

# 南海台风模式对“海燕”移动路径的预报<sup>\*</sup>

陈子通 张诚忠 黄燕燕 冯业荣 钟水新 戴光丰 徐道生 杨兆礼

CHEN Zitong ZHANG Chengzhong HUANG Yanyan FENG Yerong

ZHONG Shuixin DAI Guangfeng XU Daosheng YANG Zhaoli

中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室,广州,510080

*Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510080, China*

2013-12-02 收稿,2014-03-31 改回.

陈子通,张诚忠,黄燕燕,冯业荣,钟水新,戴光丰,徐道生,杨兆礼. 2014. 南海台风模式对“海燕”移动路径的预报. 气象学报, 72(4): 678-689

Chen Zitong, Zhang Chengzhong, Huang Yanyan, Feng Yerong, Zhong Shuixin, Dai Guangfeng, Xu Daosheng, Yang Zhaoli. 2014. The track of Typhoon "Haiyan" as predicted by the typhoon model for South China Sea. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(4): 678-689

**Abstract** Super typhoon Haiyan (2013) was the most notable typhoon in 2013. In this study, the operational prediction of Haiyan (2013) by the Tropical Regional Model for South China Sea (TRAMS) is analyzed. The results show that the model successfully reproduces Haiyan's fast passage through the Philippines, and its northward deflection after landfall in Vietnam. There are also some shortcomings, including the predicted too weak intensity compared to the observed. An analysis of the higher-resolution model simulations indicates that the storm is also characterized by an upper-level warning core during its mature stage, and a deep layer of easterly flow. Sensitivity experiments are conducted to study the impact of certain physical processes on the improvement of the typhoon forecast. The results show that appropriate boundary-layer, cumulus and orographic gravity wave parameterizations, and improved initial conditions as well as increased horizontal grid resolution all help improve the intensity forecast of Haiyan.

**Key words** Typhoon, Typhoon track, Numerical weather prediction

**摘要** 超强台风“海燕”是2013年最著名的台风。分析中国南海台风模式对“海燕”整个过程的预报,发现模式基本预报出“海燕”的快速穿过菲律宾和登陆越南后北翘东折的移动路径,但也存在一些不足,例如强度预报偏弱。通过高分辨率数值模拟分析了“海燕”的变化机理,发现高层暖心、高中低层一致东风气流是其超强发展和快速西移的主要特征。进一步的模式预报试验中,探讨了模拟技术对提高台风预报水平的影响作用。分析结果表明,准确的模式物理参数化(如边界层、积云对流和地形参数化)和模式初始大气构造等,以及提高模式分辨率有助于提高台风预报水平。

**关键词** 台风,路径,数值预报

**中图法分类号** P444

## 1 引言

台风灾害主要在台风登陆前后造成。人们很早就意识到台风路径预报的重要性。Kasahara(1957)

提出台风路径预报模式,考虑台风移动是基本流引导和台风内力产生速度的合成。紧接着的20世纪60—70年代,中国开始研究用数值模式对台风路径做预报。由于计算机条件和其他技术的限制,到80

\* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206010)、广东科技计划项目(2012A061400012、2011A032100006)。

作者简介:陈子通,主要从事数值预报研究。E-mail:ztchen@grmc.gov.cn

年代前期,中国的数值预报模式仅是低分辨率、不包含非绝热物理过程的简单模式(倪允琪等,1981;王康玲等,1986)。80年代中期,广州热带海洋气象研究所发展了可用于业务预报、包含非绝热过程的热带区域数值模式(Xue, et al,1988),但是分辨率仍然较低,物理过程不完整,与国际上的先进模式相比仍有较大的差距(薛纪善等,1996)。80年代以来,数值天气预报的物理参数化研究趋于成熟,计算能力有很大提高,数值模式提高分辨率,包含较为完整的物理过程成为可能。90年代,科学家开始考虑把数值模式用于台风路径实时预报中(薛纪善等,1996;王诗文等,1994),进行相关数值预报试验,并最终建立起可实时预报台风路径的业务数值模式(王康玲等,1996;王诗文等,1994;雷小途等,1996)。在试验研究和业务预报中发现,台风路径预报对物理过程参数化和模式的分辨率十分敏感(王诗文等,1994)。因而对提高分辨率的追求和物理过程参数化的研究从未间断(朱永禔等,1982;陈德辉等,1996;何斌,2006;河慧卿等,2009)。21世纪以来,巨型计算机的高速发展使数值预报模式的分辨率大幅度提高,发达国家(如美国、英国、日本)台风数值模式进步神速(陈德辉,1995)。

中外数值模式对台风路径预报的研究开始较早,发展也较为成熟,大多数数值模式对台风路径有一定的预报能力。对台风强度预报的研究起步较晚,强度预报能力明显低于路径预报。近年来,国际上许多科学家对台风强度、强度变化(尤其快速加强)的预报及其原因也十分关注。如Pun等(2013)的研究指出,西北太平洋存在热带气旋的高潜热区,利于热带气旋强度增强。Kaplan等(2003)分析了北大西洋上快速加强的热带气旋的大尺度特征,提出预测热带气旋强度快速增强的方法。高分辨率数值模式也为强度预报研究提供了有利条件,不少科学家利用高分辨率数值模式模拟台风强度变化,并取得成功。如Rogers(2010)采用1.67 km分辨率MM5模式成功模拟了“Dennis”飓风的移动路径、强度和快速加强过程强度变率。Chen等(2011)基于WRF-ARW模式采用双向反馈、移动套网格(最高分辨率1 km)方法研究了2005年“Wilma”飓风,成功预报出“Wilma”快速增强及强度减弱的过程,并研究其快速加强过程中眼墙和高层暖心的关系(Chen, et al,2013;Zhang, et al,2012),认为高层暖

心对其快速加强有重要作用。

中国目前的业务数值模式对台风的移动路径具有较强预报能力,但强度预报水平较低,尤其是超强台风。2010年台风“鲇鱼”的预报,以及2013年“海燕”的预报都说明了这个问题。数值模式对强台风预报偏弱,在一定程度上影响路径和风雨预报的准确性。如2006年登陆中国的超强台风“桑美”曾一度引起中国气象学者的浓厚兴趣,很多科学家在“桑美”强度的数值模拟方面做了很多研究工作(于玉斌等,2008;施丽娟等,2009;马玉芬等,2009;张进等,2007;许映龙等,2010)。于玉斌等(2008)、施丽娟等(2009)、马玉芬等(2009)分别用MM5(v3.5)、ARPS、WRF模式模拟超强台风“桑美”,但模拟的“桑美”强度普遍偏弱,由此也引起路径及强风和强降水预报的不准确。超强台风的预报问题与高分辨率的观测资料、台风初值技术和模式技术有关,尤其是模式物理过程。由于洋面上超强台风发生、发展机理的深入细致研究非常缺乏,导致目前台风模式的一些主要物理过程的技术方案缺陷较多,极大地影响了台风路径和强度预报的精度。

过去20多年来,中国业务台风数值模式预报取得了很大的进步,中国南海台风模式经过几代人的努力,预报水平也在不断提升。2006年以前,中国南海台风模式是基于广州热带海洋气象研究所TL模式发展起来的。2006年起,基于GRAPES框架建立了新的南海台风模式,逐年进行技术改进和完善,预报水平稳步提升,目前中国南海台风模式已经成为中国主要的台风业务模式之一。

“海燕”于2013年11月4日在西北太平洋洋面生成后西行并快速加强,8日加强为超强台风。由于“海燕”以超强台风级别登陆菲律宾,成为西太平洋有记录以来登陆时风力最强的热带气旋。其登陆时强风及引起的大规模风暴潮在菲律宾中部造成毁灭性的破坏。据美国联合台风警报中心估测,“海燕”在菲律宾中南部岛屿附近活动时其最大风速达75 m/s,以超过300 km/h的速度登陆,远超2005年登陆美国的“卡特里娜”飓风。“海燕”和“卡特里娜”都是以超强级别登陆、造成毁灭性破坏的台风(或飓风),且都经历了多次登陆。“海燕”8日以超强级别登陆菲律宾后,强度有所减弱,于11日第二次登陆越南北部;中外数值模式(包括南海台风模式)对“海燕”移动路径的预报较为成功,但强度的预

报都偏弱,加之移速快使菲律宾应对仓促、岛国地形也加重了灾害;而“卡特里娜”飓风也是超强级别的风暴,登陆路易斯安那州时,风速达到 225 km/h。当时美国国家飓风中心对“卡特里娜”路径和强度的预报相当准确,2005年8月26日(提前3 d)报出飓风直接经过新奥尔良的概率为90%,为减灾救援争取了时间,其造成惨重损失主要是由于强烈风暴潮、防洪堤溃决和防灾混乱。

分析南海台风模式对超强台风“海燕”移动路径的预报,主要是为了了解目前业务台风模式对超强台风的预报技巧和存在问题,总结经验,为发展新的业务台风模式提供参考,也可为超强台风的预报服务提供一些参考。

## 2 超强台风“海燕”的过程特征

2013年第30号热带风暴“海燕”于11月4日00时(世界时,下同)在西北太平洋洋面(6.1°N, 152.2°E,)生成。“海燕”生成后向西北偏西方向移动并快速加强,于4日18时加强为强热带风暴,5

日06时加强为台风,18时加强为强台风,6日00时加强为超强台风,中心最低气压950 hPa,中心最大平均风速达55 m/s。7日23时“海燕”以超强台风级别登陆菲律宾(图1),登陆时台风中心最低气压890 hPa,台风内核地面最大风速达75 m/s。8日06时“海燕”减弱为台风,并于8日夜间进入中国南海,之后靠近西沙群岛附近海域,10日下午擦过海南岛西南部后移入北部湾,于10日13时减弱为台风,21时在越南北部广宁省沿海登陆,登陆时中心附近最大风速38 m/s,最低气压965 hPa。11日01时“海燕”进入中国广西壮族自治区宁明县境内,02时减弱为强热带风暴,04时减弱为热带风暴,12时减弱为热带低压。受“海燕”影响,广西大部分地区和广东西南部的市、县出现了大范围强降水及大风天气。可见,“海燕”具有强度极强、移速极快、破坏极大、影响时间偏晚等特点。

“海燕”生成时,位于印度尼西亚以东的西北太平洋洋面,生成时具有明显的暖洋面。从海表温度距平与台风强度变化的比较(图2a)可以看出,两者

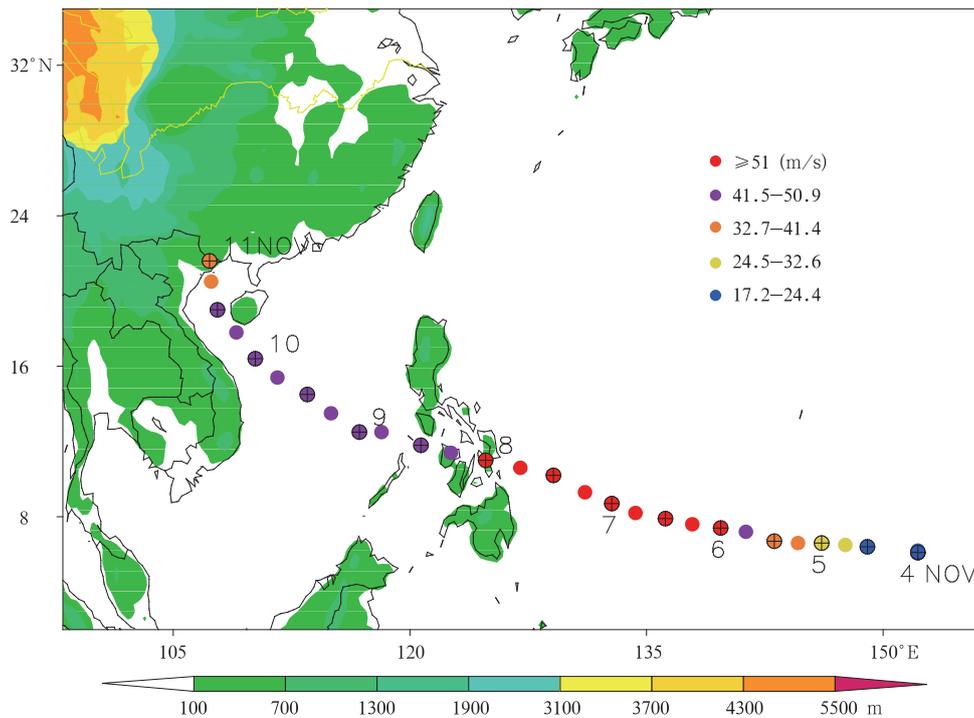


图1 台风“海燕”的实况移动路径

(色阶为地形高度,圆点代表“海燕”在对应时间的位置和强度等级(间隔6 h))

Fig. 1 Observed track of Typhoon Haiyan (where the shaded represent topographic heights and the colored dots represent the position and intensity of Haiyan (every 6 h))

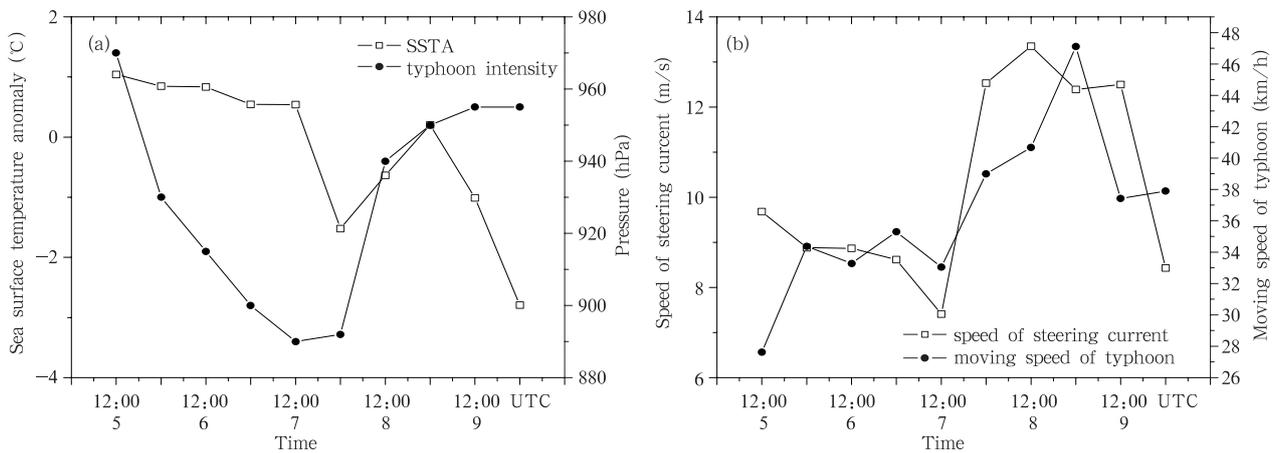


图2 11月5日12时—10日00时台风强度和移动速度的变化

- (a. 台风强度与台风中心 300 km 范围内平均海表温度距平-时间演变;
- b. 台风移动速度(右侧坐标)与台风中心 300 km 范围内平均引导气流(左侧坐标)的逐 12 h 演变图)

Fig. 2 Time variation of intensity and moving speed for Haiyan during 12:00 UTC 5 – 00:00 UTC 10 November

- (a) Time variation of the typhoon intensity and mean sea surface temperature anomaly averaged over the area within 300 km around the typhoon center;
- and (b) time series of typhoon moving speed and mean steering averaged over the area within 300 km around the typhoon center at 12 hours interval

具有较好的对应关系。5日18时—7日12时海表温度总体偏高(距平为正),而台风强度则表现为逐渐增强的趋势,之后海表温度开始下降(距平为负值或接近于0),台风强度也随之减弱,说明“海燕”的生成和发展与暖洋面有密切关系。最新研究表明,西北太平洋暖洋面(26°C等温线厚度)及其台风潜热释放与该区域的台风尤其是超强台风的生成和发展有密切的关系(Pun, et al, 2013)。“海燕”另一特点是移动速度快,初步比较了东风引导气流(台风中心300 km范围内500 hPa平均东风)与台风移动速度(图2b)可以看到两者具有较明显的正相关,从8日00时开始引导气流速度增强到10 m/s以上,并一直维持到9日18时,相应的时段内台风移动速度也基本维持在38 km/h以上,这说明“海燕”台风的移动速度主要受副热带高压南侧的东风气流影响。

### 3 移动路径特点及模式预报分析

#### 3.1 南海台风模式

南海台风模式是基于GRAPES-meso发展起来的非静力模式,采用半隐式半拉格朗日的时间积分方案,经-纬度格点的网格设计,水平方向取Arakawa-C网格,垂直方向采用Charney-Philips垂直分

层设置,高度为地形追随坐标。模式覆盖范围(0.8°—50.5°N, 81.6°—160.8°E)。水平格距为0.36°,垂直方向分55层,时间积分步长为200 s。采用MRF边界层方案、SAS积云参数化方案、WSM6微物理过程、SLAB陆面过程、SWRAD短波辐射方案以及RRTM长波辐射方案。中国南海台风模式是中国气象局业务准入的区域模式,每天2次120 h预报,发布台风路径、风雨预报和等压面场预报产品,2011年起增加了台风强度预报业务。因台风“海燕”的120 h预报样本数较少,不具有典型代表性,文中用48 h预报结果以做分析。

#### 3.2 路径预报

南海台风模式较为准确地预报出了“海燕”的移动路径。前期,模式准确地预报出了“海燕”登陆菲律宾中部,如以7日00时起报时刻为例(图3)。穿过菲律宾之后进入中国南海的移动路径,以及“海燕”在西沙群岛附近时(10日00时),模式预报“海燕”将进入北部湾后登陆越南的移动路径,均与实况吻合。从4日00时至11日00时,模式对“海燕”一共进行14次预报,24 h路径预报平均误差为81 km,48 h误差157 km,相比欧洲中心全球模式和日本中尺度预报模式等,南海台风模式路径预报的平均误差是比较小的。从台风模式所有时段的路

径预报分布(图3)可见,南海台风模式对“海燕”的路径预报整体发散度较小,尤其对台风在生成后至登陆菲律宾的路径预报和实况非常吻合,“海燕”在进入南海后,台风模式也基本把握住了台风的移动路径和登陆点。

### 3.3 强度预报与风雨预报

各家模式(如欧洲中心全球模式、日本中尺度模式等)对“海燕”的强度预报都明显偏弱,中国南海台风模式(TRAMS)也不例外,24、48和72 h强度预报的平均误差分别是21.65、30.71和26.56 hPa,误差比较大,但欧洲中心全球模式、日本中尺度模式等的平均强度预报误差更大,这说明大多数数值模式对这类超强台风的强度预报是有欠缺的。从图4可以看到,“海燕”台风的强度演变分为四个阶段,4日00时至5日12时,台风缓慢增强,各家模式预报的强度误差都比较小;5日12时至8日12时是台风的快速增强过程,欧洲中心全球模式预报增强过于缓慢,预报的台风强度明显偏弱,例如台风最强时刻7日12时(890 hPa),欧洲中心全球模式的各次预报最好也仅仅预报到958 hPa,误差达到68 hPa,

而日本中尺度模式预报更弱,最低中心气压只是预报到983 hPa,误差高达93 hPa,相对而言,南海台风模式预报的台风强度更接近实况,最低预报到923 hPa,但误差也有33 hPa;第3阶段是9日00时以后的快速减弱过程,各家模式预报的强度略为偏强;最后台风进入中国南海到再次登陆过程,台风处于缓慢减弱过程,各家模式预报都比较准确了。

台风“海燕”登陆菲律宾时,强风造成的重灾备受关注,前文已提及。11日早晨(北京时间05时)前后“海燕”在越南北部广宁省沿海再次登陆,带来的强风暴雨也不容忽视。登陆时中心附近最大风力13级,而后进入中国广西壮族自治区宁明县境内,最大风力12级(33 m/s);06时(世界时)减弱为热带风暴,中心附近最大风力9级(23 m/s),15时在广西境内减弱为低压。根据地面遥测站和自动站的监测统计,台风进入广西境内前后防城港、钦州、崇左和北海等市县先后出现极大风速18—30 m/s不等。从模式925 hPa和10 m高风场预报来看,模式预报的风向基本正确,但风速略小;随着台风减弱向东北移动,模式的风场预报也相应减弱,整个变化过程与实况接近。

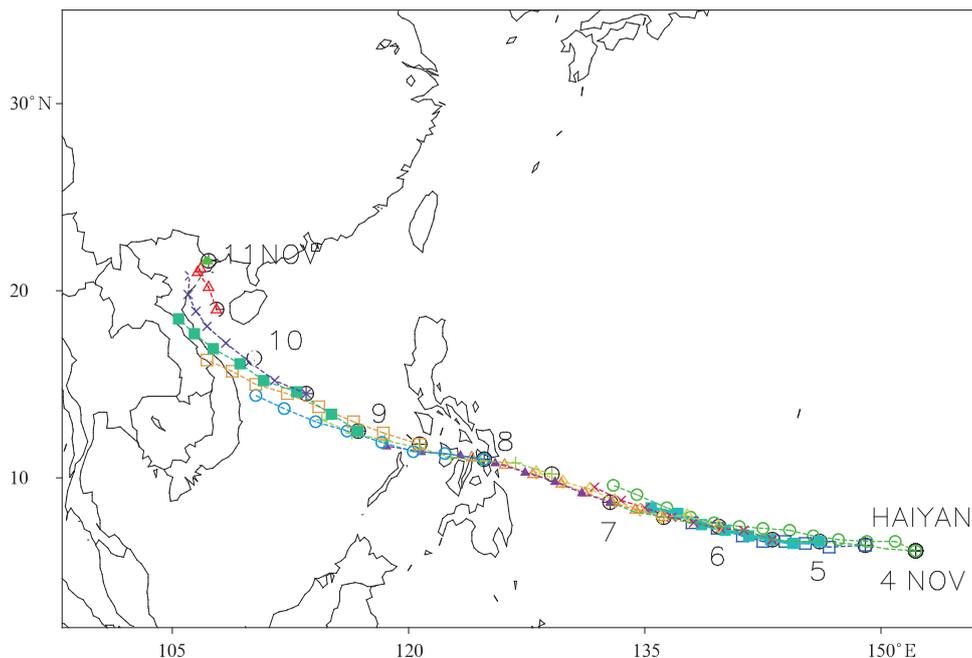


图3 南海台风模式11月4—11日对“海燕”所有时次路径预报分布  
(12 h 预报一次,每次预报48 h,间隔6 h 标记一次,图中数字代表日期)

Fig. 3 Distribution of the Haiyan tracks forecasts by the typhoon model for the South China Sea from 4 to 11 November  
(model run every 12 h, with integrating time of 48 h; forecast position is plotted every 6 h; the numbers in the figure denote dates)

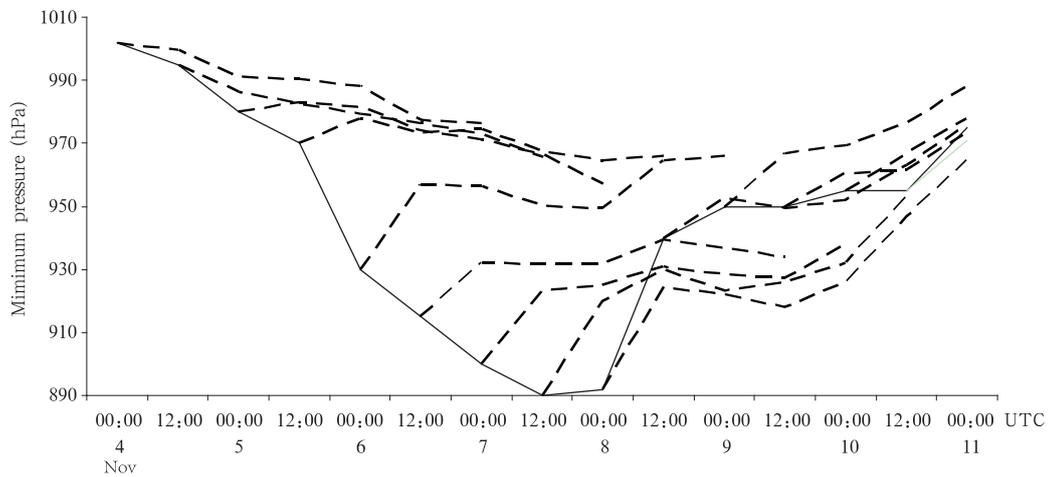


图4 台风“海燕”各次预报的中心最低气压(实线为实况,虚线为各次预报)

Fig. 4 Time series of minimum central pressures of Typhoon Haiyan as are predicted by the model (The solid line and the dotted lines denote observation and forecast, respectively; unit: hPa)

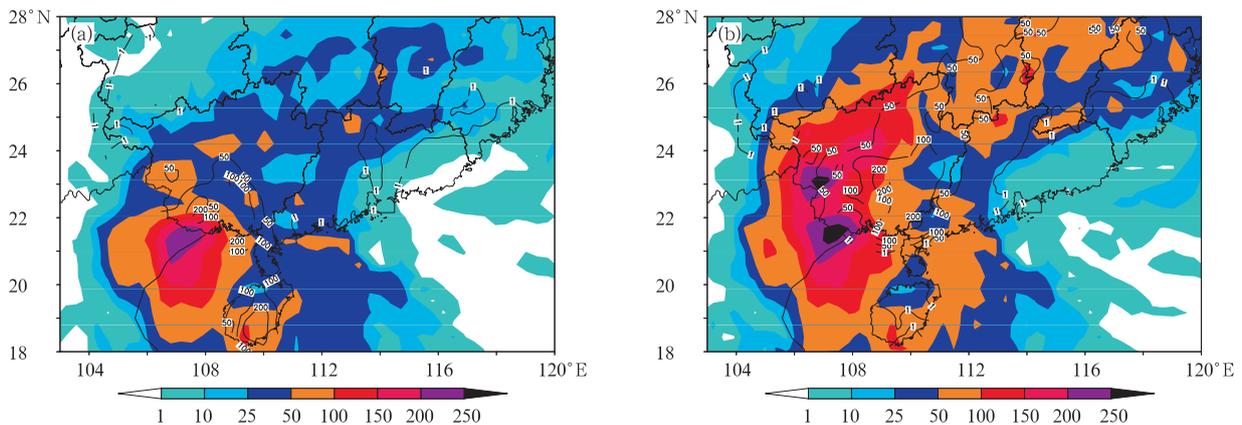


图5 (a) 2013年11月10日00时—11日00时24 h累积降水量和相应24 h模式预报;  
(b) 11日00时—12日00时的24 h累积降水量和相应48 h模式预报雨量  
(填色为模式预报,等值线为实况,色标代表降水量级)(单位:mm)

Fig. 5 (a) Observed 24 h accumulative precipitation and the corresponding 24 h forecast from 00:00 UTC 10 to 00:00 UTC 11 November, and (b) observed 24 h accumulative precipitation from 00:00 UTC 11 to 00:00 UTC 12 November 2013 and the corresponding 48 h forecast (see the text for further details) (the shaded denote model forecast, the contour lines denote the observation, and the color bars denote precipitation levels; unit: mm)

在台风进入北部湾到登陆越南北部期间,广西沿海已普降暴雨(图5);大于50 mm的降水区出现在南宁市及广西西南地区;其中从防城港沿着中越边界到崇左市共出现3个大于200 mm降水的站点。模式的24 h预报显示大于50 mm的地区报对80%广西境内实况暴雨站数,中越交界处150 mm的预报与实况200 mm降水接近。台风进入广西境内后(11日00时—12日00时),24 h降水的暴雨区出现在湖南西南部到广西大部分地区,暴雨中心在广西中部,达200多毫米;模式成功预报出48 h广西和湖南暴雨落区

及雨带走向,以及在广西右江河谷的150—200 mm暴雨中心,其中,报出了广西自治区86%的暴雨站数。从强降水落区、出现时间看,南海台风模式对登陆台风引起的强降水的预报基本准确。

#### 4 数值试验和技术方案影响分析

##### 4.1 模式技术方案的影响分析

超强台风“海燕”大尺度环境场环流特征非常明显,模式动力过程大体反映出其演变规律,配合物理过程可精细描述其移速和强度变化,以及路径转折

等细节。气旋性环流、暖心结构,促使洋面与大气强烈的水汽、热量、动量交换。交换过程通过大气边界层进行,然后激发积云对流。下面主要从边界层方案、积云对流方案进行研究,同时结合其他相关技术,探讨技术方案改进对模式预报的影响作用。

#### 4.1.1 边界层方案的改进试验

旧版南海台风模式边界层参数化方案(MRF)在计算近地层通量时使用莫宁-奥布霍夫相似理论,对流速度的计算较简单,如式(1)所示,新版模式参考了Beljaars(1994)提出的方案进行改进,算法如式(2)(戴光丰等,2013)。

$$W^* = C(\theta_{vg} - \theta_{va})^{0.5} \quad (1)$$

$$W^* = h(\overline{W'\theta'_v}g/T)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中, $C$ 是常量(取2.0), $\theta_{vg}$ 和 $\theta_{va}$ 分别为地表和模式最底层的虚位温, $h$ 是边界层高度, $\frac{g}{T}$ 代表浮力作用, $\overline{W'\theta'_v}$ 是地表感热通量与潜热通量之和( $\overline{W'\theta'_v} = \overline{W'q'} + 0.61\theta_v \overline{W'q'}$ )。

由式(1)可以看到, $W^*$ 的计算只与地表和模式最底层的虚位温的梯度有关。首先,最底层的虚位温( $\theta_{va}$ )与模式分层有很大关系,这样会影响 $W^*$ 的计算;其次,不同的下垫面会对地表的位温( $\theta_{vg}$ )产生很大的影响,容易出现计算偏差。而式(2)的对流速度计算直接与地表热通量和边界层高度相关联,具有更加明显的物理意义,它控制着湍流和边界层的发展,避免了式(1)中比较明显的误差,计算会更加准确。

对流速度的改进对“海燕”台风的预报改善主要体现在台风的快速减弱过程,因此,以11月7日00

时起报时刻为例,研究两方案的影响作用,式(1)对应旧版模式(原方案),式(2)对应新版模式(改进方案),进行72 h 预报试验。图6给出了原方案与改进方案的72 h 预报的比较,可以看到两种方案的路径预报在前48 h 基本上一致,在48小时以后,改进方案有明显的优势,最大改进23.5 km,路径误差减小12%;强度预报改进方案也明显优于原方案,48 h 台风中心气压预报,改进方案比原方案减少11 hPa,强度误差减小23%。

对流速度直接影响海表向上通量(感热、潜热和动量等)传输,对台风的发展和维持起着重要作用。数值试验分析得知,上传的动量通量、潜热通量和感热通量,原方案比改进业务方案偏大(图略),这可能是原方案模拟的台风强度减弱较慢(“海燕”8日00时后减弱),误差较大的原因。

#### 4.1.2 对流参数化方案改进试验

中国南海台风业务模式中所使用的参数化方案是Pan和Wu等早期开发的SAS方案(Pan, et al, 1995)。Han等(2011)在SAS方案的基础上进行了多方面的改进,包括:将对流抑制能量定义为云底垂直速度的函数,卷入率定义随高度逐渐变小,考虑云底干空气层对于对流触发的抑制作用,云底质量通量满足局地CFL判据,考虑因对流而诱发的水平气压梯度力对动量输送的影响,考虑了云水和雪的卷出等技术改进。改进的SAS方案对大多台风预报的效果非常明显,但是对于超强台风“海燕”似乎影响不大,这可能是“海燕”的结构较为对称,对流发展旺盛的缘故。然而,SAS对流参数化方案在考虑层云与积云的耦合仍有不少欠缺。在原来SAS方案

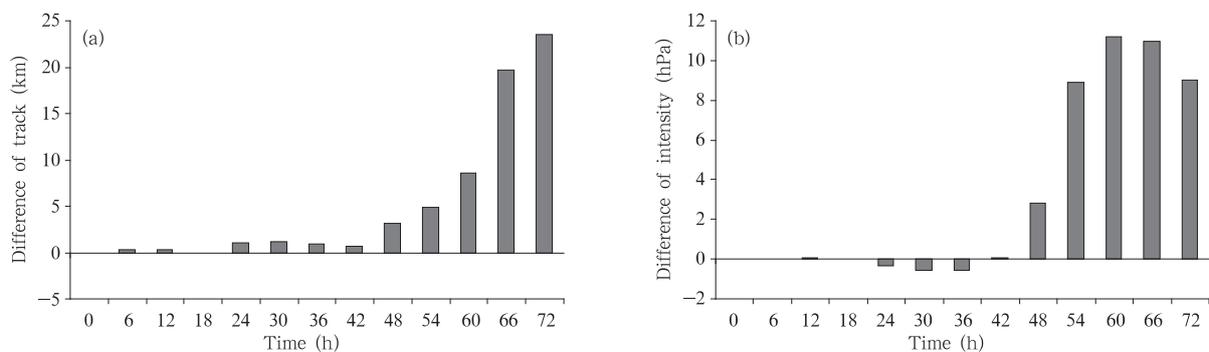


图6 台风“海燕”72 h 预报误差差值(原方案 - 改进方案; a. 路径误差, b. 强度误差)

Fig. 6 Differences of the forecast errors for Typhoon Haiyan within 72 h  
(i. e. original scheme minus modified scheme; a. track error, b. intensity error)

中,仅仅考虑了上升气流对水汽的卷入和抬升作用,对于上升气流穿过层云时云水和云冰的卷入过程并没有考虑,这也就相当于 SAS 方案仅仅考虑了对流云对层云的单向耦合过程,而对于大尺度层云对对流云的反向作用则被忽略了。基于上述考虑,增加对流上升气流中云水、云冰以及雪的卷入和抬升过程,同时增加考虑抬升过程中云水和云冰向雨和雪的微物理转化过程,通过这些修改来引入层云和对流云的相互耦合机制。同样以 7 日 00 时起报为例,考察对流参数化方案技术改进的影响。

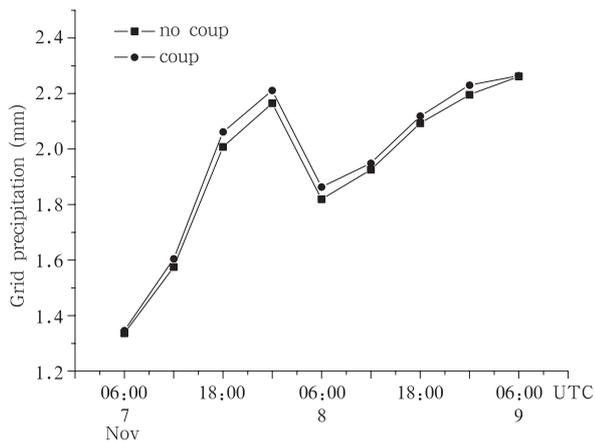


图 7 逐 12 h 预报累计格点降水 (台风中心 300 km 范围内平均)变化

Fig. 7 Time series of hourly grid point forecast precipitation (averaged over the area within 300 km around the typhoon center) using the different schemes

从对积云以对流参数化与微物理过程产生的平均倾向进行比较可以发现:原对流方案只生成云冰( $q_i$ )而没有考虑云冰向雪( $q_s$ )的转化过程,新方案由于考虑了抬升过程中云冰向雪的转化过程,所以对流中产生的一部分云冰转化成为雪;同时新方案中引入了对流上升气流对云冰的抬升作用,结果使得层云的高度有所抬高,新方案的微物理倾向高度比原方案更高(图略)。对云水和雨的倾向变化进行比较可以得到类似的结论。在抬升过程中云滴通过碰并增长,在对流云顶附近它们被卷出形成层云,然后又通过微物理过程下落形成模式格点降水,这些增长后的云滴在下落过程中又进一步通过碰并产生更大的雨滴,因此可以推测新方案预报的层云降水(格点降水)将会比原方案更强一些。从图 7 看到,新方案的格点降水确实有所增强,这与前面的推测结论

是一致的。最后对 72 h 预报试验进行影响评估,可以看到,在大部分时间内考虑耦合的改进方案强度预报(图 8)要好于原方案,而路径预报则大体相当。

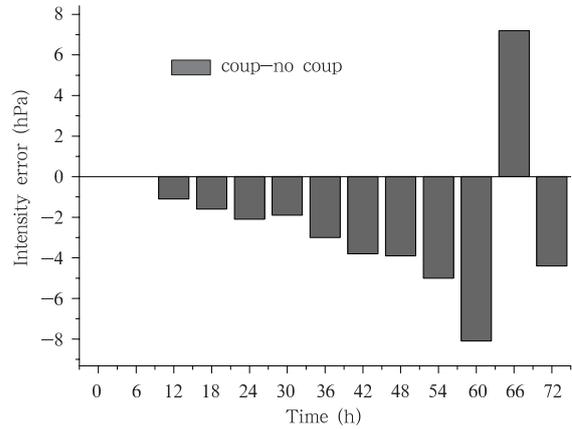


图 8 预报试验台风中心气压(hPa) 预报误差对比(改进方案 - 原方案)

Fig. 8 Comparison of the forecast errors for the central pressure (hPa) of the typhoon between the experiments (modified scheme minus original scheme)

#### 4.1.3 其他相关技术改进试验

地形参数化的影响,主要考察地形重力波的拖曳影响。研究表明,在不考虑次网格地形重力波拖曳参数化过程时,模式对风场的模拟将出现偏差。钟水新等(2014)在南海台风模式业务版中发展和引进了 Kim 等(1995)次网格地形重力波拖曳参数化方案(简称 KA95),指出在引入地形重力波拖曳参数化过程后,模式对台风登陆时路径和强度的预报能力均有提高,对台风预报时长越长,次网格地形重力波拖曳的影响也更为明显。根据 Kim 等(1995),当气流翻越不规则地形时,在参考层会产生相应的应力,它会以重力波的形式向垂直方向发展,当重力波遇到不稳定条件时波破碎,这一方面使得拖曳力减弱,另一方面将重力波向下游传播。台风模式引入重力波拖曳总体上提高了模式预报精度,特别是长时效预报效果较为明显。

为了考察次网格地形重力波拖曳对“海燕”预报的影响,进行了对比试验。试验表明考虑次网格地形重力波拖曳后,模式对台风登陆时路径和强度的预报能力有提高。对 7 日 00 时起报的例子,次网格地形重力波拖曳对 48 小时以内的台风路径和强度预报影响不大,但 48 小时以后的预报改进较为明

显,路径预报误差普遍减少十几至二十几千米。而对临近登陆越南的预报,考虑次网格地形重力波拖曳后路径预报效果更好。试验说明考虑地形重力波拖曳,提高了南海台风模式的预报能力。

模式初始大气的构造技术对台风预报也有明显影响。考虑到暖洋面和台风暖心结构的作用,主要研究了模式参考大气温度初始扰动量的算法。南海台风模式基于 GRAPES\_meso 采用参考大气(满足静力平衡)的做法,引入参考大气的主要目的是消除垂直运动方程中满足静力平衡的分量,从而使垂直运动方程中重力与气压梯度力之间由“大项平衡”变为“扰动小项平衡”,提高计算精度。在模式预报中参考大气是不变,真正预报的是扰动量。对于温度扰动量来说(模式中使用位温),原模式方案是用气压扰动量通过静力平衡关系求得位温扰动量,这种做法有助于提高模式稳定性和大形势预报效果,但容易导致温度预报产生较大误差,特别是低层。为了提高低层温度的计算精度,在改进方案中,低层位温扰动量采用式(3)的算法,中高层保持原算法,然后低层向中高层逐渐过渡。改进算法既提高低层温度计算的精度,也保持了模式预报的稳定性,测试表明改进算法有助于提高整体预报效果。

$$\theta'(\lambda, \varphi, \hat{z}, t) = \theta(\lambda, \varphi, \hat{z}, t) - \bar{\theta}(z) \quad (3)$$

式中,  $\theta'(\lambda, \varphi, \hat{z}, t)$  是位温扰动量,  $\theta(\lambda, \varphi, \hat{z}, t)$  是位温,  $\bar{\theta}(z)$  是位温参考量。在“海燕”预报试验中,仍以 7 日 00 时起报为例,改进方案总体效果优于原方案,改进方案的路径预报误差明显小于原方案。

#### 4.2 高分辨率模式模拟试验

基于中国南海台风模式,开展高分辨率数值试验。模式各选项与南海台风业务模式相同,仅重新设定高分辨率模式范围(0.8°—20.6°N, 113.0°—141.8°E),模式水平分辨率从 0.36°提高至 0.09°。选 7 日 00 时起报时刻为代表,模式预报 36 h。期间正是“海燕”发展至最强盛且快速穿过菲律宾的时段。

高分辨率模式基本模拟出“海燕”快速穿过菲律宾的过程,预报场与实测分析场非常接近,路径、强度变化趋势与实测也基本一致,从图 9 可看出高分辨率模式的路径预报误差是比较小的,且明显优于业务南海台风模式(36 km)。

模式预报“海燕”快速加强的趋势与实况接近。从图 10 看到台风中心海平面气压 7 日 00 时后快速下降,7 日 22 时达到了最低,登陆菲律宾(预报 7 日 23 时登陆,预报登陆的时间与实况是一致的)后,中

心气压迅速回升,台风强度趋于减弱。总体上台风周边中低层东风风速大,而中高层相对较小,中低层东风风速大小与台风强度变化有很好的对应关系,而台风移动速度则与中高层风速相关较好。模式预报的移动速度变化比较平稳(图中虚线所示),大体上在 30—46 km/h,非常快速地向西移,数值大小很接近实测情况。

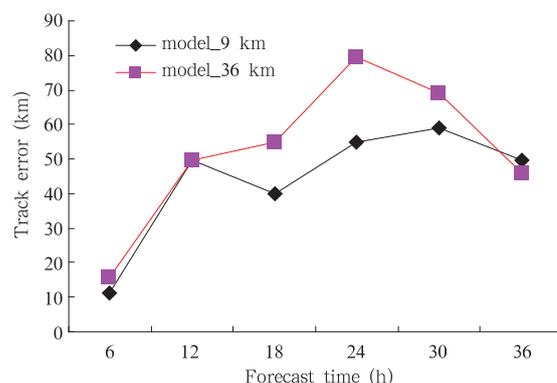


图 9 模式路径预报误差对比  
(2013 年 11 月 7 日 00 时起报)

Fig. 9 Comparison of the track forecast errors between the 9 km resolution and 36 km resolution settings in the model (with the initial time of 00:00 UTC 7 November 2013)

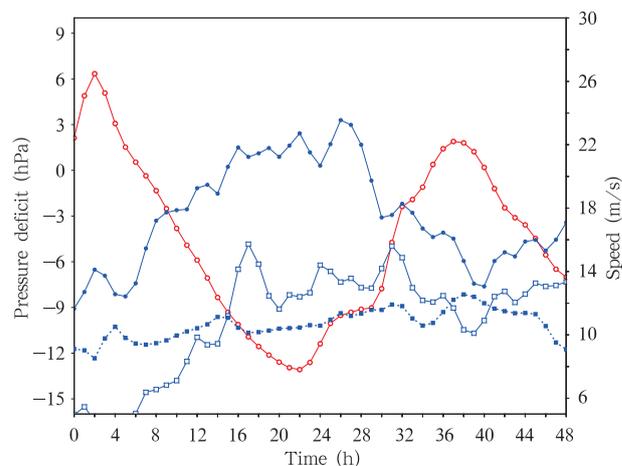


图 10 模式 48 h 预报曲线

(红色线:预报的台风中心海平面气压偏差(相对初始),蓝色虚线:预报的台风移动速度;蓝色实线:台风中心 300 km 范围平均东风(实心:3 km 高,空心:8 km 高))

Fig. 10 Model 48 hours forecast curves  
Red line; deviation of typhoon central sea surface pressure (relative to the initial value)  
Blue dotted line; moving speed; blue solid line; mean easterly averaged over the area within 300 km around the typhoon center (solid dots; 3 km height; hollow dots; 8 km height)

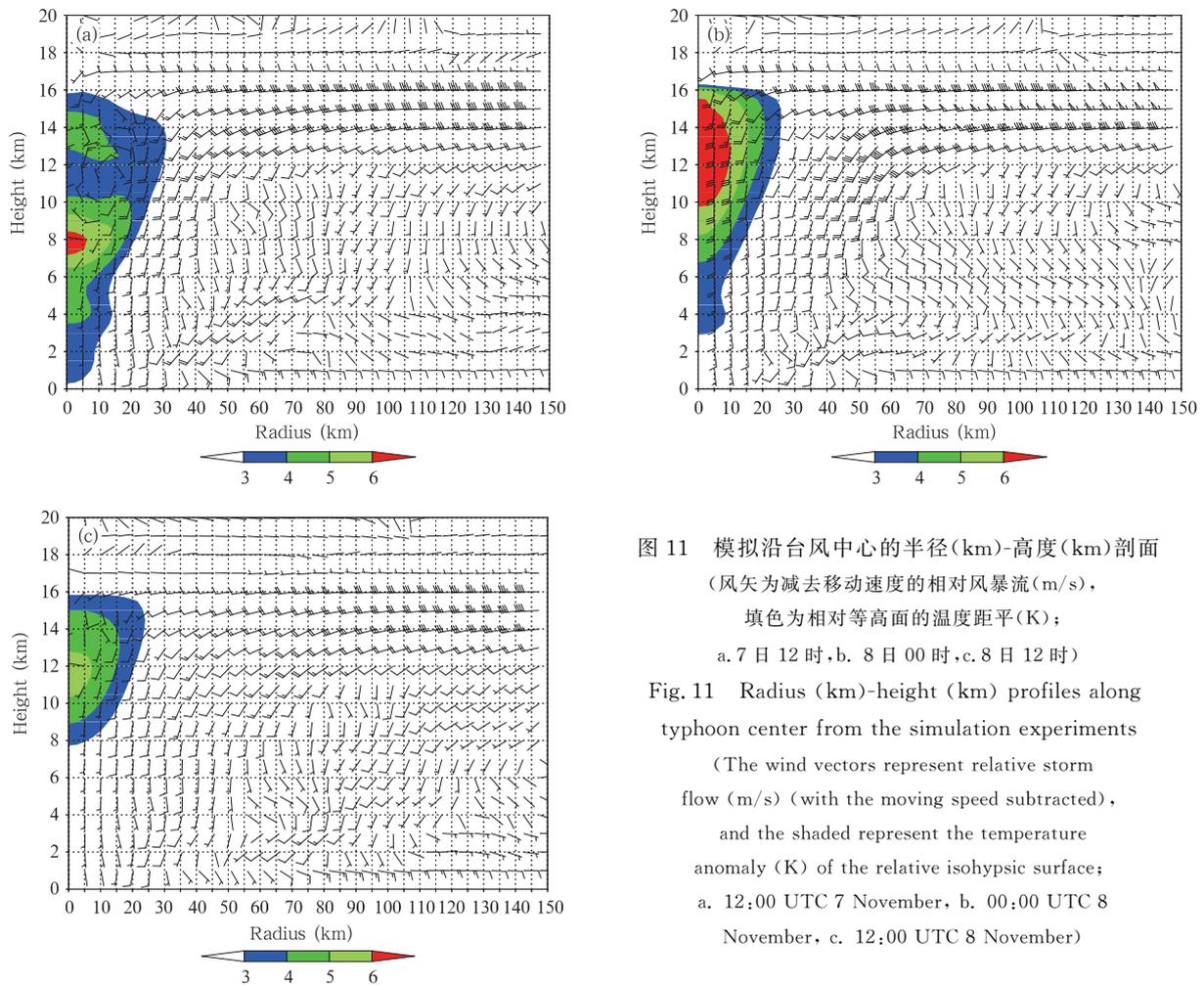


图 11 模拟沿台风中心的半径(km)-高度(km)剖面  
(风矢为减去移动速度的相对风暴流(m/s),  
填色为相对等高面的温度距平(K);  
a. 7 日 12 时, b. 8 日 00 时, c. 8 日 12 时)

Fig. 11 Radius (km)-height (km) profiles along typhoon center from the simulation experiments  
(The wind vectors represent relative storm flow (m/s) (with the moving speed subtracted), and the shaded represent the temperature anomaly (K) of the relative isohypsic surface;  
a. 12:00 UTC 7 November, b. 00:00 UTC 8 November, c. 12:00 UTC 8 November)

分析模拟结果,从图 11 可看到,7 日 12 时(图 11a),“海燕”在 8 和 14 km 高度各有一暖中心,分析风暴相对流可见,低层流入,高层流出非常明显。台风最强时刻 8 日 00 时(图 11b),台风暖心集中在较高层次(10—16 km),且暖心最强,暖心与辐散流出层高度大致相同。台风减弱时段 8 日 12 时(图 11c),暖心明显减弱,辐散流出也明显减弱。很明显可以看到,7 日 12 时至 8 日 00 时,高层流出和台风暖心处于最强盛阶段,这可能与“海燕”超强发展有密切关系。8 日 00 时后高层流出和暖心趋于减弱,台风进入了快速减弱时段。

从图 12 中可以明显看出,“海燕”快速加强,与高层暖心形成有非常密切的关系,7 日 20 时,高层暖心达到最强盛,暖心位于 12 km 左右的高度上。温度偏差大于 10 K。高层暖心的形成,促使台风中心气压下降,强度迅速增强。Chen 等(2013)、Zhang 等(2012)在分析 2005 年“Wilma”飓

风快速增强原因时,曾详细说明了高层暖心的形成及其重要作用,指出高层暖心与平流层的下沉气流有关,风暴快速加强,高层暖心比低层的暖柱更为重要。7 日 04—10 时,暖心高度大致在 6—8 km,台风逐渐增强,而到台风最强盛时段,暖心迅速升高到 12—14 km,此时“海燕”的高层暖心比中低层要明显得多。“海燕”穿过菲律宾后仍然保持台风级别的强度,与高层暖心存在也有很大的关系。Zhang 等(2012)在“Wilma”飓风的等熵面分析中,说明平流层空气下沉对暖心形成有重要作用。从图 12 可以看到,“海燕”台风在 16 km 高度之上的位温等值线非常密集,位温垂直梯度相当大,台风快速增强时,等值线急剧下降,说明存在大量平流层较暖的空气穿过对流层顶汇聚台风高层暖心区,这可能是“海燕”的高层暖心形成和“海燕”超强发展的重要原因。

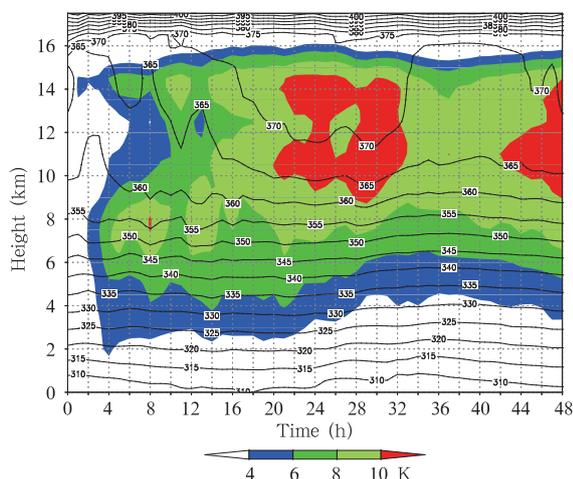


图 12 模拟的温度变化、位温的时间-高度剖面 (位温等值线间隔为 5 K, 填色为台风中心的温度变化, 是相对于初始时区域(700 km $\times$ 700 km)温度平均的偏差值)  
Fig. 12 Time series of the simulated temperature and the time-height profile of potential temperature (The potential temperature line is plotted at every 5 K, and the filled colors represent the variation of central temperature of the typhoon, which is the deviation from the mean temperature at the initial time averaged over within the area of 700 km $\times$ 700 km)

## 5 讨论与结论

超强台风“海燕”快速西移,穿过菲律宾后进入中国南海,然后再次在越南北部沿海登陆,后期路径北翘东折。“海燕”移速快,在经过菲律宾时移速达 35—40 km/h,南海台风模式模拟的移动速度与之非常接近。

台风“海燕”与 2010 年台风“鲇鱼”有许多相似之处,都是台风季节后期进入中国南海的超强台风,很值得研究。在“海燕”的数值模拟中看到,暖洋面、高层暖心、高中低层一致强劲的东风气流导致剧烈的水平气旋性环流,这些可能是“海燕”超强发展和快速西移的主要原因。

数值模式对“海燕”路径的预报主要问题是前期移动偏慢,而后期对“海燕”的北翘预报估计不足。模式也没能预报出“海燕”超强发展,这些都是今后改进超强台风数值预报精度的重点课题。通过高分辨率数值试验,以及参考相关研究成果,认为平流层暖空气下沉及高层暖心形成可能是促使“海燕”超强发展的重要原因,而这些正是目前台风模式较少关注之处,进一步开展这些方面研究,可以为改进超强

台风的预报提供重要的参考。

本研究探讨影响模式预报的几项技术是 2013 年南海台风模式新引入的方案。这些改进方案在历史回算中效果是明显的,但是对于“海燕”台风并不是都有效。试验表明边界层方案对流速算法改进、积云对流与微物理耦合、地形重力波拖曳和模式初始大气低层温度扰动算法改进等有效地提高了模式预报精度。另外,在高分辨率模式预报试验中也发现,提高模式分辨率对于台风短时预报(主要指 0—36 h 预报)有明显正效果。

## 参考文献

- 陈德辉. 1995. 热带气旋数值预报新进展. 气象科技, 22(3): 7-12
- 陈德辉, 王诗文, 汪厚君. 1996. 改进的物理过程参数化对台风路径数值预报的影响. 应用气象学报, 7(1): 1-8
- 戴光丰, 陈子通. 2013. GRAPES 模式中地面通量在一次台风数值预报模拟中的敏感性试验研究. 热带气象学报, 29(3): 403-410
- 何斌. 2006. WRF 参数对台风“麦莎”数值模拟的敏感性研究 // 中国气象学会 2006 年年会“中尺度天气动力学、数值模拟和预测”分会场论文集, 283-289
- 河慧卿, 王振会, 金正润等. 2009. 积云参数化和微物理方案不同组合应用对台风路径模拟效果的影响. 热带气象学报, 25(4): 435-441
- 雷小途, 殷鹤宝. 1996. 正规模初始化及其在东海台风模式中的实验 // 台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究. 北京: 气象出版社, 59-66
- 马玉芬, 沈桐立, 丁治英等. 2009. 台风“桑美”的数值模拟和地形敏感性试验. 南京气象学院学报, 32(2): 277-286
- 倪允琪, 金汉良, 薛宗元. 1981. 西太平洋台风路径业务数值预告模式及其初步使用结果. 大气科学, 5(3): 281-291
- 施丽娟, 许小峰, 李柏等. 2009. 雷达资料在登陆台风“桑美”数值模拟中的应用. 应用气象学报, 20(3): 257-266
- 王康玲, 薛纪善, 梁炎钊. 1986. 热带有限区分裂半隐式斜压初始方程预报模式. 气象学报, 44(4): 385-394
- 王康玲, 何安国, 薛纪善. 1996. 南海区域台风路径数值预报业务模式的研究. 热带气象学报, 12(2): 113-121
- 王诗文, 李建军. 1994. 台风路径实时数值预报的初步试验. 应用气象学报, 5(4): 462-469
- 许映龙, 张玲, 高拴柱. 2010. 我国台风预报业务的现状及思考. 气象, 36(7): 43-49
- 薛纪善, 王康玲, 何安国. 1996. 热带有限区数值预报模式的升级及在台风预报中的应用. 热带气象学报, 12(2): 97-104
- 于玉斌, 段海霞, 炎利军等. 2008. 超强台风桑美(2006)近海急剧增强过程数值模拟试验. 大气科学, 32(6): 1365-1378
- 张进, 麻素红, 瞿安祥. 2007. 0608 号桑美台风数值模拟结果初步分析 // 第二届热带气旋国际学术研讨会文集
- 钟水新, 陈子通, 戴光丰等. 2014. 地形重力波拖曳参数化对热带

- 气旋强度和路径预报影响的研究. *大气科学*, 38(2): 273-284
- 朱永提, 徐一鸣, 胡富泉等. 1982. 台风路径预报套网格模式的试验. *气象学报*, 40(3): 257-270
- Beljaars A. 1994. The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free-convection. *Quart J Roy Meteor Soc*, 121(522): 255-270
- Chen H, Zhang D L, Carton J, et al. 2011. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part I: Model prediction and structural changes. *Wea Forecasting*, 26(6): 885-901
- Chen H, Zhang D L. 2013. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part II: Convective bursts and the upper-level warm core. *J Atmos Sci*, 70(1): 146-172
- Han J L, Pan H L. 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system. *Wea Forecasting*, 26(4): 520-533
- Kaplan J, DeMaria M. 2003. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. *Wea Forecasting*, 18(6): 1093-1108
- Kasahara A. 1957. The numerical prediction of hurricane movement with the barotropic model. *J Meteor*, 14(5): 386-402
- Kim Y J, Arakawa A. 1995. Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model. *J Atmos Sci*, 52(11): 1875-1902
- Pan H L, Wu W S. 1995. Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC medium range forecast model. NMC office Note 409, 40
- Pun I F, Lin I I, Lo M H. 2013. Recent increase in high tropical cyclone heat potential area in the Western North Pacific Ocean. *Geophys Res Lett*, 40(17): 4680-4684
- Rogers R. 2010. Convective-scale structure and evolution during a high-resolution simulation of tropical cyclone rapid intensification. *J Atmos Sci*, 67(1): 44-70
- Xue J S, Wang K L, Wang Z M, et al. 1988. Test of a tropical limited area numerical prediction model including effect of real topography. *Adv Atmos Sci*, 5(1): 1-23
- Zhang D L, Chen H. 2012. Importance of the upper-level warm core in the rapid intensification of a tropical cyclone. *Geophys Res Lett*, 39(2), L02806, doi:10.1029/2011GL050578