

麻素红,沈学顺,龚建东,等,2021. 国家气象中心台风数值预报系统的发展[J]. 气象,47(6):685-692. Ma S H, Shen X S, Gong J D, et al, 2021. Development of typhoon numerical prediction system in national meteorological centre[J]. Meteor Mon, 47(6): 685-692(in Chinese).

## 国家气象中心台风数值预报系统的发展\*

麻素红<sup>1,2</sup> 沈学顺<sup>1,2</sup> 龚建东<sup>1,2</sup> 王建捷<sup>1,2</sup> 陈德辉<sup>1,2</sup> 李泽椿<sup>2</sup>

1 中国气象局数值预报中心,北京 100081

2 国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 回顾了自“八五”科技攻关以来国家气象中心台风数值预报业务系统的发展历程,包括我国第一代区域模式台风数值预报系统、全球谱模式台风数值预报系统以及中国气象局自主发展的 GRAPES 全球模式及区域台风数值预报系统。比较不同时期台风数值预报系统的关键技术特征和预报性能,重点介绍 GRAPES 区域台风模式的主要技术成果,并对国家级台风数值预报系统未来 5 年的发展进行展望。

**关键词:** 台风数值预报,涡旋初始化,GRAPES\_TYM,预报性能

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.004

## Development of Typhoon Numerical Prediction System in National Meteorological Centre

MA Suhong<sup>1,2</sup> SHEN Xueshun<sup>1,2</sup> GONG Jiandong<sup>1,2</sup>

WANG Jianjie<sup>1,2</sup> CHEN Dehui<sup>1,2</sup> LI Zechun<sup>2</sup>

1 CMA Numerical Weather Prediction Centre, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** This article reviews the three-decade development of the typhoon numerical forecast operational system in the National Meteorological Centre (NMC) of China Meteorological Administration since the beginning of the Eighth Five-Year Plan, including its first-generation typhoon track numerical prediction system using regional model, a typhoon track numerical prediction system developed on the basis of the global spectral model, and the global and regional tropical cyclone (TC) forecast system independently developed by the China Meteorological Administration. It summarizes the key technologies and forecast performance of these systems, with a focus on the main technical achievements of GRAPES\_TYM. It also puts forward some views on the development of the national typhoon numerical prediction system in the next five years.

**Key words:** typhoon numerical forecast, vortex initialization, GRAPES\_TYM, forecast performance

### 引 言

台风是影响我国最严重的自然灾害之一,对我

国国民经济和人民生命财产造成严重威胁(陈联寿等,2012)。精确的台风预报是台风防灾减灾精准施策的基本保证,而提高台风路径及风雨预报的准确性必须依赖数值预报这一关键支撑(李泽椿等,2020)。

\* 国家重点研发计划(2017YFC15011904、2018YFC1506406)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406006)和中国气象局 GRAPES 发展专项共同资助

2020 年 10 月 9 日收稿; 2021 年 5 月 18 日收修定稿

第一作者:麻素红,主要从事台风数值预报技术研究. E-mail:mash@cma.gov.cn

我国台风数值预报系统的研发始于 20 世纪 80 年代末。在“八五”国家科技攻关项目“台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究”的支持下,国家气象中心在区域模式 HLAFS(High Resolution Limited Area Forecast System;郭肖容等,1995)的基础上,通过物理过程优化和涡旋初始化技术的应用,建立了我国第一代国家级区域模式台风数值预报系统 MTTP(Model for Tropical Cyclone Track Prediction;王诗文和李健军,1994;王诗文,1999;陈德辉等,1996),并于 1996 年实况业务运行,对台风路径进行 48 h 预报。

全球模式分辨率的提高、物理过程的改进以及资料同化技术的进步(麻素红等,2003;陈起英等,2004)使得基于全球模式开展台风路径预报成为可能。通过涡旋初始化技术的应用,国家气象中心在全球模式 T213L31(简称 T213)的基础上研发了全球模式台风路径数值预报系统,并于 2004 年准业务运行,提供 96 h 台风路径预报。为了避免涡旋初始化对全球模式中期预报的影响,T213 台风数值预报系统和 T213 中期数值预报系统作为两套系统独立存在,只在西北太平洋有台风编号时才运行。2005 年该系统预报时效进一步延长到 120 h,并于 2006 年正式投入业务。T213 水平分辨率约为  $0.5625^\circ$ ,非常接近 MTTP 的分辨率( $0.46875^\circ$ ),且其台风路径的预报误差已小于 MTTP(见第二节、第三节)。因此,T213 台风数值预报系统业务运行后替代了 MTTP(Ma et al,2007)。

为了实现了全球模式集约化发展,2014 年,基于全球模式 T639L60(简称 T639)建立了一体化运行的中期天气数值预报和台风数值预报业务系统(麻素红等,2012;瞿安祥等,2016)。自此之后,全球模式台风数值预报作为全球模式预报功能的一部分完全融入全球中期数值预报系统,不再独立存在。

2015 年,我国自主研发的全球模式数值预报系统 GRAPES-GFS 通过业务化运行。2018 年,涡旋初始化技术的应用,使得 GRAPES-GFS 具备了对西北太平洋以及南海台风的预报能力,一体化 GRAPES-GFS 中期/台风预报系统替代了 T639 业务系统的全部功能。

此外,根据台风精细化预报和台风强度预报的需求,2012 年国家气象中心在 GRAPES 中尺度模式的基础上(陈德辉和沈学顺,2006),通过模式动力框架和物理过程的改进以及涡旋初始化技术的应

用,建立了我国第一代以台风强度为主要预报目标的区域模式台风数值预报系统 GRAPES\_TYM 并持续改进发展(张进等,2017;麻素红等,2018;2021)。

目前,国家气象中心已经建立了较为完备的台风数值预报体系,并实现了关键技术的自主可控。图 1 为简要的发展历程。本文将对国家级台风数值预报系统发展以来不同时期的关键技术特征和预报性能进行对比,并展望国家级台风数值预报系统未来 5 年的发展。

## 1 我国第一代区域模式台风数值预报系统 MTTP

MTTP 采用  $\sigma$  垂直坐标,水平方向采用 Araka-wa-C 网格。其初始场及侧边界来源于国家气象中心全球模式 T106L19(简称 T106)。采用双重嵌套网格,外围粗网格分辨率为  $0.9375^\circ$ 、内部细网格分辨率为  $0.46875^\circ$ ,垂直方向为 15 层(王诗文和李健军,1994)。细网格采用初始网格移动技术,即每次预报开始,细网格的区域中心都将放在台风中心位置上,以保证其在积分过程中较少地受到边界的影响(王诗文,1999)。MTTP 在有台风编号的时候一天运行 2 次,提供 48 h 路径预报。

为了提高模式初始场对台风环流的描述精度,MTTP 采用了人造涡旋初始化技术(王诗文和李健军,1994)。该技术主要包括 7 个方面:(1)模型台风的环境场;(2)模型台风的场面气压;(3)模型台风上部的反气旋;(4)模型台风的暖心结构;(5)模型台风的流场;(6)模型台风的初始位移;(7)模型台风和环境场的融合。图 2 为 1996—2003 年 MTTP 24 h 台风路径预报的误差。

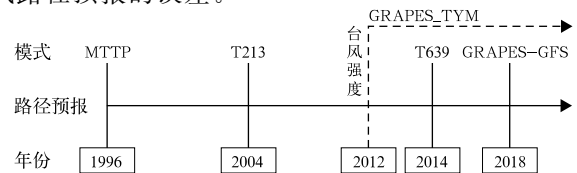


图 1 国家气象中心台风数值预报系统演变  
(实线:路径预报,虚线:强度预报)

Fig. 1 Development process of the TC numerical prediction systems in National Meteorological Centre  
(solid line: typhoon track prediction, dashed line: typhoon intensity prediction)

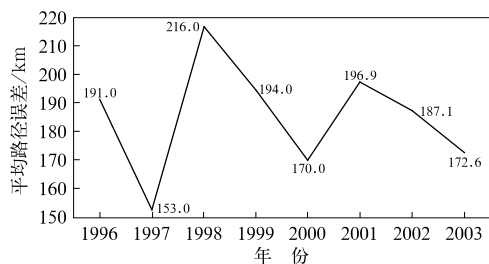


图 2 1996—2003 年 MTTP 24 h 平均路径误差

Fig. 2 The 24 h mean track error of MTTP during 1996—2003

从 1996 年到 2001 年,MTTP 经历了扩大预报区域、细网格初始移动、两次嵌入模型台风等改进(李建军等,1994;王诗文,1999)。2002 年经过模式并行化和优化,MTTP 移植到国产巨型计算机“神威”上(麻素红等,2004),并于同年 6 月实时运行,2003 年 9 月通过准业务验收,其嵌套模式也由 T106 升级为 T213。

## 2 全球模式台风数值预报系统

国家气象中心的全球模式台风路径数值预报系统经历了从第一代 T213 台风数值预报系统到一体化运行的 T639 中期/台风数值预报系统再到 GRAPES-GFS 中期/台风数值预报系统的发展过程。

由于台风发生、发展的洋面上常规观测资料稀少,受全球模式分辨率、卫星资料同化技术的限制,全球模式分析场对台风环流的描述精度不高,涡旋初始化技术是改进其描述精度的关键技术。本节将重点介绍系统在不同发展阶段的模式、同化系统、涡旋初始化等技术特征。

### 2.1 T213 全球模式台风数值预报系统

T213 为谱模式,水平分辨率约为 60 km。垂直方向采用  $\eta$  坐标,垂直分辨率为 31 层,采用最优插值(optimal interpolation, OI)资料同化技术。为了改进模式台风路径预报能力,2004 年, T213 台风数值预报系统准业务运行,采用了非对称台风涡旋初始化方案(Ma et al, 2007)。2007 年,瞿安祥等(2009b)设计开发了三步式涡旋初始化方案投入业务应用, T213 台风路径预报误差显著减小(瞿安祥等,2009a)。

#### (1) 非对称台风涡旋初始化

非对称台风涡旋初始化方案的对称涡旋部分构造方法同 MTTP 所用方案相同,非对称部分则来源于去掉对称涡旋后的全球模式背景场。试验结果显示:同 MTTP 相比, T213 台风数值预报系统的 24 h 及 48 h 平均路径误差均有明显减小。

#### (2) 三步式涡旋初始化

T213 采用了先进的 SSI(spectral statistic interpolation)资料同化技术和物理过程,已经对大部分台风具有分析能力(即分析场中存在台风涡旋;麻素红等,2007)。为了保留背景场中台风涡旋的信息,使构造的涡旋同背景场更协调,国家气象中心发展了新的涡旋初始化方案来代替非对称台风涡旋模型。

新方案包括三个部分:①初始涡旋生成;②涡旋分离及重定位;③涡旋强度调整。同单纯的人造涡旋相比,新方案更多利用模式循环同化预报过程产生的涡旋,在很大程度上减少了人为主观因素对台风三维结构的影响。这样的初始涡旋不但与周围环流形势比较协调,而且涡旋自身的各种物理量在动力属性上也更为平衡,降低了模式积分初期的 spin-up 现象。

### 2.2 一体化中期/台风数值预报系统

#### (1) T639 台风数值预报系统

为满足日益增加的精细化预报需求,国家气象中心全球模式于 2006 年升级为 T639(陈起英等,2007)。T639 水平分辨率为 30 km,垂直方向为 60 层,采用 GSI(grid statistic interpolation)变分同化技术。随着模式分辨率的升高,基于全球模式的台风数值预报系统单独运行不但会增加对计算机资源的消耗,造成计算资源紧张,也会增加业务系统维护人员的负担。为此,需要发展一体化运行的全球模式中期/台风数值预报系统。

全球模式台风数值预报系统同全球模式中期预报系统一体化运行的关键是减小涡旋初始化方案的应用对中期预报的负面影响。为此,基于 T639 变分同化系统开发了 BDA(bogus data assimilation)涡旋初始化方案(瞿安祥等,2016)。该方案与 T213 台风涡旋初始化方案的主要区别是 BDA 涡旋初始化方案利用资料同化技术通过同化台风环流区域的人造资料来形成初始涡旋,与周围环境场更协调,与模式的动力学、物理学属性也更加匹配。

一体化 T639 中期/台风数值预报系统于 2014 年投入业务运行,一天运行 4 次,提供 120 h 台风路

径预报产品。

## (2) GRAPRS-GFS 台风数值预报系统

为了提高 GRAPES-GFS 对西北太平洋台风的预报能力,基于 GRAPES-4DVar 变分同化系统(Zhang et al, 2019)对 BDA 涡旋初始化方案进行了优化并于 2018 年投入业务应用。2019 年 GRAPES-GFS 垂直分变率由原来的 60 层提高到 87 层,等温参考大气廓线升级为三维参考大气廓线并引入预估修正技术以提高模式预报精度。新系统能够在绝大多数情况

下维持台风涡旋环流结构,不再需要同化 bogus 资料。为此,设计了一个同化国家气象中心台风预警部门发布的台风中心定位轨迹及气压强度演变信息的台风初始化方案并于 2020 年投入业务应用,新方案显著减小了 GRAPES-GFS 台风路径及强度预报误差。

全球模式台风数值预报系统发展各阶段的关键技术特征如表 1 所示。

表 1 全球模式台风数值预报系统技术特征

Table 1 Main techniques of global model for typhoon numerical prediction

年份	模式	分辨率	同化	涡旋初始化	运行方式
2004	T213	60 km/L31	OI	非对称涡旋初始化	独立运行
2006			SSI		
2014	T639	30 km/L60	GSI	BDA	一体化运行
2019	GRAPES-GFS	25 km/L87	4DVar	台风中心定位轨迹及强度演变数据信息同化	一体化运行

## 2.3 全球模式台风路径误差演变

从 T213 全球模式台风数值预报系统到我国自主研发的全球模式 GRAPES-GFS, 24 h 台风路径预报误差不断减小(图 3)。经过 17 年的发展,全球模式 24 h 台风路径预报误差从 2004 年的 150 km 减小到 2020 年的 93 km,减小幅度为 38.0%。

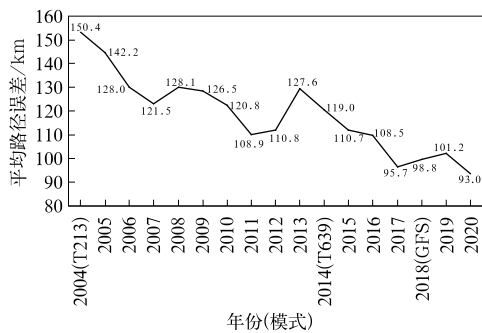


图 3 2004—2020 年国家气象中心全球模式 24 h 台风路径预报误差

Fig. 3 The 24 h mean track error of global model of National

Meteorological Centre during 2004—2020

## 3 新一代区域台风预报系统 GRAPES\_TYM

GRAPES\_TYM 和 GRAPES 中尺度模式具有相同的动力框架:垂直方向采用高度地形追随坐标、预报要素采用 Charney-Phillips 分布;水平方向采用

等经纬度坐标、Arakawa-C 网格。相比于 GRAPES 区域模式,该系统的主要改进包括:通过引入 PRM 水汽平流方案(沈学顺等, 2011;王明欢等, 2011)解决模式预报的台风不发展问题;针对台风路径及强度预报对模式边界层参数化、对流参数化进行了优化改进;开发了适合台风强度预报的涡旋初始化方案。2012 年,GRAPES\_TYM 投入准业务运行,在台风编报时一天运行 4 次。

2012—2019 年,国家气象中心对 GRAPES\_TYM 进行了持续改进,并分别于 2014、2015、2017、2018 和 2019 年进行了业务升级(张进等, 2017;麻素红等, 2018; 2021)。表 2 为 2012—2019 年间 GRAPES\_TYM 系统升级的主要参数变化。

目前 GRAPES\_TYM 的水平分辨率为  $0.09^\circ$ ,垂直方向为 68 层。物理过程包括:WSM6 微物理过程、Meso-SAS 对流参数化、YSU 边界层过程、NOAH 陆面过程、MO 相似理论表面层参数化以及 Goddard 短波辐射和 RRTM 长波辐射。预报区域覆盖西北太平洋、南中国海和北印度洋,预报时效为 120 h。

GRAPES\_TYM 除了提供台风数值预报产品外,还通过能见度诊断提供海雾预报产品,同时为海浪模式、风暴潮模式提供大气驱动场。

### 3.1 涡旋初始化

GRAPES\_TYM 采用的涡旋初始化方案包括涡旋重定位和涡旋强度调整。涡旋重定位采用的是 Kurihara et al (1995)的方案,即:将全球模式分析

场的热带气旋分离为环境场和台风环流场。涡旋强度调整则采用了 Wang(1995)的方案。该方案通过对环境场中台风环流对称风场的调整来实现对环境场中台风强度调整,使调整后的强度接近预报员的

综合分析(Wang and Ma, 2020)。为了减小强度调整对环境场的影响,改善 24~48 h 路径预报能力,2017 年取消了对台风涡旋的重新定位、减小了强度调整尺度(麻素红等,2018)。

表 2 2012—2019 年 GRAPES\_TYM 业务升级的主要参数变化

Table 2 Operational upgrades of GRAPES\_TYM from 2012 to 2019

年份	2012—2013	2014	2015—2016	2017	2018	2019—2020
预报范围	0°~51°N、 90°~171°E	0°~51°N、 90°~171°E	0°~51°N、 90°~171°E	0°~50.94°N、 90°~171°E	0°~50.94°N、 90°~171°E	15°S~60°N、 40°~180°E
水平分辨率	0.15°	0.15°	0.12°	0.12°	0.12°	0.09°
垂直分辨率/层	32	32	50	50	50	68
预报时效/h	72	120	120	120	120	120
参考大气廓线	等温大气	等温大气	等温大气	一维参考大气	一维参考大气	一维参考大气
对流参数化	SAS	MesoSAS	MesoSAS	MesoSAS	KFeta	MesoSAS
边界层参数化	YSU	YSU	YSU	YSU	MRF	YSU
近地面层	MO sfc	MO sfc	MO sfc ( <i>Znt modified</i> )	MO sfc	MO sfc	MO sfc
陆面过程	SLAB	SLAB	SLAB	SLAB	NOAH	NOAH
涡旋初始化	Relocation+bogus	Relocation+bogus	Relocation+bogus	Bogus-modified	bogus	bogus

注:表中斜体字为每次升级的关键技术。

Note: Italics indicate the key technologies for each upgrade.

### 3.2 模式动力框架改进

#### (1) PRM 水汽平流方案应用

在 GRAPES\_TYM 发展初期,其水汽平流方案采用了 QMSL (quasi-monotone semi-Lagrange)。该方案对风速高梯度区域如台风环流区域的计算精度偏低,易导致模式预报的台风不发展。为此引入了高精度 PRM (piecewise rational method) 水汽平流方案(沈学顺等,2011;王明欢等,2011),解决了区域模式台风强度预报不发展问题。

#### (2) 模式参考大气廓线改进

为了提高模式的预报精度和稳定性,数值预报模式的设计过程常常引入“参考大气”的概念,将温度场或气压场分解为平均量和扰动量。参考大气廓线越接近实际大气,产生的扰动量越小,模式的计算精度就越高。

2017 年利用模式初始场水平平均构建的一维参考大气廓线(麻素红等,2018)替代了业务系统的等温大气参考廓线。

### 3.3 物理过程改进

2012 年,GRAPES\_TYM 的对流参数化方案为 SAS (simplified Arakawa-Schubert),此方案存在过多消除层积云、不能有效消除积云内不稳定能量、没有考虑对流加热对动量的反馈等问题。为此将对流参数化方案更新为 Meso-SAS 并进行本地化(张进等,2017)。跟原方案相比,Meso-SAS 方案中浅

对流采用总体质量通量参数化替换原方案中的湍流扩散参数化,解决了原方案中过多消除层积云的问题;深对流参数化方面,新方案可以更有效地消除积云内不稳定能量,抑制非真实的格点饱和降水;同时 Meso-SAS 方案还考虑了高分辨率模式(10 km 以下)对流参数化的处理方法。

### 3.4 模式垂直分辨率提升

模式垂直分层的合理加密对热带气旋强度预报至关重要。研究显示对模式中低层加密将有助于产生较强的热带气旋,而对模式高层加密则会产生较弱的热带气旋(Zhang et al, 2015; Zhang et al, 2016; Zhang and Wang, 2003)。GRAPES\_TYM 分别于 2014 年和 2019 年提升了垂直分辨率:2014 年由 32 层增加到 50 层;2019 年由 50 层增加到 68 层,重点对模式边界层内垂直分层进行了加密(麻素红等, 2021)。模式垂直分层加密后,台风强度预报误差显著减小,尤其是强台风和超强台风。

### 3.5 台风路径及强度预报误差演变

通过上述关键技术的改进,GRAPES\_TYM 对台风路径及强度的预报能力持续提升(图 4)。从 2012 年到 2020 年,GRAPES\_TYM 的 24 h 平均路径误差减小了 20.1%,强度预报误差减小了 34.9%。2017 年的平均强度预报误差相比于 2016 年明显减少有两个主要原因:一是 2017 年的业务升级对强度预报改善明显(麻素红等,2018),二是 2017 年的超强台

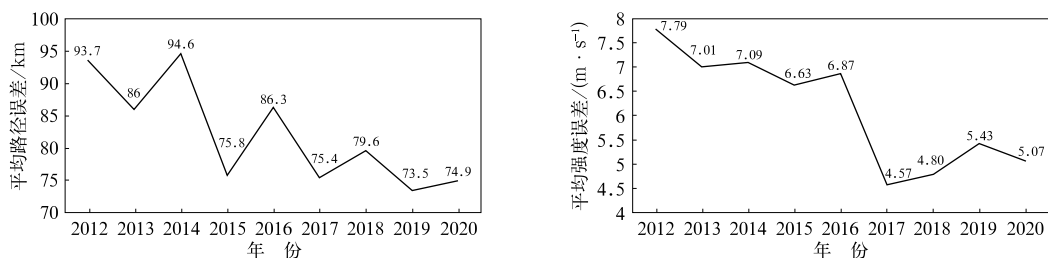


图 4 2012—2020 年 GRAPES\_TYM 24 h 热带气旋路径(a)及强度误差(b)

Fig. 4 The 24 h TC track error (a) and intensity error (b) of GRAPES\_TYM from 2012 to 2020

风数量偏少,而 GRAPES\_TYM 对超强台风的强度预报误差偏大。

#### 4 国家级台风数值预报未来发展

我国对西北太平洋台风路径的综合预报业务能力已经达到了国际先进水平,但展望未来,台风预报业务仍面临诸多挑战。一方面,对移动路径突变的台风路径作出准确预报仍十分困难(董林等,2020;麻素红和陈德辉,2018;郭旭等,2014;许映龙等,2011;2015;许映龙,2011),且台风强度、结构以及登陆台风风雨的精细预报能力改进比较缓慢(李泽椿等,2020;张玲等,2014);另一方面,国家海洋强国战略和“一带一路”倡议的实施等,使得台风/热带气旋预报业务能力需要从西北太平洋拓展至全球。台风数值预报业务系统的发展目标,就是要为台风/热带气旋预报业务提供高精度数值产品支撑。为此,在未来 5 年,需要基于全球模式加快研发各主要海域(西北太平洋、大西洋和北印度洋等)热带气旋数值预报关键技术、提升发展千米尺度高分辨率台风强度和风雨数值模式技术等,才能有效支撑全球海域热带气旋预报能力和近海(或登陆)台风防灾减灾精准施策能力的提升。

##### (1) 全球卫星资料同化和台风内核结构的描述

初始场对台风结构和强度的描述精度是影响台风强度预报的关键因素(麻素红,2019),台风涡旋初始结构和强度的偏差会随模式积分增加,进而影响模式对台风的预报效果。为此,需要加快发展具有“流依赖”特征的混合变分同化技术和有云区域的卫星资料同化技术,实现对台风环流区卫星资料的有效应用,改善模式初始场对台风内核区域结构的描述精度。

##### (2) 千米尺度模式边界层方案和微物理方案

边界层方案和微物理方案是影响台风模式强度

预报的两个重要参数化方案。近年来针对边界层和对流云区水物质的观测研究越来越受到重视。基于观测资料开展高分辨率模式(特别是千米尺度)边界层方案研发、改进微物理方案对水物质分布和相态转化的描述等,将有助于提高模式对台风强度的预报能力。

##### (3) 海气浪耦合模式的发展

海洋是台风发展的能量来源。台风和海洋之间有很重要的反馈机制,海-气-浪耦合模式可以在模式积分过程中即时反映海洋和大气之间的相互作用,是未来台风数值预报系统重要的组成部分。

##### (4) 移动嵌套网格技术

业务预报对台风路径及强度预报的产品时效的需求已经达到 5~7 d,而台风是一个移动的天气系统,覆盖 5~7 d 的预报所要求的预报区域较大。在目前高性能计算资源条件下,开展大范围高分辨率(1~3 km)模式运算无法满足业务预报对时效的要求。为解决这一问题,在现有业务数值预报体系下,应发展移动嵌套网格技术,在台风环流区采用高分辨率配置而其他外围区采用较粗分辨率配置,以实现 1~3 km 高分辨率台风模式的业务运行。

#### 参考文献

- 陈德辉,沈学顺,2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. 应用气象学报,17(6):773-777. Chen D H, Shen X S, 2006. Recent progress on GRAPES research and application[J]. J Appl Meteor Sci,17(6):773-777(in Chinese).
- 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[J]. 应用气象学报,7(1):1-8. Chen D H, Wang S W, Wang H J, 1996. Performance of parameterization of sub-scale physical processes in numerical model and its effects on typhoon track forecastings[J]. J Appl Meteor Sci,7(1):1-8(in Chinese).
- 陈联寿,端义宏,宋丽莉,等,2012. 台风预报及其灾害[M]. 北京:气象出版社:2-3. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al, 2012. Typhoon Forecast and Disaster[M]. Beijing: China Meteorological

- Press:2-3(in Chinese).
- 陈起英,管成功,姚明明,等,2007. 全球中期模式升级关键技术研发和预报试验[J]. 气象学报,65(4):478-492. Chen Q Y, Guan C G, Yao M M, et al, 2007. Development of key techniques and experiments in global model upgrading[J]. Acta Meteor Sin, 65(4):478-492(in Chinese).
- 陈起英,姚明明,王雨,2004. 国家气象中心新一代业务中期预报模式 T213L31 的主要特点[J]. 气象,38(10):16-21. Chen Q Y, Yao M M, Wang Y, 2004. A new generation of operational medium-range weather forecast model T213L31 in National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 38(10):16-21(in Chinese).
- 董林,许映龙,吕心艳,等,2020. 台风纳沙和海棠的预报着眼点分析[J]. 气象,46(1):29-26. Dong L, Xu Y L, Lyu X Y, et al, 2020. Analysis of forecast focuses of binary typhoons Nesat and Haitang[J]. Meteor Mon, 46(1):29-36(in Chinese).
- 郭肖容,张玉玲,阎之辉,等,1995. 有限区分析预报系统及其业务应用[J]. 气象学报,53(3):306-318. Guo X R, Zhang Y L, Yan Z H, et al, 1995. The limited area analysis and forecast system and its operational application[J]. Acta Meteor Sin, 53(3):306-318(in Chinese).
- 郭旭,麻素红,吴俞,等,2014. 基于 TIGGE 资料的台风“鲇鱼”路径北翘成因分析[J]. 热带气象学报,30(1):55-63. Guo X, Ma S H, Wu Y, et al, 2014. An analysis of abrupt northward turning of Typhoon Megi (1013) using TIGGE data[J]. J Trop Meteorol, 30(1):55-63(in Chinese).
- 李建军,陈德辉,王诗文,1994. 台风 Bogus 合成场的质量场调整试验[J]. 中山大学学报:(5):54-60. Li J Z, Chen D H, Wang S W, 1994. Experiment on wind field adjustment of Bogus typhoon composite field[J]. J Sun Yat-Sen Univer, (5):54-60.
- 李泽椿,张玲,钱奇峰,等,2020. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. 大气科学学报,43(1):10-19. Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al, 2020. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Centre[J]. Trans Atmos Sci, 43(1):10-19(in Chinese).
- 麻素红,2019. 涡旋强度调整半径对 2016 年第 18 号热带气旋路径预报的影响[J]. 气象学报,77(4):662-673. Ma S H, 2019. Impact of radius of TC intensity correction on No. 1618 TC track prediction[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):662-673(in Chinese).
- 麻素红,陈德辉,2018. 国家气象中心区域台风模式预报性能分析[J]. 热带气象学报,34(4):451-459. Ma S H, Chen D H, 2018. Performance of regional typhoon model of National Meteorological Centre[J]. J Trop Meteor, 34(4):451-459(in Chinese).
- 麻素红,瞿安祥,张晗,2004. 台风路径数值预报模式的并行化及路径预报误差分析[J]. 应用气象学报,15(3):322-328. Ma S H, Qu A X, Zhang Y, 2004. Optimization and parallel of typhoon track prediction model in NMC and track error analyses[J]. J Appl Meteor Sci, 15(3):322-328(in Chinese).
- 麻素红,万丰,陈德辉,等,2003. 利用 T106L19 进行台风路径预报试验[J]. 热带气象学报,19(3):243-252. Ma S H, Wan F, Chen D H, et al, 2003. Typhoon track prediction experiments using T106L19[J]. J Trop Meteorol, 19(3):243-252(in Chinese).
- 麻素红,王建捷,万丰,2007. 人造台风模型及资料同化对 T213L31 模式台风路径预报能力的影响[J]. 热带气象学报,23(2):141-145. Ma S H, Wang J J, Wan F, 2007. The effects of bogus typhoon and the observation data in the ocean on T213L31's ability of TC track prediction[J]. J Trop Meteor, 23(2):141-145(in Chinese).
- 麻素红,吴俞,瞿安祥,等,2012. T213 与 T639 模式热带气旋预报误差对比[J]. 应用气象学报,23(2):167-173. Ma S H, Wu Y, Qu A X, et al, 2012. Comparative analysis on tropical cyclone numerical forecast errors of T213 and T639 models[J]. J Appl Meteor Sci, 23(2):167-173(in Chinese).
- 麻素红,张进,瞿安祥,等,2021. 垂直分层加密和预报区域扩大对 GRAPES\_TYM 台风预报的影响[J]. 气象学报,79(1):94-103. Ma S H, Zhang J, Qu A X, et al, 2021. Impacts to tropical cyclone prediction of GRAPES\_TYM from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast domain[J]. Acta Meteor Sin, 79(1):94-103(in Chinese).
- 麻素红,张进,沈学顺,等,2018. 2016 年 GRAPES\_TYM 改进及对台风预报影响[J]. 应用气象学报,29(3):257-269. Ma S H, Zhang J, Shen X S, et al, 2018. The upgrade of GRAPE\_TYM in 2016 and its impacts on tropical cyclone prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 29(3):257-269(in Chinese).
- 瞿安祥,麻素红,李娟,2009a. 全球数值模式中的台风初始化 II:业务应用[J]. 气象学报,67(5):727-735. Qu A X, Ma S H, Li J, 2009a. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part II: implementation[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):727-735(in Chinese).
- 瞿安祥,麻素红, Liu Q F, 2009b. 全球数值模式中的台风初始化 I:方案设计[J]. 气象学报,67(5):716-726. Qu A X, Ma S H, Liu Q F, 2009b. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part I: scheme design[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):716-726(in Chinese).
- 瞿安祥,麻素红,张进,2016. T639 全球模式的台风初始化方案升级试验[J]. 气象,42(6):664-673. Qu A X, Ma S H, Zhang J, 2016. Updated experiments of tropical cyclone initialization in global model T639[J]. Meteor Mon, 42(6):664-673(in Chinese).
- 沈学顺,王明欢,肖锋,2011. GRAPES 模式中高精度正定保形物质平流方案的研究 I:理论方案设计与理想试验[J]. 气象学报,69(1):1-15. Shen X S, Wang M H, Xiao F, 2011. A study of the high-order accuracy and positive-definite conformal advection scheme in the GRAPES model I: scientific design and idealized tests[J]. Acta Meteor Sin, 69(1):1-15(in Chinese).
- 王明欢,沈学顺,肖锋,2011. GRAPES 模式中高精度正定保形物质平流方案的研究 II:连续实际预报试验[J]. 气象学报,69(1):16-25. Wang M H, Shen X S, Xiao F, 2011. A study of the high-order accuracy and positive-definite conformal advection scheme in the GRAPES model II: continuous actual rainfall prediction experiments[J]. Acta Meteor Sin, 69(1):16-25(in Chinese).
- 王诗文,1999. 国家气象中心台风数值模式的改进及其应用试验[J]. 应用气象学报,10(3):347-353. Wang S W, 1999. Advances on

- typhoon numerical model of NMC and applied experiments[J]. *J Appl Meteor Sci*, 10(3):347-353(in Chinese).
- 王诗文,李健军,1994.台风路径实时数值预报的初步试验[J]. *应用气象学报*, 5(4):462-469. Wang S W, Li J J, 1994. Experiments of real time numerical weather prediction of typhoon tracks[J]. *J Appl Meteor Sci*, 5(4):462-469(in Chinese).
- 许映龙,2011.超强台风鲑鱼路径北翘预报分析[J]. *气象*, 37(7):821-826. Xu Y L, 2011. Forecast analysis on the abrupt northward recurvature of Super Typhoon Megi(1013)[J]. *Meteor Mon*, 37(7):821-826(in Chinese).
- 许映龙,韩桂荣,麻素红,等,2011.1109号超强台风“梅花”预报误差分析及思考[J]. *气象*, 37(10):1196-1205. Xu Y L, Han G R, Ma S H, et al, 2011. The analysis and discussion on operational forecast errors of Super Typhoon Muifa(1109)[J]. *Meteor Mon*, 37(10):1196-1205(in Chinese).
- 许映龙,吕心艳,张玲,等,2015.1323号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. *气象*, 41(10):1222-1231. Xu Y L, Lv X Y, Zhang L, et al, 2015. Analysis on the characteristics and forecasting difficulty of severe Typhoon Fitow(No. 1323)[J]. *Meteor Mon*, 41(10):1222-1231(in Chinese).
- 张进,麻素红,陈德辉,等,2017. GRAPES\_TYM改进及其在2013年西北太平洋和南海台风预报的表现[J]. *热带气象学报*, 33(1):64-73. Zhang J, Ma S H, Chen D H, et al, 2017. The improvements of GRAPES\_TYM and its performance in Northwest Pacific Ocean and South China Sea in 2013[J]. *J Trop Meteor*, 33(1):64-73(in Chinese).
- 张玲,许映龙,黄奕武,2014.1330号台风海燕强烈发展和快速移动原因分析[J]. *气象*, 40(12):1464-1480. Zhang L, Xu Y L, Huang Y W, 2014. Analysis of the intense development and fastmoving of No. 1330 Typhoon Haiyan[J]. *Meteor Mon*, 40(12):1464-1480(in Chinese).
- Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al, 1995. Improvements in the GFDL hurricane prediction system[J]. *Mon Wea Rev*, 123(9):2791-2801.
- Ma S, Qu A, Wang Y, 2007. The performance of the new tropical cyclone track prediction system of the China National Meteorological Centre[J]. *Meteor Atmos Phys*, 97(1-4):29-39.
- Wang L W, Ma S H, 2020. Effect of initial vortex intensity correction on tropical cyclone intensity prediction: a study based on GRAPES\_TYM[J]. *J Meteor Res*, 34:387-399.
- Wang Y Q, 1995. An inverse balance equation in sigma coordinates for model initialization[J]. *Mon Wea Rev*, 123(2):482-488.
- Zhang B L, Lindzen R S, Tallapragada V, et al, 2016. Increasing vertical resolution in US models to improve track forecasts of Hurricane Joaquin with HWRF as an example[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113(42):11765-11769.
- Zhang D L, Wang X, 2003. Dependence of hurricane intensity and structures on vertical resolution and time-step size[J]. *Adv Atmos Sci*, 20(5):711-725.
- Zhang D L, Zhu L, Zhang X J, et al, 2015. Sensitivity of idealized hurricane intensity and structures under varying background flows and initial vortex intensities to different vertical resolutions in HWRF[J]. *Mon Wea Rev*, 143(3):914-932.
- Zhang L, Liu Y Z, Liu Y, et al, 2019. The operational global four-dimensional variational data assimilation system at the China Meteorological Administration[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(722):1882-1896.