

灾害性天气预报示范计划技术进展

王毅¹, 周庆亮¹, 佟华¹, 咸迪², 许万智³, 任璐¹, 唐文苑¹

1. 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

2. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

3. 中国气象局国际合作司, 北京 100081

摘要 在全球气候变化背景下, 灾害性天气越来越危及世界各国尤其是发展中国家的可持续发展, 准确和可靠的气象预报和预警信息至关重要。介绍了世界气象组织灾害性天气预报示范计划从最初的概念到各区域子计划的发展现状, 分别从全球确定性数值模式、区域数值模式、集合预报系统和气象卫星资料应用回顾了灾害性天气预报技术的进展, 以及国内外主要气象中心各数值模式和业务系统的基本特征, 并分析了目前灾害性天气预报示范计划发展面临的挑战。结合全球气象发展战略和技术趋势, 展望了该计划及数值模式技术应用的未来发展。

关键词 灾害性天气; 数值模式; 世界气象组织

灾害性天气是指可能对社会经济、人民生命及财产造成损失的危险性天气或气象水文现象^[1]。在全球气候变化背景下, 暴雨、大风、龙卷、山洪、极端高(低)温等灾害性天气越来越危及世界各国尤其是发展中国家的可持续发展。研究表明, 灾害性天气、气候灾害造成人口损失较多的多为发展中国家^[2]。准确和可靠的天气、气候、水和环境信息不仅对于抵御灾害性天气具有关键作用, 也对保障日常社会经济活动的高效和安全具有重要意义。

2006年, 世界气象组织(World Meteorological

Organization, WMO) 针对南部非洲推出了“灾害性天气预报示范计划”(severe weather forecasting demonstration Project, SWFDP), 旨在帮助该区域相关国家气象水文部门提升灾害性天气预报的能力, 延长预警时效, 加强数值预报产品在灾害性天气预报中的应用。这一示范计划的成功实施促使世界气象组织将灾害性天气预报示范计划逐步推广到全球更多的地区, 目前已开展了8个灾害性天气预报示范计划子区域项目, 参与的国家地区近80个。另一方面, 作为世界气象组织的核心计划——

收稿日期: 2020-03-21; 修回日期: 2020-07-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41975100); 国家重点研发计划项目(2017YFC1502004); 中国气象局全球预报业务能力建设项目

作者简介: 王毅, 博士, 研究方向为集合预报和全球灾害性天气预报技术, 电子信箱: yiwang@ema.gov.cn

引用格式: 王毅, 周庆亮, 佟华, 等. 灾害性天气预报示范计划技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 86-96; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.20.014

世界天气监视网(world weather watch, WWW)之一的全球数据处理和预报系统(global data-processing and forecasting system, GDPFS),已成为在不同层面、各个专业领域向世界气象组织成员提供天气、气候、水、环境等分析和预报产品的关键业务系统^[3]。依靠全球、区域业务数值预报模式的快速发展以及业务集合预报系统的应用,各个时间尺度上的天气(包括极端天气)预报能力在近几年都得到了增强。为了缩小发展中国家在预报预警技术上同先进气象业务中心的能力差距,灾害性天气预报示范计划通过全球数据处理和预报系统的三级级联业务体系,利用先进气象业务中心的数值预报模式产品来提升国家气象水文部门特别是发展中国家(包含最不发达国家和小岛屿发展中国家)气象水文部门的业务能力,及时发布灾害性天气的权威预报和早期预警信息,以减轻灾害风险及损失^[4]。

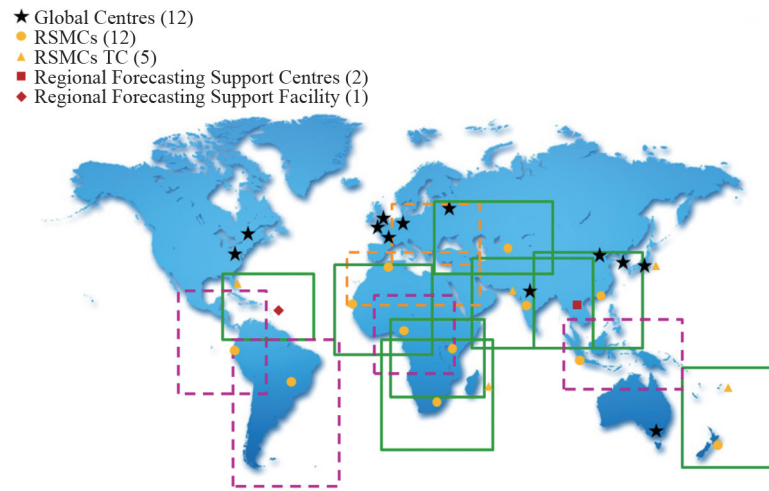
灾害性天气预报示范计划实施 10 多年来所发挥的积极作用和收益有目共睹,不仅提升了参与国家特别是发展中国家灾害性天气的预报能力,延长了预警时效,减少了灾害和损失,也为联合国《2030 年可持续发展议程》和《仙台减轻灾害风险框架》做出了积极贡献。当前社会全球化、信息化和网络化加速发展,正在给世界气象组织及其会员国带来全新的挑战和机遇。同时,气象领域的研究越来越倾向于将地球系统作为一个整体来考虑^[5-6],基于影响的预报和基于风险的预警渐成趋势^[7],大数据、人工智能等科技影响着传统资料和服务提供的格局。这些新变化都驱动着灾害性天气预报示范计划需要适应时代发展的要求和自身可持续发展不断演进。中国气象局自 2010 年起至今已参与了 3 个灾害性天气预报示范区域子计划,并建成了以自主研发的全球区域一体化同化预报系统(global/regional assimilation and prediction system, GRAPES)为核心的数值天气预报体系^[8]。目前,国内关于灾害性极端天气预报预警模式进展方面的研究主要集中于某一类模式^[9-10],缺少对国内外各类模式及相关技术进展的综合性研究。为此,本文对灾害性天气预报示范计划的发展特别是其技术

进展进行综述,并展望灾害性天气预报示范计划的发展趋势。

1 灾害性天气预报示范计划发展概述

2006 年,世界气象组织针对南部非洲开启了首个灾害性天气预报示范区域子计划,有 5 个东南部非洲国家参与,2009 年参加的非洲国家达到 16 个。经过十几年的发展,目前灾害性天气预报示范计划已扩展至全球 8 个区域,覆盖了近 80 个国家或地区,其中包括约 45 个最不发达国家和小岛屿发展中国家。未来 5 年,灾害性天气预报示范计划将再增加 5 个区域子项目,涉及的国家总数将超过 100 个。图 1 给出了灾害性天气预报示范区域子计划的地理分布图,可以看出灾害性天气预报示范区域子计划主要集中在非洲和亚洲,这两大洲也是气象灾害脆弱性较高的地区^[2]。

受能力和条件制约,很多欠发达国家气象水文部门无法自主研发本地化的区域数值模式,或者运行的区域数值模式的空间分辨率不及先进业务中心的全球数值模式精细,另外无法进一步开展资料同化、模式检验、订正和后处理等关键技术研发,因此严重影响了当地气象部门灾害性天气的预报预警水平。为了提升发展中国家气象水文部门灾害性天气预报预警的能力,灾害性天气预报示范区域子计划与世界气象组织的全球数据处理和预报系统计划及公共气象服务等计划合作,采取的是级联预报体系(cascading forecasting process)方式。全球数据处理和预报系统是指全球、区域、国家三级业务中心构成的级联业务体系^[3]。其中,第一级的全球数值预报中心主要提供全球数值天气预报和(基于站点的)集合预报产品;第二级的区域专业气象中心(regional specialized meteorological centres, RSMCs)对获取的全球数值预报产品进行释用,通过区域中心网站等平台提供预报指导和数值模式输出产品(预报时效可达 5 d),有的区域专业气象中心还运行本地化的区域数值模式提供更高分辨率的预报产品,并开展远程视频天气会商;第三级的国家级气象中心利用全球数值预报中心或区域



注:绿色框表示正在实施的灾害性天气预报示范区域子计划范围;粉色和橙色框分别表示未来1~2年和3~5年计划发展的灾害性天气预报示范区域子计划范围

图1 世界气象组织的灾害性天气预报示范计划区域子计划地理分布(截至2019年2月)

专业气象中心提供的产品开展本国灾害性天气预报,并向灾害管理部门、公众等用户发布权威的预警信息,另外还参与反馈和评估。这样,有助于模式研发部门了解模式及产品的应用效果,并针对存在的问题不断改进,形成正反馈效应。

表1给出了目前已经实施的灾害性天气预报示范8个区域子计划的起始时间,参与国家(地区)数量,参与的区域专业气象中心及全球数值预报中

心。其中,全球数值预报中心包含了全球数据处理和预报系统框架下目前世界气象组织认定的9个世界气象中心。灾害性天气预报示范区域子计划的建立和实施采用分阶段推进的方式,包括以发展和示范为主的3个阶段和最后由示范向业务运行转化的阶段。第1阶段是项目总体计划,包括需求评估和计划准备,针对相关灾害性天气明确区域范围、项目实施周期以及相关技术产品。第2阶段是

表1 已实施的灾害性天气预报示范区域子计划

区域	起始时间	参加国家(地区)数	区域专业气象中心	全球数值预报中心	所处阶段
南部非洲	2006年	16	RSMC 比勒陀利亚 RSMC-TC 留尼汪	英国;欧洲中心;美国	4
南太平洋	2009年	9	RSMC 惠灵顿 RSMC-TC 斐济	澳大利亚;欧洲中心; 美国;日本	3
东部非洲	2010年	7	RSMC 内罗毕 RFSC 达累斯萨拉姆	英国;欧洲中心; 美国;德国	3
东南亚	2010年	5	RFSC 河内 RSMC-TC 东京 RSMC-TC 新德里	中国;欧洲中心; 日本;韩国	3
南亚	2012年	9	RSMC 新德里	印度;欧洲中心;中国;日本;韩国;英国	3
中亚	2014年	5	RSMC 塔什干	俄罗斯;欧洲中心;中国;日本;韩国	3
西部非洲	2015年	15	RSMC 达喀尔	法国;英国;美国;欧洲中心;加拿大	2
东加勒比海	2016年	19	RFSF 马提尼克	法国;加拿大;美国;欧洲中心;英国	1

子计划实施,包括建立详细工作方案,确定交换的数据和产品,成立专门子计划工作组及建立相关培训计划,同时参与的国家气象水文部门定期提交项目执行进展报告。第3阶段是子计划评估,包括分析和评估子计划的实施情况以及对于灾害性天气预报示范计划总体目标的贡献,找出计划实施中的不足并提供建议。第4阶段是持续性发展,子计划进入稳定发展阶段,利用新科技新技术提升质量,并促进与世界气象组织其他计划的融合及向外拓展。其中,最早启动的灾害性天气预报示范南部非洲子计划已于2012年正式进入到了第4阶段,而其他大部分子计划也已经进行到第3阶段。总体而言,尽管区域子计划的实施进度各不相同,但灾害性天气预报示范计划的实施已取得了显著的成效,全球数据处理和预报系统级联预报体系在高效帮助欠发达国家提升灾害性天气预报预警能力中也发挥了关键性的作用^[11]。

2 灾害性天气预报示范计划技术进展

实践表明,灾害性天气预报和预警越来越离不开数值预报模式及应用技术。近十几年来,全球、区域业务数值预报模式的快速发展为构建从全球到区域到国家层面的级联业务体系奠定了基础^[12],并可以提供大量的从小时到月的数值模式输出产品,为中短期天气业务预报提供了有力的支撑。20世纪90年代初期,业务集合预报系统的出现促进了传统单一预报向包含不确定性信息的概率预报发展^[13],可以用于提供极端天气的发生概率信息和灾害性天气的预报不确定性。此外,气象卫星的发展一方面为灾害性天气遥感监测提供了重要的技术手段,另一方面通过卫星资料同化在提高数值模式预报性能方面发挥了重要的作用。下面将分别从全球确定性数值模式、区域数值模式、集合预报系统和气象卫星资料应用4个方面来综述灾害性天气预报示范计划技术的进展。

2.1 全球确定性数值预报模式

业务化运行的全球数值模式从模式研发、实时运行到发展维护各个环节,都需要大量的专家、技

术人员以及高性能计算机和通信资源。目前一些发达国家和个别发展中国家的气象水文部门具备这个能力。受条件所限,部分欠发达国家运行的本地化区域数值模式预报效果不如一些先进的全球数值模式,并且差距还在不断加大。因此,灾害性天气预报示范计划中的全球数值模式就有了存在的必要性和重要性。

随着观测(特别是卫星和雷达)能力的提高,资料同化技术的发展,计算能力的加强和模式物理过程的改善,全球确定性数值模式的中短期(1~10 d)天气预报的准确率近几十年稳步提升,精细化程度不断提高^[14]。同时,模式在短期时效的发布更新频次也在增加,预报时效逐渐向次季节甚至季节尺度延伸。另外,再预报(reforecasting)技术的发展能够进一步提高模式统计后处理的效果,进而提升灾害性天气的预报技巧。其中,资料同化技术的发展对模式预报性能的提高起到了至关重要的作用^[15]。常见的资料同化方法包括两种:一是变分资料同化方法,如三维变分方法(3DVar)、四维变分方法(4DVar);另一种是集合资料同化方法,如集合卡尔曼滤波(EnKF)。近年来也有将变分方法和集合同化方法相结合的混合(hybrid)资料同化方法,如四维集合变分方法(4DEnVar)等。目前,很多欧美发达国家的全球数值模式采用了混合资料同化方法。

表2简要列出了灾害性天气预报示范计划10多家全球数值预报中心的确定性全球数值预报模式的基本信息。可以看出,模式的最长预报时效可达10~16 d。欧洲中心(ECMWF)模式的分辨率最高,水平分辨率为9 km,垂直层数达137层。更高的垂直层数意味着更高的模式顶层,可以加强卫星辐射的同化以及改善平流层的动力学过程。

一个广泛用于衡量全球数值预报能力的指标是500 hPa位势高度预报和观测之间的距平相关系数(anomaly correlation coefficient, ACC)(单位为%)。一般而言,距平相关系数超过60%则认为数值天气预报是有技巧的^[16]。图2是ECMWF全球确定性预报模式500 hPa位势高度的距平相关系数的逐年演变。从长期演变来看,20世纪80年代

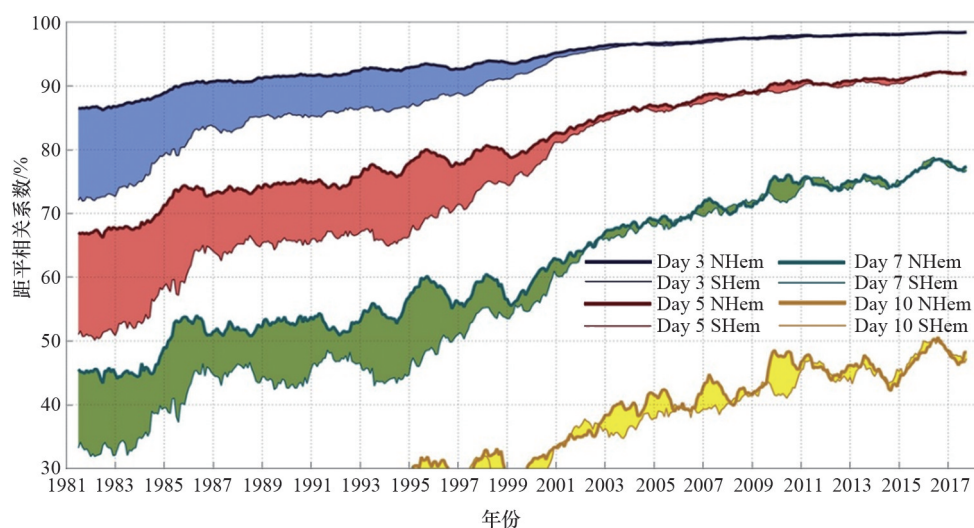
表2 部分灾害性天气预报示范计划全球数值业务中心确定性全球数值天气预报系统

中心	国家(地区)	名称	最长预报时效/h	水平分辨率	垂直层数	资料同化技术
BoM	澳大利亚	ACCESS-G	240	~ 25 km	70	4DVar
CMA	中国	GRAPES_GFS	240	0.25°×0.25°	60	4DVar
CMC	加拿大	GDPS	240	0.23°×0.23°	80	Hybrid 4DEnVar
DWD	德国	ICON	180	13 km	90	Hybrid 3DVAR
ECMWF	欧洲	IFS-HRES	240	~ 9 km	137	Hybrid 4DVAR
JMA	日本	GSM	264	0.1875°×0.1875°	100	4DVAR
KMA	韩国	UM	300	10 km	70	Hybrid 4DVAR
MF	法国	ARPEGE	96	0.5°×0.5°	105	4D-VAR
NCEP	美国	GFS	384	13 km	64	Hybrid 4DEnVAR
UKMO	英国	UM	144	10 km	70	Hybrid 4DVAR
RHMC	俄罗斯	SL-AV	240	(0.16-0.24)°×0.225°	51	3DVAR

以来各个时效的 500 hPa 高度的距平相关系数都呈现出升高的趋势,说明模式预报能力在不断提升。特别在南半球,模式预报能力的提高更加显著。这主要是由于南半球常规的观测资料(台站等)稀少,但是近几十年来数值预报对卫星资料的应用极大地改善了这一不足。同时,这也导致南北半球的预报技巧在 2000 年以后的差距愈加不明显。目前,ECMWF 模式的可预报时效接近 10 d,而在 30 a 以前,可预报时效仅为 7 d。因此从这个角度而言,先进的全球数值天气模式大约每 10 a 延长可用预报时效 1 d 左右^[12]。

2.2 区域数值预报模式

强对流天气是造成气象灾害的重要天气之一,具有局地性强、发展迅速、致灾性强等特征,对其准确的预报是当前数值预报的重大挑战之一^[17]。例如非洲热带地区,中尺度对流系统引发的强降水事件虽然发生次数少,但降水强度大,累积降水量一般占年总降水量的绝大部分。灾害性天气预报示范非洲东部子项目覆盖了非洲最大的湖泊——维多利亚湖。该流域经常发生大风、短时强降水等强对流天气,对湖泊运输和依赖该湖生存的渔民造成了极大的危害。



注:距平相关系数为 12 个月的滑动平均;填色区表示北半球和南半球的预报技巧的差异

图2 ECMWF 全球确定性预报模式不同预报时效预报的 500 hPa 位势高度场的距平相关系数

尽管全球数值模式的分辨率和预报技巧不断提升,但对于局地强天气的预报能力仍十分不足。区域数值预报模式也称为有限区域模式(limited-area models, LAMs),侧边界大多数由全球数值模式提供^[18]。区域数值模式空间分辨率较高(一般小于10 km),能够更好地描述地形、海陆边界特征以及云物理和近地面次网格过程。除了高分辨率以外,数值预报模式也朝着非静力平衡的方向发展^[19]。静力平衡模式框架中,不考虑垂直加速度,垂直速度变为一个诊断量。为了提高对强对流等灾害性天气的预报技巧,则需要在模式中增加垂直加速度。自2002年以来,灾害性天气预报示范计划中一些全球数值预报中心开始业务化地运行高分辨率的非静力有限区域模式。表3列出了部分灾害性天气预报示范计划全球数值业务中心运行的非静力有限区域模式。这些LAMs一般提供3 d以内的未来天气预报。GRAPES_Meso是近20 a来中国科学家自主研发的有限区域模式,现已在国家级和许多省市级预报中心业务化运行^[19]。

表3 部分灾害性天气预报示范计划全球数值业务中心运行的非静力区域数值模式

中心	国家	名称	水平分辨率/km	垂直层数	更新频次/h
CMA	中国	GRAPES_Meso	3	50	3
JMA	日本	NHM	5	50	3
MF	法国	AROME	2.5	60	3
NCEP	美国	WRF-ARW	5	50	12
NCEP	美国	HRRR(WRF-ARW)	3	50	1
UKMO	英国	UM	4	70	12

近年来,对流可分辨率尺度模式(convection-allowing models, CAMs),简称对流尺度模式,受到国内外越来越多的关注。该类模式水平分辨率一般小于5 km,不再使用积云对流方案,可以较详细地刻画中小尺度系统的特征^[14]。此外,对流尺度模式在天气雷达等高时间频次稠密观测资料应用、高精度模式动力框架、精细化物理过程、复杂地形处理等核心技术应用及支撑短时临近对流性天气预

报等方面具有非常重要的作用。有学者评估了英国气象局全球数值模式和对流尺度模式(水平分辨率为4 km)在非洲维多利亚湖流域的预报性能。结果表明,对流尺度模式对对流性降水的预报效果优于全球数值模式,特别是在日以下尺度上(3 h间隔),预报命中率总体提高约20%^[20]。另外,灾害性天气预报示范东南亚子项目目前运行了3套区域数值模式提供未来72 h的预报,其初始场和边界条件来自于全球数值模式。

2.3 集合预报系统

由于大气本身的可预报性上限,单一的确定性数值模式对于预报灾害性天气过程仍存在局限性。集合预报是为解决不确定性问题而提出的,主要考虑初值及模式的不确定性,能够反映未来天气的多种可能情况^[21]。集合预报模式按照时空尺度可分为全球集合预报、区域集合预报和对流尺度集合预报。

全球集合预报系统(ensemble prediction system, EPS)已成为各主要数值预报中心业务系统的重要组成部分,例如美国国家环境预报中心、欧洲中心、英国气象局、加拿大气象中心、中国气象局和日本气象厅等。表4列出了部分灾害性天气预报示范计划全球数值业务中心的全球集合预报系统。为了保证集合预报的时效性,EPS的分辨率一般低于相应的确定性模式。ECMWF的EPS包含1个控制预报成员和51个扰动预报成员,水平分辨率约为18 km。各预报中心集合预报系统的初始扰动技术很大程度上与各中心所采用的资料同化技术密切相关,并呈现初始扰动技术和集合同化技术逐渐紧密结合,共同发展的特征。例如,欧洲中心EPS从2010年起采用奇异向量和集合同化(EDA)相结合的方法。美国NCEP自2016年起采用集合卡曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)。模式不确定性是集合预报系统研究的另一个重要内容,随机物理过程扰动方法如随机物理过程倾向扰动方案(stochastically perturbed parameterization tendencies, SPPT)和随机动能后向散射方案(stochastic kinetic energy backscatter, SKEB)应用较为广泛^[14]。

表4 部分灾害性天气预报示范计划全球数值业务中心全球集合预报系统

中心	国家(地区)	名称	最长预报时效/h	水平分辨率	垂直层数	集合成员数
CMA	中国	GRAPES_GEPS	360	0.5°×0.5°	60	31
DWD	德国	ICON	180	40 km (欧洲 20 km)	90	40
ECMWF	欧洲	Tco639	360	~ 18 km	91	51
JMA	日本	GSM	264	0.375°×0.375°	100	27
KMA	韩国	MOGREPS	288	32 km	70	25
MF	法国	PEARP	96	60 km	90	35
NCEP	美国	T574	192	34 km	64	21
		T382	384	55 km		
UKMO	英国	MOGREPS-G	168	20 km	70	44

为了提高暴雨等中尺度强对流天气的预报预警能力,区域集合预报模式和对流尺度集合预报系统(convection allowing ensemble prediction systems, CAEPSs)应运而生^[22-23],后者水平分辨率在1~4 km,可以提供对流系统发生发展、强降水落区、大风极值分布等丰富的概率预报信息。目前,业务运行或试验中的对流尺度集合预报系统主要包括德国 COSMO-DE-EPS、英国 MOGREPS-UK、法国 AROME-EPS 和美国 SSEF 等。

集合预报不仅可以提供预报结果的可信度,提高长时效预报的稳定性,而且对短期灾害性极端天气的早期预警也能起到重要的作用^[21]。集合预报所提供的概率预报结果可以给出极端天气事件在未来出现的可能性。对于灾害性天气事件的定义因地区和国家而异,根据需要来确定诸如降水、风速、浪高等要素的阈值。Lalaurette^[24]基于 ECMWF 集合预报研究了一种可识别极端天气事件的极端天气预报指数(extreme forecast index, EFI)。这是一个测量某一预报要素的集合预报累积概率分布函数和模式气候态之间的连续差异,从而识别未来是否发生极端降水、极端高(低)温和极端大风等灾害性天气,近年来也得到了广泛的应用。对于热带气旋,灾害性天气预报示范计划的一些业务中心还利用集合预报生成台风路径和强度的概率预报产品支持相关欠发达国家的台风灾害性天气预报预警业务。

2.4 气象卫星资料应用

中尺度对流系统是很多灾害性天气的直接制

造者,气象卫星特别是静止气象卫星能够提供大范围、全天时的云图信息,因此在监测和对流初生的临近预报预警方面具有优势。对于缺少天气雷达观测或地面观测站分布稀疏的地区,这一优势则更加凸显。高频次和高分辨率的可见光、红外、水汽等多通道气象卫星图像可以更准确地把握暴雨(雪)云团、台风云团、强对流云团的发生发展消亡演变过程。基于气象卫星资料的降水估计、闪电监测、云识别分类等反演产品能够增强暴雨、台风、强对流等灾害性天气的客观定量监测能力。同时,利用卫星资料反演的K指数、抬升指数等大气不稳定指数等产品,可以提前数小时发现中小尺度天气系统发生前环境条件的变化,直接服务于灾害性天气短时预报。

目前,美国、欧洲、中国和日本都发展了各自的静止气象卫星。例如,在灾害性天气预报示范南部非洲子计划中,欧洲气象卫星组织基于第二代静止气象卫星(meteosat second generation, MSG)向相关非洲国家的气象水文部门提供云图、降水估计和临近预报产品。其中,基于第二代静止气象卫星开发的快速发展雷暴(rapid development thunderstorm, RDT)技术可以每15 min就提供一次对流系统的识别、追踪和外推产品^[25]。

另一方面,气象卫星已成为全球数值天气预报所依赖的最重要的观测系统。目前,美国和欧洲中心的业务数值预报模式中,输入的观测资料大部分是来自卫星的辐射测值和加工处理出来的各要素和参数。通过卫星资料同化,能够显著地提高数值

模式预报的精度和时效,进而提升灾害性天气的预报能力。

3 国内进展

中国气象局于2010年首次参加灾害性天气预
报示范计划的东南亚区域子计划,作为该项目的全
球数值预报中心,负责提供数值预报产品和与强对
流天气有关的卫星产品,并制作专门的网站提供相
关国家气象部门进行访问和使用。2016年和2018
年中国气象局又作为全球数值预报中心参加了灾

害性天气预报示范中亚子计划和南亚子计划。目
前,中国气象局已实时提供的GRAPES全球确定性
数值模式产品达46种,包括环流形势、气象要素、
动力诊断量及针对强对流天气的对流有效位能、K
指数、抬升指数等多种强对流指数产品,提供的
GRAPES集合预报产品达26种,包括环流形势面
条图、超过某一阈值的(如降水、风速等)概率图以
及300多个特定站点的集合预报箱线图(图3)等,
有效地支撑了各子区域和单点的灾害性天气预报。

迄今,中国已建成以自主研发的GRAPES为核
心的全球数值模式(GRAPES_GFS)、区域数值模式

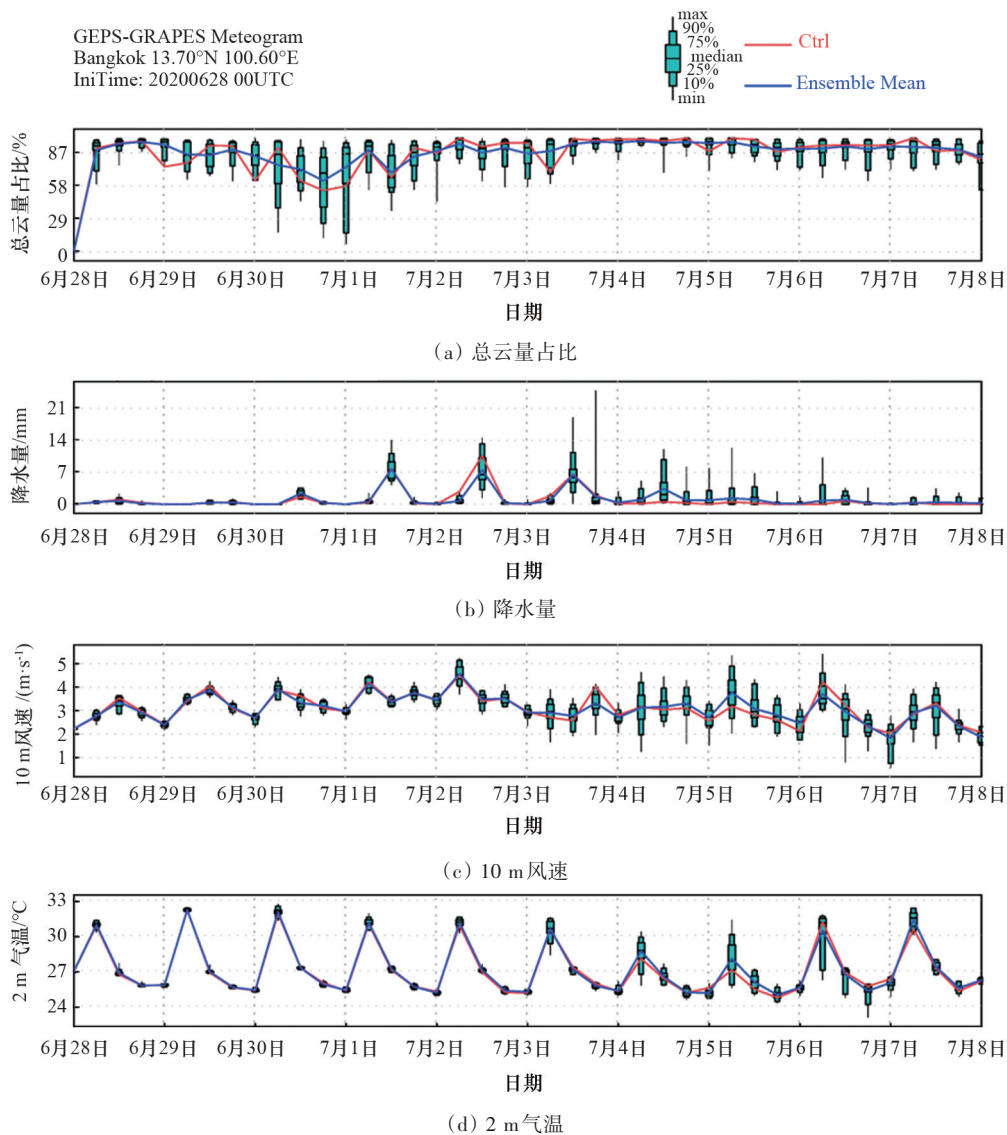


图3 中国气象局GRAPES全球集合预报系统泰国曼谷箱线图

(GRAPES_Meso)和集合预报系统(GRAPES_GEPS),并对台风、环境响应、海浪等专业模式提供支撑的完备的数值天气预报体系^[8,26]。2017年,中国气象局被世界气象组织认定为世界气象中心,标志着中国气象预报业务能力总体达到了世界先进水平。此外,针对灾害性天气的监测和临近预报,中国气象局还为相关灾害性天气预报示范区域子计划提供风云静止气象卫星和风云极轨气象卫星的可见光、红外和水汽通道等实时卫星图像产品^[27]。同时,基于风云静止气象卫星也研发了针对灾害性天气的对流初生监测、降水估计等产品^[28]。2018年,中国将风云二号H星定点于79°E,可为南亚、西亚、中亚和大部分非洲国家提供持续的遥感观测支持。在培训方面,自2011年以来,中国气象局多次派遣专家参加灾害性天气预报示范计划的培训研讨会,为相关国家气象部门的预报员提供了包括灾害性天气预报、临近预报、气象卫星产品应用等方面的技术培训。

4 面临的挑战

得益于上述数值模式和集合预报系统十几年来来的显著进步,以及先进的业务应用技术和高效的运行合作机制,灾害性天气预报示范计划实现了世界气象组织帮助提升发展中国家气象水文部门灾害性天气预报水平,延长预警时效的总体目标,为防灾减灾做出了积极贡献。然而,从技术方面而言,目前数值模式包括对流尺度模式在模式动力框架、复杂地形作用、物理过程描述等方面仍存在不足^[14],资料同化和模式并行计算效率也有待进一步提升,对暖区暴雨、飑线等强对流过程以及降水相态的预报能力还存在欠缺,对短时临近灾害性天气精细化预报的支撑还有待加强。此外,一些欠发达国家气象水文部门获取和利用全球先进业务中心产品的能力仍存在差距,亟待加强相关技术和业务培训。灾害性天气预报示范计划目前以分阶段实施的发展方式也值得进一步改进。例如,子计划的实施周期比较长,一些项目缺乏持续有效的资金支持,缺少实体性的区域性机构及专门人员来承担

和保障子项目的可持续发展。

另一方面,当今社会各界(航空、海事、农业、能源、卫生等)对涉及灾害性天气信息的需求愈加精细化、个性化和专业化。新一轮科技革命和产业变革在21世纪正在兴起。从云计算、人工智能的发展,机器学习技术、物联网的创新到星载平台(公共卫星和商业卫星)数据的爆炸式增长,以及社会新媒体信息传播、获取方式的转变,都影响着天气、气候、水和环境等信息的收集、制作、分发及用户决策。此外,一些私营部门和科研机构也在积极发展对用户更有针对性的预报和服务。因此,用户需求、关键技术、技术创新及外部竞争等因素对灾害性天气预报示范计划的可持续发展提出了挑战,但同时也带来了新的机遇。

5 灾害性天气预报示范计划展望

灾害性天气预报示范计划实施10多年来取得的成效已超出了最初预期的示范意义,因此世界气象组织提议将灾害性天气预报示范计划改名为灾害性天气预报计划(severe weather forecasting project, SWFP),并在2019年召开的第十八次世界气象大会通过了决议。世界气象组织在2020—2023年的战略计划中提出将地球系统(包括大气、水圈、冰冻圈、生物圈、岩石圈)作为一个整体,进一步加强观测和无缝隙预报研究和应用^[29],促进基于影响的预报和基于风险的预警。未来,地球系统模式将耦合水文、化学、海洋、海冰等多个模式,从而提供更加丰富和准确的天气、气候、水和环境预报信息。例如,高分辨率的区域大气数值模式可以为水文模式提供所需的高精度气象驱动场。实际上,在南亚、东南亚、非洲等区域,世界气象组织已经推出了山洪指导系统(FFGS)和沿海洪水预报示范项目(CIFDP)^[30]。

对于数值模式的发展而言,随着高性能计算机的发展,运算能力有望从千兆次提升至百万兆次^[14]。下一代大规模并行高性能计算将保证地球系统模式在变得越来越复杂的同时,时空分辨率也能不断增加,全球对流尺度模式的水平分辨率未来

将达到公里级甚至次公里级。除地面观测、卫星、雷达以外,无人机、移动雷达、众源数据等新技术将为数值模式提供质量更高和频次更密的观测资料^[4]。基于变分和集合方法的混合资料同化等同化技术将进一步完善。集合预报技术将应用于地球系统的各个模式来提供反映不确定性的概率信息。对于动力、物理、化学过程等跨学科的研究将加深对可预报性和地球系统无缝隙预报的理解,促进各个时间尺度上灾害性天气预报能力的提升。随着数值模式的复杂程度越来越高及带来的海量数据,人工智能、机器学习、深度学习等技术将更多地被应用于各领域的大数据挖掘和决策制定,在提供“最佳预报”的基础上支持用户做出“最佳决定”,降低各种灾害风险和损失。

可以预见,世界气象组织框架下的灾害性天气预报示范计划将适应新时代的需求继续演进,并与交叉领域相关计划(例如FFGS、CIFDP)协同发展,助力建设综合性的多灾种早期预警系统。今后,更多灾害性天气预报示范计划的开展将进一步拓展级联预报体系的覆盖率,全球和区域各个层面上的气象业务中心、灾害管理部门及相关科研院所将密切合作,通过加强相关培训和交流合作,提升包括欠发达国家在内的所有气象水文部门的日常业务水平,增强对数值模式的应用能力,提高各种灾害性天气的预报能力,延长预警时效,不断为防灾减灾和可持续发展做出更大的贡献。

参考文献(References)

- [1] World Meteorological Organization. Establish guidelines for implementation of a demonstration project of severe weather forecasting[R]. Toulouse: WMO, 2004.
- [2] 刘甜, 方建, 马恒, 等. 全球陆地气候气象及水文灾害死亡人口时空格局及影响因素分析(1965—2016年)[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(3): 8-16.
- [3] World Meteorological Organization. Manual on the global data-processing and forecasting system (WMO-No. 485) [R]. Geneva: WMO, 2017.
- [4] Thiaw W M, Kumar V B. NOAA's African desk: Twenty years of developing capacity in weather and climate forecasting in Africa[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96: 737-753.
- [5] 曾庆存, 林朝晖. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(1): 1-6.
- [6] Florian R, Mohammad A, Steve A, et al. Earth system science frontiers: An early career perspective[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(6): 1120-1127.
- [7] World Meteorological Organization. WMO guidelines on multi-hazard impact-based forecast and warning services (WMO-No.1150)[R]. Geneva: WMO, 2015.
- [8] 沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. GRAPES_GFS全球中期预报系统的研发和业务化[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 1-10.
- [9] 漆梁波. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J]. 气象, 2015, 41(6): 661-673.
- [10] 高丽, 陈静, 郑嘉雯, 等. 极端天气的数值模式集合预报研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(7): 706-716.
- [11] 王毅, 周庆亮, 代刊, 等. 全球数据处理和预报系统发展及展望[J]. 气象科技进展, 2019, 9(2): 6-10.
- [12] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature, 2015, 52: 47-55.
- [13] 杜钧, 钱维宏. 天气预报的三次跃进[J]. 气象科技进展, 2014, 4(6): 13-26.
- [14] Benjamin, S G, Brown J M, Brunet G, et al. 100 years of progress in forecasting and NWP applications[J]. Meteorological Monographs, 2018, 59: 13.1-13.67.
- [15] 龚建东. 同化技术: 数值天气预报突破的关键[J]. 气象科技进展, 2013, 3(3): 5-13.
- [16] Zhang F, Sun Y Q, Magnusson L, et al. What is the predictability limit of midlatitude weather[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2019, 76: 1077-1091.
- [17] 张小玲, 杨波, 盛杰, 等. 中国强对流天气预报业务发展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(3): 8-18.
- [18] Wang Y, Belluš M, Ehrlich A, et al. 27 years of regional cooperation for limited area modelling in central Europe [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99: 1415-1432.
- [19] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES_Meso V4.0主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 25-37.
- [20] Woodhams B J, Birch C E, Marsham J H, et al. What is the added value of a convection-permitting model for forecasting extreme rainfall over tropical East Africa[J]. Monthly Weather Review, 2018, 146: 2757-2780.
- [21] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象, 2010, 36(11): 1-

- 11.
- [22] 王璐, 沈学顺. 对流尺度集合预报与模式不确定性研究进展[J]. 气象, 2019, 45(8): 1158-1168.
- [23] 张涵斌, 范水勇, 陈敏, 等. 区域集合预报基于SKEB和多物理过程的混合模式扰动方法研究[J]. 气象, 2019, 45(1): 17-28.
- [24] Lalaurette F. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2003, 129: 3037-3057.
- [25] Morel C, S n si S, Autones F. Building upon SAF-NWC products: Use of the rapid developing thunderstorms (RDT) product in meteo-France nowcasting tools[C]. Meteorological Satellite Data Users Conference. Dublin: Eumetsat and Met Eirean, 2002, 248-255.
- [26] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 17(6): 773-777.
- [27] 杨军, 咸迪, 唐世浩. 风云系列气象卫星最新进展及应用[J]. 卫星应用, 2018, 11: 8-14.
- [28] 覃丹宇, 方宗义. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展[J]. 气象, 2004, 40(1): 7-17.
- [29] Brunet G, Jones S, Ruti P M. Seamless prediction of the earth system: from minutes to months[R]. Geneva: WMO, 2015.
- [30] Jubach R, Tokar A S. International severe weather and flash flood hazard early warning systems—Leveraging coordination, cooperation and partnerships through a hydro-meteorological project in Southern Africa[J]. Water, 2016, 8: 258.

Progress and prospection of the severe weather forecasting demonstration project technologies

WANG Yi¹, ZHOU Qingliang¹, TONG Hua¹, XIAN Di², XU Wanzhi³, REN Lu¹, TANG Wenyuan¹

1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
2. National Satellite Meteorology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
3. International Cooperation Department, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract In the context of the global climate change, severe weather is increasingly threatening the sustainable development of all countries, especially, developing countries. Thus an accurate and reliable weather forecast and the warning information are essential. This paper analyzes the Severe Weather Forecasting Demonstration Project (SWFDP) of the World Meteorological Organization (WMO), including its initial concept and the status of regional subprojects. Currently, 8 regional subprojects were set up, covering about 80 countries. The recent technical progresses of the severe weather forecasting are reviewed, including the global deterministic numerical models, the regional numerical models, the ensemble prediction systems and the meteorological satellite data applications. The SWFDP involves a cascading forecasting process to provide an effective access to the products and the tools made available by the advanced operational global and regional centres. The basic characteristics of the numerical models and the operational systems in the major domestic and international meteorological centers are analyzed. Furthermore, current challenges for the development of the severe weather forecasting demonstration project are analyzed and the prospects of the project as well as the numerical model applications are discussed.

Keywords severe weather; numerical models; world meteorological organization ●



(责任编辑 祝叶华)