结合图 3d 可知这些区域主要为密实的积雨云,垂直上升速度达 $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。模式模拟的台风云系云量总体分布与实况吻合较好,但在部分区域高层和低层云量均出现不同程度的空报现象,模拟的 TBB 强度偏弱,即模拟的云顶高度比实况偏低。

3.2 成熟阶段

台风苏迪罗于 8 月 3 日 02 时发展加强成为强台风,中心气压值降低到 955 hPa ,风力达 14 级 ($42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),可以说此时台风已经发展成熟了,本文之所以选择 4 日 06 时为成熟阶段代表时刻,是因为在此时刻前后约 20 h 内“苏迪罗”强度一直处在其巅峰状态,即中心气压为 910 hPa ,风力达 18 级 ($65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

图 6 所示为 8 月 4 日 06 时模拟的总云量、FY-2 卫星总云量、云分类以及 EC 再分析总云量对比,从图中可以看出,GRAPES 模式对成熟的“苏迪罗”云系有着较好的模拟效果,台风云系大致范围及螺旋

云带都与实况较为吻合,但有两点不足:一是模拟的密闭云区(图 6a)较卫星实况(图 6c)偏小,二是模拟的台风南部大片区域即大致 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 区域内云量较实况偏少。在成熟阶段,台风云系有着明显的台风眼,该区域内只有少量层积云,眼外是由积雨云环绕而成的密实云墙即眼壁,再向外便是由密卷云和卷层云形成的台风螺旋云带(图 6d);EC 再分析总云量对“苏迪罗”云系的刻画效果欠佳,但北部延伸到东北部的螺旋云带与卫星实况较为吻合(图 6b)。图 7 是同图 4 一样叠加的 8 月 4 日 06 时高、中、低云量,对比模拟云量(图 7a,7b,7c)与 EC 再分析云量(图 7d,7e,7f)可知,模式对不同高度层次的云量模拟能力较强,即大致模拟出了台风的高、中、低云量。单从台风云系云量图可以看出,不同于发展阶段,成熟阶段的台风已有明显台风眼结构,而且高层台风眼(图 7a)比低层(图 7c)更加明显,印证了上文提到的成熟阶段台风眼只有低层有少量层积云,而中、高层基本是无云区,眼壁在中层近乎对称包围着台风眼(图 7b),从图中还可以看出,图 6b 中 EC 再分析总云量较实况偏多,主要是因为 EC 再分析的高云量偏多才导致总云量偏多(图 7d)。

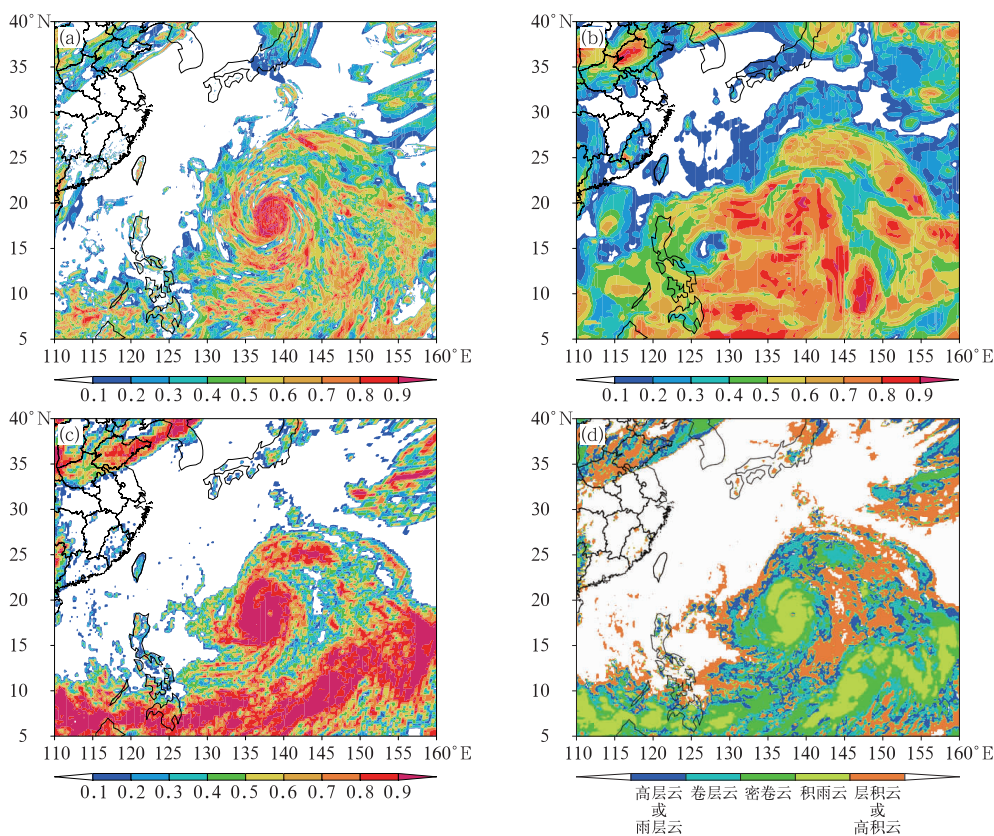


图 6 同图 3, 但为 2015 年 8 月 4 日 06 时
Fig. 6 Same as Fig. 3, but at 0600 UTC 4 August 2015

图8是8月4日06时垂直速度经向剖面(沿 138.5°E)和模拟TBB与卫星TBB,对比分析图8a和8b可知,模拟TBB大致范围与实况吻合较好,台风北部偏东的TBB较低值区对应着图7d和7e中螺旋云带,结合图6d可知,台风外围东南部大片的低值区为积雨云和卷层云,当然同时可以发现,模拟TBB整体强度较实况偏弱,即模拟的云顶高度比实况高度偏低,尤其是台风中心东侧眼壁区,偏低更明显一些,且模拟的台风眼水平尺度较实况偏大。通过垂直速度剖面图(图8c)可知,在低层,台风中心(18.5°N 、 138.5°E)向外半径约为60 km,而在中高层,眼区空间范围明显增大(约为110 km),可见成熟的台风眼部呈漏斗状结构。从图8c中还可以看

出,在眼壁区高层(250 hPa)存在两个垂直速度高值区,说明这两个区域积雨云发展更高、更旺盛,而在南部垂直速度峰值更是达到 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,远大于发展阶段峰值($0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。结合图7b、7c及图8a,台风苏迪罗西部眼壁区呈双眼壁结构,中高层表现更加明显,而垂直速度纬向剖面(图略)也证明了这一点。

综上可知,“苏迪罗”发展到成熟阶段有一明显的低层窄高层宽的漏斗状台风眼,垂直上升运动比发展阶段高了一个量级,云系发展高度达250 hPa左右,“苏迪罗”西部眼壁区呈双眼壁结构。模式模拟的“苏迪罗”密闭云区范围较卫星实况偏小,云顶高度比实况高度偏低。

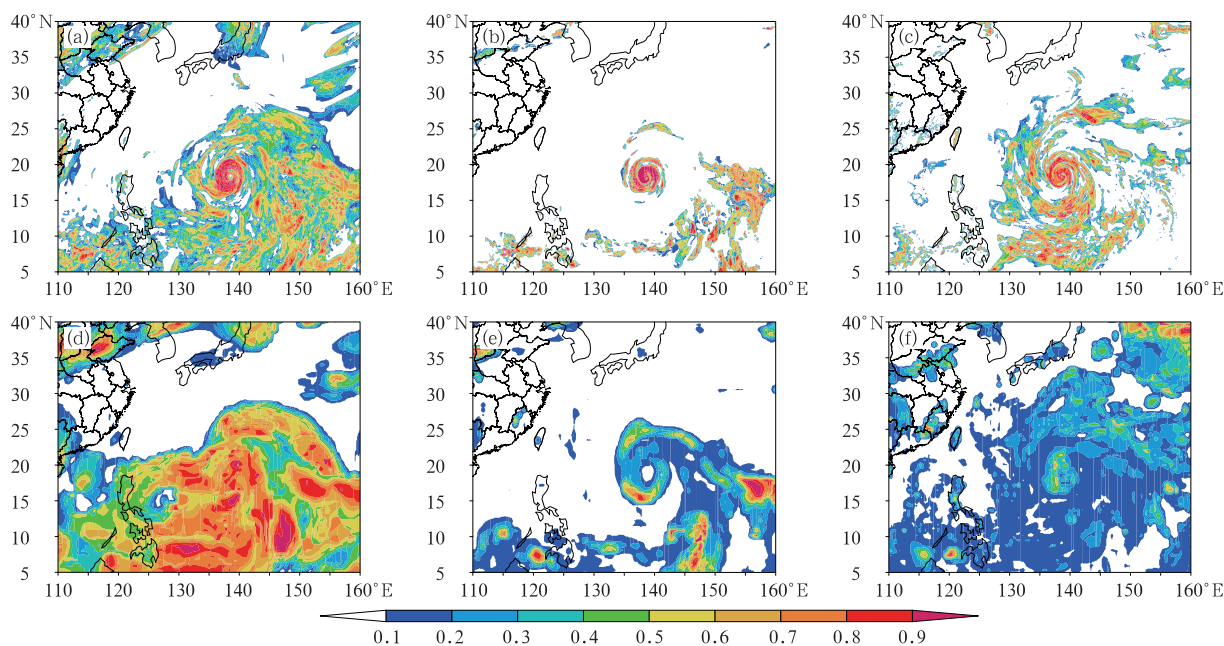


图7 同图4,但为2015年8月4日06时

Fig. 7 Same as Fig. 4, but at 0600 UTC 4 August 2015

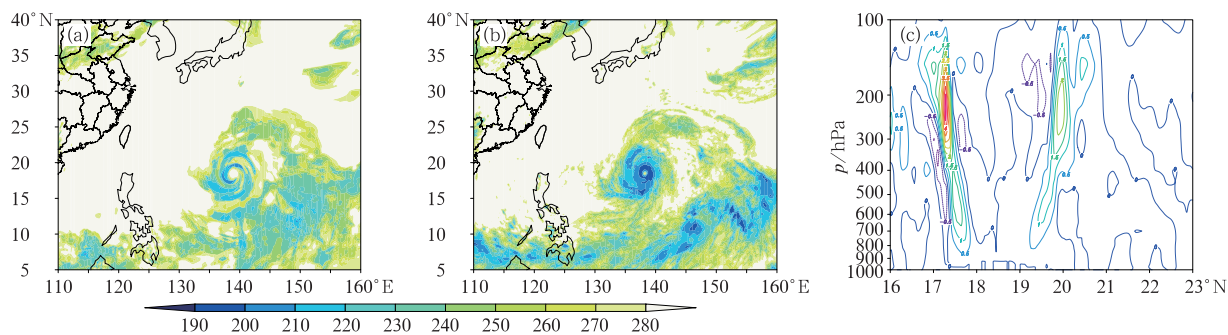


图8 同图5,但为2015年8月4日06时

(经向垂直速度剖面沿 138.5°E)

Fig. 8 Same as Fig. 5, but at 0600 UTC 4 August 2015

(profile of vertical velocity along 138.5°E)

3.3 登陆减弱阶段

台风苏迪罗在2015年8月8日14时以台风级(中心附近最大风力13级)在福建省莆田市二次登陆,进入内陆后逐渐减弱,本文选择台风登陆我国大陆后4 h左右即8月8日18时代表登陆减弱阶段,是因为考虑到此时台风已经减弱为强热带风暴级。

图9为2015年8月8日18时模拟的总云量、FY-2卫星总云量、云分类以及EC再分析总云量对比,在云系范围整体分布上,模式较好地再现了“苏迪罗”广阔的云系覆盖区域,但模式漏报了江苏地区的密卷云(图9a,9c,9d),单从模拟的总云量图(图9a)来看,台风中心密闭云分布较为均匀,而从卫星总云量(图9c)可以明显地看到台风中心区云量较少,且台风云系呈东部开口型的非对称结构。图10是同图4一样叠加的8月8日18时高、中、低云量,可以看出,模拟登陆台风云系高云、中云和低云的覆盖范围与EC再分析云量较为吻合,但模拟的各层云量高值中心区位置与EC再分析偏差较大。总的看来,模式对台风云系范围模拟较为准确,单从云量

图可以看出,台风登陆之后台风眼不再明显,云系范围较宽广,模式对登陆后的台风云系结构模拟能力有待提高。

图11是2015年8月8日18时模拟TBB和垂直速度沿线段A(29°N 、 117°E)到线段B(22°N 、 120°E)剖面(“苏迪罗”登陆后强对流云团主要呈西北—东南方向分布,故选取斜线AB为垂直速度剖面切割线)与卫星TBB,对比分析图11a和11b,模拟的TBB大致范围与实况吻合较好,但整体强度偏弱,台风云系北部的模拟TBB较实况偏强,而浙闽地区的模拟TBB又较实况偏弱,此外,模式没能模拟出台湾西南海域的TBB低值区。总之,由于台风登陆后受地形、水汽以及大尺度环流等因素影响,模式对登陆后的台风云系结构模拟效果并不是很理想。从图11c可以看出,在台风中心区(25.4°N 、 118.4°E)附近,有一垂直速度负值区即此处为弱下沉运动,对应着模式模拟中低云较少或为无云区;台风南北分布有多个强上升运动区,南部的上升运动在400 hPa高度处达到最强,而北部上升运动最强区较南部偏高,强度不及南部。说明台风苏迪罗登陆

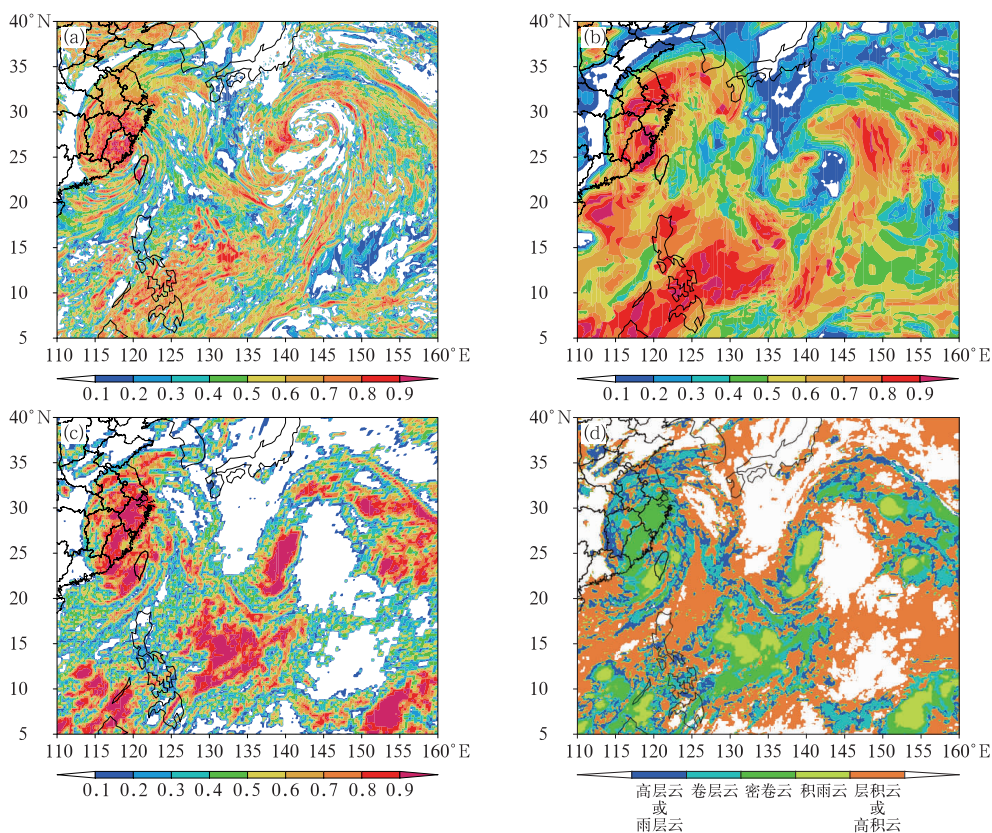


图9 同图3,但为2015年8月8日18时
Fig. 9 Same as Fig. 3, but at 1800 UTC 8 August 2015

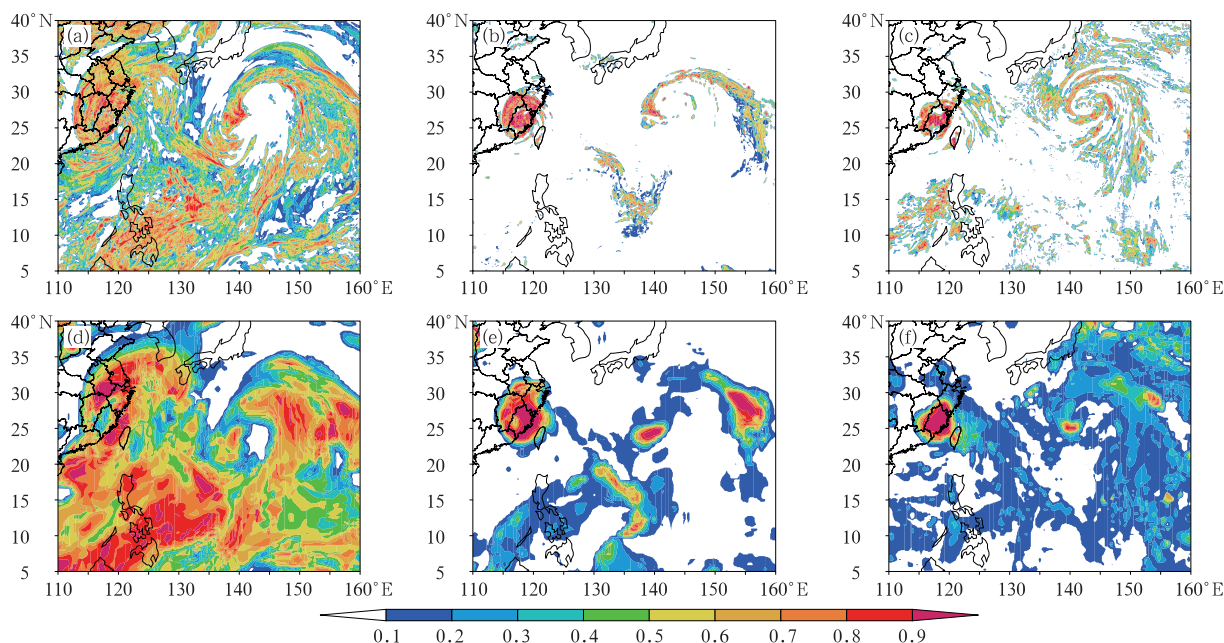


图 10 同图 4, 但为 2015 年 8 月 8 日 18 时

Fig. 10 Same as Fig. 4, but at 1800 UTC 8 August 2015

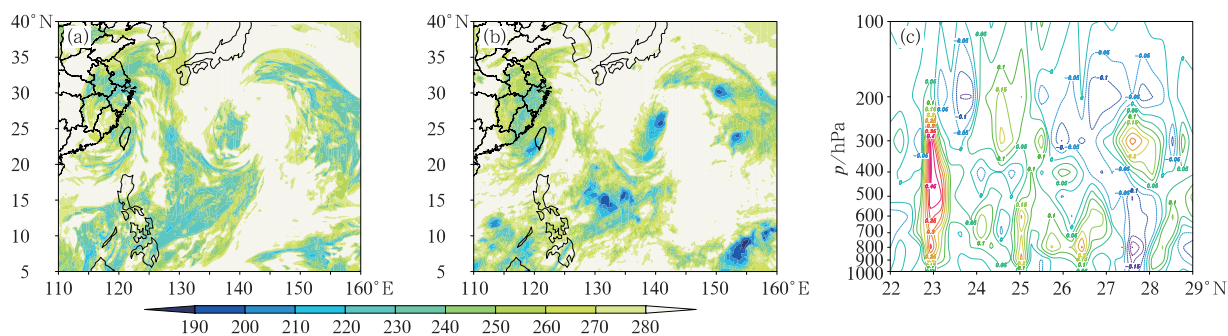


图 11 同图 5, 但为 2015 年 8 月 8 日 18 时, (c) 沿点 (29°N, 117°E) 到点 (22°N, 120°E) 的垂直速度剖面

Fig. 11 Same as Fig. 5, but at 1800 UTC 8 August 2015

(c) profile of vertical velocity along from A (29°N, 117°E) to B (22°N, 120°E)

后, 台风眼不再明显, 云墙(眼壁区的云)开始塌陷, 上升运动峰值高度达 400 hPa 左右, 这比台风在成熟阶段的 250 hPa 云顶高度低了约 3000 m。说明此时的台风云系已经没有了强大的眼壁云墙上升区, 即台风登陆后强度减弱迅速, 结构开始变得松散。

综合来看, 模式对登陆后的“苏迪罗”云系覆盖范围模拟较好, 但没能较好地模拟出三维云量高值中心区位置; 模拟的 TBB 高低值中心区与实况也有一定差距, 即 GRAPES 模式对登陆后的“苏迪罗”云系结构模拟效果并不是很理想, 可能与模式的云量计算方案的误差有关。

4 结论与讨论

运用 GRAPES_Meso 模式成功地模拟了 2015 年 13 号台风苏迪罗, 再与实况台风路径、强度数据、FY-2 卫星云图资料以及 EC 再分析资料做了对比分析, 同时对台风从生成发展、成熟再到登陆三个阶段做了云系时空演变分析, 初步得到以下结论:

(1) 模式较好地再现了台风苏迪罗从生成发展到成熟再到登陆过程, 模拟的台风路径与实况吻合较好, 台风强度的变化趋势也得到了较好模拟再现。

(2) 在发展阶段, “苏迪罗”云系台风眼结构比

较模糊,中层有较为明显的非对称强对流云团,台风西部、南部和东北部均存在 TBB 低值区,这些区域从低层到高层都是发展较为旺盛的积雨云,垂直上升运动较强;GRAPES 模式模拟的台风云系云量总体分布与实况吻合较好,但在部分区域高层和低层云量均出现不同程度的空报现象,模拟的 TBB 强度偏弱,即模拟的云顶高度比实况偏低。

(3) 在成熟阶段,“苏迪罗”有一明显的低层窄高层宽的漏斗式台风眼,垂直上升运动比发展阶段高一个量级,云系发展高度达到 250 hPa 左右,“苏迪罗”西部眼壁区呈双眼壁结构,中高层表现更加明显,而垂直速度纬向剖面也证明了这一点;模式模拟的“苏迪罗”的密闭云区范围较卫星实况偏小,云顶高度比实况高度偏低。

(4) “苏迪罗”在登陆后强度迅速减弱,台风眼不再明显,模式对登陆后的“苏迪罗”云系覆盖范围模拟较好,但没能较好地模拟出三维云量高值中心区位置;模拟的 TBB 高低值中心区与实况也有一定差距,即 GRAPES 模式对登陆后的“苏迪罗”云系结构模拟效果并不是很理想。

(5) 总之,模式较好地模拟出了“苏迪罗”云系整体范围(云量),在海洋面即前两个阶段的模拟效果要好于登陆后阶段,这有可能是因为台风登陆后受到地形、水汽以及大尺度环流等动力热力因素的影响,模式对登陆后的台风云系细致结构如强对流云团的分布等方面的模拟能力欠佳,进一步改进 GRAPES 模式的云量方案可能会改善登陆台风云系的模拟。

致谢:感谢国家卫星气象中心提供卫星产品和 EC 提供的云量资料,同时感谢 NCEP/NCAR 免费发布的 FNL 资料以及中国气象局热带气旋资料中心提供的台风数据。

参考文献

陈德辉,薛纪善,杨学胜,等,2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. 科学通报,53(20):

2396-2407.

端义宏,2015. 登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估[J]. 地球科学进展,30(8):847-854.

黄奕武,高栓柱,钱奇峰,2016. T639 台风预报误差与环境场变量的相关分析和回归分析[J]. 气象,42(12):1506-1512.

江吉喜,叶惠明,1987. 用 GMS 云图作登陆台风降水预报的方法研究[J]. 热带气象,3(2):369-376.

陶祖铨,王洪庆,1995. 9216 号台风登陆后的云系结构变化[J]. 应用气象学报,6(2):146-152.

徐国强,陈德辉,薛纪善,等,2008. GRAPES 物理过程的优化试验及程序结构设计[J]. 科学通报,53(20):2428-2434.

薛纪善,陈德辉,2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京:科学出版社:67-81.

张庆红,2006. 特大眼台风 Winnie(1997)的高分辨率数值模拟[J]. 气象学报,64(2):180-185,257.

郑晓辉,徐国强,魏荣庆,2013. GRAPES 新云量计算方案的引进和影响试验[J]. 气象,39(1):57-66.

周冠博,冉令坤,高守亭,等,2015. 台风莫拉克动力结构的高分辨率数值模拟及诊断分析[J]. 气象,41(6):727-737.

朱佩君,陈敏,陶祖铨,等,2002. 台风云系的数值模拟[J]. 北京大学学报:自然科学版,38(3):358-363.

Alvey III G R, Zawislak J, Zipser E, 2015. Precipitation properties observed during tropical cyclone intensity change[J]. Mon Wea Rev, 143(11):4476-4492.

Bu Y P, Fovell R G, Corbosiero K L, 2014. Influence of cloud-radiative forcing on tropical cyclone structure[J]. J Atmos Sci, 71(5):1644-1662.

Dvorak V F, 1975. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery[J]. Mon Wea Rev, 103(5):420-430.

Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al, 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package[J]. J Atmos Oceanic Technol, 15(3):809-817.

Marks Jr F D, 2014. Advancing tropical cyclone forecasts using aircraft observations[M]// Mohanty U C, Mohapatra M, Singh O P, et al. Monitoring and Prediction of Tropical Cyclones in the Indian Ocean and Climate Change. Dordrecht: Springer: 169-191.

Tourville N, Stephens G, DeMaria M, et al, 2015. Remote sensing of tropical cyclones: observations from CloudSat and A-Train profilers[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(4):609-622.