

## 中央气象台台风预报业务的发展及思考



**通信作者简介:**李泽椿,研究员/博士生导师。天气动力和数值预报专家,中国工程院院士。长期从事大气科学工程化的天气预报和数值天气预报业务系统工程建设和科研工作,创建了中国第一个数值天气预报业务系统,建立了国家级中、短期数值天气预报的业务体系。曾任国家气象中心主任,北京气象学会理事长,国务院应急办专家组成员、国家环保部两委委员、国家民政部减灾委专家组成员。

1951年参加中国人民解放军,1952年建立汉中南区陕西略阳气象站并从事天气预报与观测一线工作。1978年开始与北大、中科院大气所合作,研究建立了我国短期数值天气预报业务系统,1981年投入使用。“七五”期间研制并建立了我国第一个中期数值天气预报业务系统,1993年投入使用。1992—1994年相继组织安装了我国最大的巨型计算机银河-II、Cray C90,并设计构成二个互为备份的计算机体系,保证了预报业务的发展与稳定运行。“八五”期间研制了我国的台风与暴雨数值预报系统,1996年投入了业务。“九五”期间主持了“并行计算在数值天气预报(NWP)中应用”科研项目,完成后极大地提升了我国气象业务预报水平。其主持项目共获得国家科技进步一等奖一次、二等奖三次;2001年获何梁何利奖,2004年获中国气象局科学技术贡献奖。

\* 联系人, E-mail: lizc@cma.gov.cn

2020-01-10 收稿, 2020-01-20 接受

国家自然科学基金资助项目(41775048); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-139)

李泽椿<sup>①\*</sup>, 张玲<sup>①</sup>, 钱奇峰<sup>①</sup>, 麻素红<sup>①</sup>, 徐晶<sup>②</sup>, 代刊<sup>①</sup>, 湛芸<sup>①</sup>, 王月冬<sup>①</sup>

① 国家气象中心, 北京 100081;

② 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘要** 随着数值预报技术和综合探测体系的不断进步和完善,近十几年来中央气象台的台风业务预报取得了较显著的进展,特别是台风路径业务预报水平进展显著,基本达到了国际先进水平,但是在台风强度和风雨影响的预报及台风风险评估方面进展相对较慢。本文从我国台风灾害影响的严重性和中央气象台台风预报的重要性、中央气象台台风预报的发展历程、中央气象台台风预报员的作用、台风业务中重大科学问题的提出和解决途径、重大台风科研项目对中央气象台台风业务的促进和指导等几方面进行了回顾和分析,并提出了未来提高台风业务预报能力的有效途径。

**关键词** 台风预报业务; 科研开发; 集合预报; 人工智能

我国是世界上受自然灾害影响最严重的国家之一,其中洪涝和台风是致灾因素中最重要的组成部分。我国处在南海季风区,西北太平洋和南海海域是全球台风的高发区,台风登陆的地点几乎遍及我国整个东部和南部沿海。我国遭受的台风灾害有次数多、季节性强、受灾程度重、影响范围广等特征。台风的破坏力极大,是夏秋季节严重影响我国沿海、特别是华南和华东沿海的灾害性天气系统之一,而这些地区恰又是我国经济发达群集地区,并且台风的影响还会延伸到我国内陆各地。台风灾害属于自然灾害的一种,是必然发生的,不是人为可控的,台风预报预警服务工作作为中央气象台最重要的工作内容之一,更加让我们负有责任感。有些突发公共事件可以通过事先布控而达到防患于未然的效果,比如工矿出事故,如果安全措施到位的话可以不出事故或至少是少出事故。医疗上的病毒传染如果对其发生发展规律及风险预警能及早认识,并且防控措施到位,可以有效地控制病毒传播的范围。2020年我国在较短时间内控制住了新型冠状病毒疫情在我国的蔓延就是一个很好的例子,台风则不然。台风灾害是我国在和平发展时期面临的众多严重自然灾害中的一种。习近平总书记一直高度重视防灾减灾抗灾救灾工作,党的十八大以来,习近平总书记多次在不同场合发表重要讲话。2016年7月习近平总书记就做好当前防汛抗洪抢险救灾工作强调,各级领导干部要从防汛责任落实、监测预报预警、避险撤离转移、防洪工程调度、山洪灾害防御、城市防洪排涝、险情巡查抢护、部门协调配合等方面强化防汛抗洪工作。

**引用格式:**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 Central Meteorological Center[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 10-19. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200110015. (in Chinese).

2018年7月习近平总书记对防汛抢险救灾工作做出重要指示,要求相关地区党委和政府要加强气象、洪涝、地质灾害监测预警,紧盯各类重点隐患区域,开展拉网式排查,严防各类灾害和次生灾害发生。2017年1月10日发布的《中共中央国务院关于推进防灾减灾救灾体制机制改革的意见》,明确提出要以人民为中心的发展思想,坚持以防为主、防抗救相结合,努力实现从注重灾后救助向注重灾前预防转变,从应对单一灾种向综合减灾转变,全面提升全社会抵御自然灾害的综合防范能力。

在我国,中央气象台是台风预报的权威发布机构,台风的预报服务一直是其主要任务之一,中央气象台一直秉承着满足国防与国家经济发展的气象保障需求的原则,落实到不断改进预报效果上。经过多年发展,台风预报水平取得长足进步,特别是台风路径预报水平基本达到了国际先进水平。目前中央气象台按照当前的科学发展水平尽力做到满足国家对防台减灾的各种要求,在多个重大台风的预报预警服务过程中做出了较准确及时的预报、提供了科学的决策建议,为筑牢防灾减灾第一道防线发挥了重要作用,赢得了党中央、国务院各级领导的充分肯定与赞扬。

## 1 我国台风灾害影响极其严重,做好台风预报是中央气象台义不容辞的责任

我国平均每年有28个台风生成,并且其中四分之一会在我国沿海登陆,由其造成的灾害可分为直接和间接两类:直接灾害主要是由台风的狂风引发的风灾和暴雨造成的城市积水内涝和乡村农田的暴雨洪涝灾害;间接灾害主要为台风暴雨引发的衍生地质灾害(如泥石流、山体滑坡等),以及台风大风作用于海表面而引起的沿海地区风暴潮灾害,其中在天文高潮期风暴潮灾害更为严重。同时由于台风导致不能正常上班和生产也产生很大的间接损失。另外台风环流对向我国内陆地区的水汽输送可能同时存在利弊的双向作用。

在我国台风灾害是自然灾害中的重要组成部分,我国极端强降水的记录都是由台风直接或间接造成的,并由此引发严重的灾害,历史上有很多台风造成了惨重的损失。如1975年的7503号超强台风级台风Nina创造了中国内陆暴雨之最,它创下了830 mm的大陆6 h降雨量和1 062 mm的大陆24 h降水量的历史记录,使河南省驻马店地区板桥和石

漫滩两座大型水库在短短数小时相继垮坝溃决,超过2.6万人死难。再如2006年的0604号台风“碧利斯”先后在台湾宜兰和福建霞浦沿海登陆后,向偏西方向继续深入我国内陆,登陆后长时间维持不消,与西南季风涌相互作用,致使我国华南和江南南部出现持续性强降水,降水强度之大、影响范围之广在历史上极为少见,致使受影响地区山洪爆发,江河水位陡涨,塘库爆满,部分城镇被淹,人员伤亡惨重。据福建、广东、湖南、广西、浙江、江西等省(区)不完全统计,直接经济损失达348.29亿元,因灾死亡843人,因灾死亡人数是继7503台风Nina之后位居第二位的台风,为1994年以后造成死亡人数最多的一个台风。

台风预报事关国家安全和百姓的生命财产,国务院及各级党委和政府历来都高度重视台风灾害的防御工作,广大人民群众也非常关注中央气象台的台风预报。中央气象台是中国国内唯一授权的台风强度发布单位,同时负责西北太平洋和南海所有台风的预报预警服务工作,并承担着对省级气象部门台风业务预报服务的技术指导职责。中央气象台台风预报服务工作非常重要,是国家的需求和社会的需求。从事台风预报的业务和科研人员,必须不忘初心,目标明确,认真完成所承担的使命。

中央气象台的台风预报工作有我国的特色,台风预报业务和台风的风险评估和决策气象服务工作是紧密相连的。决策气象服务是指为党中央、国务院、各级政府及有关部门制定经济发展规划、指挥生产、组织防灾减灾、应对气候变化、合理开发利用资源、保护环境、加强军事与国防建设以及重大社会活动保障、重大工程建设等科学决策所提供的气象信息服务,是一项涉及社会稳定、经济发展和人民生命财产安全的全局性、综合性、前瞻性和高层次气象服务(薛建军等,2010)。决策气象服务的目的是在第一时间让党政领导和有关决策部门获得科学、准确、及时、有参考价值的气象信息。决策气象服务内容主要包括天气、气候和气候变化及其对农业、交通、能源等行业领域影响分析的专题性决策气象服务信息,也可以是针对某一类事件的综合评价。在2018年台风“山竹”、2019年台风“利奇马”登陆我国期间,中央气象台提供的准确及时的气象决策服务为防灾减灾决策提供了科学依据。

随着近年来台风预报服务水平的提高和防台减灾能力的提升,我国在防台减灾工作上取得了很大的成效,台风死亡人员数较以前有明显减小。以

1409 超强台风“威马逊”为例,“威马逊”是 1949 年以来登陆大陆强度最强的台风之一,登陆海南文昌时中心附近最大风力达 17 级以上(65 m/s),属于极端强度台风。受“威马逊”影响,海南、广东西南部、广西及云南南部多地出现严重洪涝灾害,部分地区出现交通、电力、通讯中断。登陆前 5 h,海南省政府根据中央气象台和海南省气象台的预报和决策建议,果断发出命令,不惜一切代价转移登陆点附近翁田镇周边 25 km 范围内所有瓦房、危房内的群众,将人员伤亡降到了最低程度。根据事后统计,这次过程共有 46 人死亡,直接经济损失 338.6 亿元。对比 1973 年以相同强度登陆海南的 7314 号台风 Marge,在海南共造成 903 人死亡,其中登陆点琼海最为严重,死亡高达 771 人,“威马逊”的人员死亡远远小于 7314 台风。这表明近些年我国在防台减灾方面取得了很大的进展,这与中央气象台的台风预报和决策服务能力的提升、同时科研能力的提升及科研转化为业务能力的提升是密切相关的。

## 2 从中央气象台台风预报的发展历程体会到必须不忘初心,以满足人民日益增长的美好生活需求;做好台风预报必须以实际需求为牵引,科研和业务并重

中央气象台于 1950 年 3 月 1 日正式成立,迄今已走过了近 70 a 的发展历程,从最初的通过中央人民广播电台向社会发布各种灾害性天气警报,到成为中央电视台收视率最高的节目,中央气象台这个品牌早已融入到百姓的日常生活,也见证了我国气象服务事业不断完善、不断提高的发展进程。台风预报服务一直作为中央气象台的主要任务之一,初期的台风预报主要是基于有限常规观测资料的天气图分析方法来追踪台风主要影响天气系统的发展演变,并据此来制作台风预报(包括路径和强度)。在 20 世纪 60 年代气象卫星问世之前,中央气象台的台风定位定强主要依靠美国飞机探测得来,从 1968 年底越南战争停战期开始美国就逐步减少了原先定强的西北太平洋和南海的探台飞行计划,对我国的台风定位定强工作带来了一些影响。1969—1970 年前后,中央气象台的预报员就开始用大气所研究的卫星资料探讨定位方法(APT),中央气象台开创了根据台风云型结构进行台风定强的工作,中央气象台的台风定位定强工作并没有因为美国探台飞机的减少而受到大的影响。新中国成立以来,我国气

象部门逐步积累了大量的台风资料,1969 年由中央气象台和上海市气象局牵头,会同广东、广西、福建、浙江、江苏、山东等省(自治区)气象局,以及南京气象学院、山东海洋学院和中国人民解放军海军司令部航海保证部,在上海成立了台风年鉴整编协作组,收集、整编热带气旋资料,经过三年多的努力,出版了 1949—1971 年的《台风年鉴》,形成了中国第一套逐 6 h 分辨率的热带气旋最佳路径资料集以及热带气旋所导致的风雨潮资料集。1972—1980 年,《台风年鉴》整编工作由上海市气象局牵头,中央气象台和各省市(自治区)气象局协助,逐年出版《台风年鉴》。截止到目前为止已经先后出版了 70 a 的台风年鉴。这套资料收录了 70 a 间西北太平洋和南海海域的台风路径强度和风雨影响的大量数据,它成为西北太平洋和南海海域国际公认的三套台风最佳路径数据集之一,这为台风业务和科研工作提供了非常宝贵的历史资料信息,这也成为台风大数据分析的重要基础数据,为进一步开展人工智能预报奠定坚实的基础。中央气象台台风预报的发展也离不开数值预报的贡献,1993 年中央气象台第一代区域台风模式建成,紧接着王诗文等同志开始探索集合预报系统的研发工作,随后逐渐开发出相应的数值预报产品供预报员参考使用,开始为台风业务预报提供客观的技术支撑,标志着中央气象台的台风预报由传统的天气图分析方法向以数值预报为基础的、预报员根据预报经验和对数值模式进行检验、并适时进行订正的现代台风业务预报的转变。随着观测资料的不断增加、探测手段的不断丰富和 2005 年基于 MICAPS 系统的台风预报平台的建立,中央气象台在台风预报业务和相关的研究上取得了显著的进展,对台风形成原因、演变过程和内部结构和动力机制等的认识更为清楚,台风预报能力逐步提高。2012 年中央气象台引进了 WMO 推荐使用的 DVORAK 台风定强技术方法,克服了台风业务定强的主观分析差异,实现了我国台风业务定强分析流程与国际的接轨。2010 年中央气象台开始在台风业务工作中应用多个集合预报模式产品,2012 年只自主研发出了基于集合预报数据的台风路径客观订正方法(TYTEC),很快投入业务应用,钱奇峰等(2014)对其进行了多年的持续改进。近十几年来中央气象台的台风预报准确率有较明显的提高,特别是自 TYTEC 方法投入业务应用以来,中央气象台在台风路径预报方面取得了明显进展,5 d 及以内预报时效的台风路径预报误差都较以前有明显

的减小趋势。近 5 a(2013—2018 年)针对所有西北太平洋和南海的 134 个台风,中央气象台的台风 24、48、72、96 和 120 h 台风路径预报平均误差分别为 73、132、203、278 和 381 km,均明显优于日本气象厅和美国联合台风警报中心的台风路径预报水平。就台风强度预报而言,尽管在技术上仍没有取得根本的突破,但是中央气象台的台风强度预报能力也在逐步提高,并且近 5 a(2013—2018 年)台风 24、48、72、96 和 120 h 台风强度预报平均误差分别为 4.4、6.3、6.7、7.7 和 8.0 m/s,也均明显优于日本气象厅和美国联合台风警报中心的台风强度预报水平。目前中央气象台的台风定位定强及路径强度预报水平与世界先进的台风预报中心的水平基本相当。近年来中央气象台在台风强降水预报方法方面也取得了较明显的进展,陈博宇等(2016)开发了面向台风暴雨的集合预报成员优选订正方法,提出一种业务上可用的针对单模式集合预报的台风降水实时订正技术(简称集合成员优选技术),并且已经在中央气象台的台风强降水预报中得以应用。结果表明,在登陆台风暴雨过程预报中,集合成员优选技术对改进集合统计量降水产品有明显的效果,并较 ECMWF 确定性预报产品有一定优势;该方法对改进短期时效预报产品的效果优于中期时效预报,对大暴雨评分的改进高于对暴雨和大雨的评分。

中央气象台还根据实际需求不断延长台风预报时效、不断扩大预报区域、逐步提升预报精细化程度。2015 年起中央气象台就可以提供我国责任海区内编号台风的 120 h 预报时效的预报,对 24 h 警戒区以外的台风逐 3~6 h 发布 12~24 h 时间间隔的预报,对 24 h 警戒区以内的台风逐 3 h 增发 24 h 时效内 6 h 间隔的预报和增发逐小时的台风定位定强信息。除了对西太平洋和南海海域的台风开展预报外,中央气象台还制作全球其他海域(中东太平洋、大西洋、加勒比海、南太平洋和印度洋)的台风(飓风)活动监测公报。特别是为配合国家的一带一路和海上丝绸之路的发展战略,中央气象台从 2017 年正式开展北印度洋台风预报业务,以后还将逐步开展全球所有海域的台风监测预报业务。

从中央气象台台风预报的发展历程我们体会到必须不忘初心,以满足人民日益增长的美好生活需求。做好台风预报必须以实际需求为牵引,科研和业务并重,不断高标准满足各部门要求,做到这点,必须有科学思维及正确的指导思想,为此我们发表以下几点看法。

### 3 中国台风业务中的很多重要科学技术问题是从业务需求中提炼出来的,不是从文献中找出来的

尽管近 10 a 来中央气象台在台风预报能力上逐渐提升,预报水平与国际先进水平不相上下,但在台风业务预报中还存在很多困扰预报员的问题,对有些路径疑难或强度变化疑难的台风的认识还不够深入,导致了较大的预报偏差,同时对台风的影响预报(包括强风、强降水、台风灾害)的能力还有限,成为影响台风预报服务效果的主要瓶颈。重要的科学技术问题包括:对一些长预报时效的台风路径和强度的预报仍存在较大的偏差,这可能与不同天气系统的可预报性不同有关;对多台风情况下数值模式预报的台风路径预报稳定性差,这可能与台风路径对初始场改变的敏感性、台风之间的相互作用、台风与其主要影响系统的相互作用等有关;对于台风的快速增强和近海加强的预报能力不足,经常出现或高估或低估的偏差,一方面是受缺乏精细化的台风观测资料的制约,对台风内部结构的认识还不够全面,另外对台风强度变化的动力机制认识不够清楚也是重要原因;对于有些登陆后的台风的路径、强度变化和风雨影响程度的预报仍存在较大的偏差,其部分原因可能与热带和副热带系统间存在较明显的相互作用有关,并且随着预报时效的延长,模式对于不同天气系统的预报能力和天气系统间的相互作用的预报能力也逐渐削弱了;另外在台风影响预报方面,由于台风风雨影响分布具有不均匀性,局部地区灾害影响可能特别重,因此防台减灾工作对台风精细化预报提出了越来越高的要求,需要更精准更精细的预报,但目前中央气象台对台风强降水的落区和强度的预报还经常会出现较大的预报偏差,尚没有能力准确预报出台风风雨的精细特征,特别是对台风极端强降水的量级和落区的预报能力不足,出现以上问题的根本原因除了对台风过程中产生降水的复杂动力机制认识不足外,对导致台风登陆后结构变化的原因、以及由台风结构变化而带来的台风强降水性质的变化和降雨强度变化的机制认识不到位,可能也是导致上述预报能力受限的原因;再有在台风灾害评估方面,中央气象台目前仅能够提供有限种类的台风灾害预(评)估产品,包括大风破坏力、基于建筑标准的对低矮房屋的影响、暴雨灾害综合影响评估等,还很难满足防台减灾决策部门的需求,一方面原因是相关地理信息和历史台风相关数

据的缺乏,另一方面的原因还是在台风风雨分布和强度与致灾的关系和机理方面的认识比较欠缺。

中央气象台多年的业务实践表明,与业务台风预报相关的重要科学技术问题大都是我们从我们国家自己的业务需求中提炼出来的,其中很多属于台风研究前沿问题,当然也可以从文献中找到一些参考。

#### 4 预报员应该是第一线的灾害性天气的监测者和研究者

提高预报准确率是中央气象台永远追求的目标,并且永远在路上。尽管现代的台风预报已经是建立在数值预报基础上做的,并且数值模式的预报能力越来越强了,但一个真正的预报员绝不会拿模式结果直接用,而是在理解模式结果的基础上,再结合对实况资料的分析、前期的模式检验结果、预报经验和天气概念模型等对模式结果进行解释应用,并在必要时做出适当的订正。同时我们也看到,尽管近10 a来中央气象台的年平均台风路径预报误差有较明显减小的趋势,但是每年还是会有路径预报误差大和强度预报误差大的台风存在,如2010年台风“鲇鱼”在南海的路径急转、2011年台风“梅花”的近海北上路径、2013年台风“菲特”初期的路径西折、2019年台风“丹纳斯”的北上路径、2019年台风“利奇马”在西太平洋的快速增强等,各种数值模式和客观预报方法对上述疑难台风的预报误差都很大,这说明尽管数值模式和相关技术已经取得明显进展,特别是集合预报系统的开发和应用能给预报员提供更加丰富的预报参考产品,但是尚不能解决所有的台风业务预报难题。

中央气象台预报员的作用绝不仅仅是做预报,同时还是研究型的预报员。研究型预报员一方面体现在预报员对数值模式产品适当的解释应用上,另一方面预报员还是成天面临大气变化的研究者,是实践中科学问题的提出者和解决科学问题的积极参与者。预报员在从事台风业务预报工作的同时,还善于从中发掘蕴含的科学问题,以供预报员和科研工作者进行深入的研究,从而推动相关台风研究方面的不断进步。2019年4月30日,中国气象局印发了《研究型业务试点建设指导意见》指出,所谓研究型业务,并非独立于现有业务之外重建,而是对原有以业务值班为主的业务升级再造,通过业务与科研的深度融合,使之兼具业务运行和科研开发双重属性和职能。推进研究型业务的目的是以科技创新驱动业务发展,以业务需求牵引科学技术进步,形成

观测自动、预报智能、服务睿智的新时代气象业务体系。中央气象台预报员的定位与上述指导意见的核心思想是非常吻合的。在这个指导方针下,中央气象台的预报员们在做好预报服务工作的同时,也取得了不少很有价值的研究成果:许映龙(2011)对1013号超强台风“鲇鱼”移入南海后路径突然北翘的原因进行了初步分析,发现南半球越赤道气流向北涌进、致使赤道缓冲带北上与“鲇鱼”东侧的副热带高压脊合并是“鲇鱼”在南海路径发生突然北翘的主要原因之一,这表明南北半球天气系统间存在着明显的相互作用,其中多尺度天气系统的相互作用和越赤道气流影响台风路径变化的动力机制是值得探讨的科学问题。关于南半球越赤道气流对北半球台风和其他天气系统会产生影响的观点其实早在20世纪50年代就由我国气象届老前辈李宪之教授提出过,但当时主要是基于理论推测得出来的,许映龙(2011)实现了这个理论在台风实际业务的应用,同时也从业务预报的角度出发,为解决数值模式对于较长预报时效(3~5 d时效)台风主要影响系统的预报能力不足的问题,认为采用台风路径多模式集成预报或超级集合预报可能是解决上述业务预报难题的有效途径之一。张玲等(2014)运用天气学分析和动力学诊断的方法探讨台风“海燕”强度发展的动力机制和快速移动的原因,发现东西带状西太平洋副热带高压北侧的副热带西风急流加强南压是导致位于副热带高压南侧的台风出现快速移动和强度明显加强的主要原因之一,而副热带西风急流的加强南压导致台风中心附近动力强迫明显加强的动力机制是值得深入研究的科学问题,这个问题以前没有被关注过。张玲在2009年初召开的台风海洋专家组会议上提出,0806台风“风神”中心西侧长时间维持的中尺度对流云团可能与其路径持续向偏西方向调整及路径预报误差大有关。南京信息工程大学的沈新勇等(2012)与张玲合作,利用中尺度非静力数值模式WRF对“风神”的移动过程开展了高分辨率数值模拟,并利用模拟资料,采用PV- $\omega$ 分部位涡反演方法定量分析了台风外围中尺度对流系统对台风运动的影响,认为PV- $\omega$ 分部位涡反演方法能够很好地分离出台风外围中尺度对流系统,其对台风引导气流的贡献可达到20%左右。研究还发现在“风神”移动过程中,中尺度对流系统之所以造成较大影响,是由中尺度对流系统与台风相对位置变化不大所致,这从理论上证实了中尺度对流系统对台风路径的可能影响,为南海台风的业务路径

预报提供了一定的理论技术支撑。1013 台风“鲇鱼”在南海出现接近直角的北翘,中央气象台对其路径预报误差明显偏大,没能及时报出这样的路径转折。南京信息工程大学倪钟萍等(2013)与张玲合作,分析了 2005—2010 年西北太平洋上台风突变路径的预报误差及其相联系的环流形势。通过分析北折突变路径发现,中央气象台对北折突变路径的预报误差明显偏大,北折突变路径突变时刻,24 h 预报的距离误差达到 145.6 km,比平均预报误差增加了 29.3%,48h 预报的距离误差达 317.3 km,比平均预报误差增加了 68.3%;并从突变路径的物理机制方面分析突变路径预报的难点,将台风附近气流分解成低频和高频两部分。合成分析发现,两类突变路径的风场区别不仅表现在低频尺度上副热带高压的西伸程度,还表现在天气尺度上台风附近的风场分布。北折路径台风在天气尺度上台风附近大风区呈非对称分布形式,强的西南风促使台风产生向北的加速度,且在低频场上副热带高压西侧的强偏南气流引导下,利于台风北折。以上对于台风路径突变物理机制的研究对业务台风预报提供了强大的理论技术支撑,部分结论与中央气象台许映龙(2011)对台风“鲇鱼”的研究结论是吻合的。中央气象台的预报员通过对很多典型台风的技术总结和研究,对台风路径和强度变化的原因和影响因子的认识更深入,对疑难台风的预报能力也逐渐提升。同时预报员对数值预报的认识和应用能力也在不断提升,钱奇峰(2014)利用集合预报可以反映预报不确定性的特点,开发了中央气象台台风集合订正方法(TYTEC),该方法业务应用后中央气象台台风路径预报水平得到明显提升。但同时我们也认识到,尽管 TYTEC 方法在提高业务预报准确率上是非常有效的,但是我们仍需从台风变化机理上开展深入的研究才行。

预报员是第一线的灾害性天气的监测者、业务预报者和研究者,我们的研究部门和高校也应该立足于解决国家需求,与业务部门合作,一起来解决业务中急需解决的科学技术问题,特别在台风的结构和强度变化、台风风雨的致灾机理等研究方面。

## 5 重大台风科研项目对中央气象台台风业务的积极影响

自 2000 年以来,在国家 973 计划、公益性行业专项、国家自然科学基金重点项目等支持下,在端义宏院长领导下,中国气象科学研究院和上海台风研

究所联合中央气象台针对影响我国台风的活动特征,在一些台风监测和预报关键技术上有所突破,为提高我国台风监测预报预警水平和台风灾害防御提供了一定的科技支撑。首先是设计并建设了我国首个适合登陆台风的海-陆-气一体化协同观测的海洋气象观测系统。该系统实现了固定观测和移动观测的有机结合,能够针对登陆台风三维流场特征、边界层结构、海-气交换和风雨精细分布等进行协同观测,为认识登陆台风异常变化物理过程机制提供了第一手观测资料。整编并建立了亚太地区的台风多源资料库,广泛应用于国内外台风监测预报、气候变化和极端台风事件的深度分析研究。台风外场试验数据为国家重点科研项目研究提供完整的直接观测依据,台风预报评估数据集使预报关键技术的改进更具针对性,台风预报数据集及台风风雨数据集则直接应用于基于影响的防台减灾决策。相关资料被世界气象组织全球热带气旋资料库收录,并参与国际资料交换和比较计划,为国际台风预报示范项目的实施提供强有力资料支撑。另外还积极开展了台风数值预报关键技术研究,建立了台风数值预报系统,使我国台风数值预报水平进入国际先进行列,并在台风同化方法、多元资料同化技术、初值形成技术和物理过程参数化等方面取得突破。此外还开展了台风客观预报释用和融合技术的研发,为突破登陆台风精细化预报的技术瓶颈做了一些尝试。最后在台风超级集合预报、多源资料融合和降尺度技术研究等方面也取得显著进展,其中台风大风半径分析和预报、台风风场释用技术、暴雨宏微观物理过程模式定量分析和应用技术等填补了我国台风风雨精细化预报技术业务空白。以上部分成果已经在中央气象台逐步开始试用,对台风业务工作起到了一定的技术支撑作用。另外,台风突变或异常变化方面也一直是业务预报单位和研究人员都非常关注的问题。陈联寿和丁一汇(1979)认为异常路径往往形成于基本气流弱、或者台风对基本气流有明显反馈以及几方面的引导力量相互作用的环境里,其间包含了极为复杂的动力学问题。近年来在这方面有很多新的研究成果,端义宏等(2014)研究表明台风与季风涡旋的相互作用(Wu et al., 2011)、台风周围的中尺度对流系统(沈新勇等, 2012)、下垫面状况等都可能影响台风路径的变化(赖巧珍等, 2013),台风内核结构的变化(Wang and Wang, 2013)、高空冷涡和台风环流的上下叠置(Li et al., 2012)、台风之间的相互作用(Xu et al., 2011; 徐洪雄等, 2013)等

则可能导致台风强度的明显变化。上述研究成果对中央气象台的台风业务预报提供了一定的理论指导。

## 6 提高台风业务能力的有效途径

### 6.1 业务部门、大学和科研单位应把预报员综合素质的提高作为责无旁贷的任务,这是体现大气科学为人民服务的宗旨

尽管现代的气象预报都是以数值预报为基础来制作的,但是对预报员综合素质的要求越来越高,既要具有对各种常规和非常规实况观测资料的综合分析能力;同时还要具备扎实的天气动力学功底,对影响台风路径和强度以及风雨变化的不同尺度不同层次的天气系统及其演变有深入的理解;还要善于运用一些新观测手段得来的资料和新的预报技术及客观预报方法来辅助预报,增强对预报的技术支撑;还应具有科学的思维方式,能够综合实况分析、各种预报方法、预报员的经验等对数值预报结果进行合理的解释应用,并在必要时进行订正;特别是要对高影响和灾害性天气的发生具有高度的敏感性,能够及时发布相关的预报和预警。预报员以上综合素质的提高一方面是通过学习提高专业理论水平,另一方面主要通过通过对疑难台风或预报不成功台风的预报技术总结工作和针对台风的深入研究。这一方面有助于预报员加深对台风变化机理的认识,提升预报能力,另一方面能够挖掘出预报过程中一些值得深入研究的科学问题,提供给预报员和相关科研人员去研究,提升科研素养。

### 6.2 重视对数值预报的检验评估和客观方法的研发

目前预报员在台风业务预报中可以用到丰富的数值预报产品,包括确定性预报、集合预报产品、各种客观预报产品等,首先重视对数值预报的检验评估工作是用好一切数值预报产品的基础,是必须要做好的首要工作,检验评估工作做得越细致对预报应用的指导性越强,同时也能为数值预报提供急需改进的方向。其次要重视对数值预报产品的解释应用工作,重点开展针对台风强度、台风强风和强降水的客观预报方法的研发工作,以提供给业务预报中参考。特别需要继续加强集合预报的台风预报业务应用研究。相较单一确定性模式,集合预报能提供更多预报信息(Cheung, 2001),可通过偏差订正技术、成员优选技术、多统计量集成等技术,从海量数据中提取最有可能的预报结论(代刊等, 2018a),从而支持目前以确定性为主的预报业务;能够提供未

来多个可能的预报场景,从而增加了对于低概率极端天气的捕捉能力,尤其适合台风的预报预警。此外,集合预报的最重要功能在于反映天气演变的不确定性及其程度,预报员和用户可以通过概率订正技术、集合敏感性分析(代刊等, 2018b)等多种技术和产品来帮助其理解和传递可预报性信息(Cheung, 2001; Titley et al., 2020)。

### 6.3 继续发展高分辨率台风数值模式和台风集合预报系统,重点研究台风环流内部的中尺度系统的变化规律

尽管目前台风路径预报水平已经较高,但是对于台风强度预报来说,不管是从业务预报、数值预报、还是研究的角度都没有取得明显的技术突破,很多研究表明高分辨率数值模式可以在很大程度上改善对台风强度预报的问题,并且对于台风精细结构的认识和台风精细化风雨影响预报也很大程度依赖于高分辨率数值模式的发展,为此继续发展高分辨率台风数值模式,仍然是提高台风强度预报和精细化风雨影响预报能力的重要途径之一,主要包括改进模式台风涡旋的动力初值化方案、开展适用于台风的云微物理过程参数化方案的研究、优化模式陆地上大气边界层的参数化等。当然还需要同时发展台风中尺度集合预报系统,以解决台风强度预报的不确定性和台风环流内部的中尺度系统的变化规律。

### 6.4 开展登陆台风精细化结构演变特征及其机理研究

开展对登陆台风精细化结构演变及其机理的研究是解决台风强度变化机制和研究台风精细风雨分布特征的必要基础,主要包括:环境背景气流和下垫面性质对台风结构的影响、台风结构变化过程中可能的内核动力和热力过程,探讨环境因子与内部过程的相互作用及其对台风结构的影响、台风边界层与对流相互作用对台风强度和结构的影响机制等。

### 6.5 开展登陆台风精细化结构对风雨强度和分布的影响机理研究

登陆台风精细结构对其大风和降水强度究竟产生怎样的影响,登陆台风云微物理结构和主要微物理过程对其大风、降水可能产生怎样的影响,这是在实际台风预报过程中一直困扰预报员的问题,为此需要开展以下研究:登陆台风大风、降水精细化分布特征和演变机制;登陆台风精细化结构对其大风和降水强度的影响及可能机制;登陆台风云微物理结构特征及变化机理等,并开展登陆台风强降水和强

风的数值预报释用技术研究。

#### 6.6 掌握社会经济人文发展状况,深入开展登陆台风灾害影响风险评估方法的应用研究,重点在风险预评估

登陆台风灾害影响评估工作在实际台风预报服务中越来越受关注,为此急需开展相关的研究工作,主要包括:从自然灾害的两个基本要素(致灾因子和承灾体的脆弱性及暴露度)着手,开展台风灾害风险区划研究;以登陆台风的两个主要致灾因子(强风和强降水)的预报不确定性分析为基础,重点研究台风强风和强降水灾害的风险预评估技术,发展针对不同承灾体的影响等级概率预报方法和致灾风险预评估技术等。

#### 6.7 推进 AI 技术在台风预报中的应用

人工智能(Artificial Intelligence,简称 AI)是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。AI从本质上是对人的思维的信息过程的模拟,从其诞生以来,理论和技术日益成熟,应用领域也不断扩大,当然也包括在气象领域的应用上,其中将大数据分析、机器学习、深度学习等技术应用到天气气候研究和应用领域,已成为热点方向。在台风领域,近年来,AI技术应用研究呈现显著上升趋势。如在台风强度定强方面,Wimmers et al.(2019)利用深度卷积神经网络(CNN)从卫星被动微波图形上估计台风强度的概率,研究结果表明其准确度可与飞机勘测相比较,显示出极大的业务应用前景。同时,Chen et al.(2019)同样使用CNN方法从卫星图像上定强,显示较目前业务中的Dvorak技术具有更强的客观性和连续性。在热带气旋强度突变方面,Fischer et al.(2019)采用机器学习的降维方法对热带气旋与高空槽之间的相互作用进行分类研究,识别出有利于热带气旋快速增强的环流配置。在台风强度预报方面,Cloud et al.(2019)基于前馈神经网络研发了台风强度短期预报技术,交叉检验显示该技术能够有效提升HWRP的台风强度预报精度。Ghosh and Krishnamurti(2018)将广义神经网络技术与多模式超级集合预报相结合,显示较任意单一模式具有更

好的预报能力,尤其对于中长期预报。此外,Seongchan(2018)在利用卷积长短期记忆神经网络(ConvLSTM)进行台风路径预报方面进行了尝试。Wu et al.(2018)采用遗传算法将集合预报结果进行集成,用于开展台风降水预报。中央气象台也在积极与北京邮电大学等高校合作,开展基于深度学习的台风定强技术研发,并取得了初步的成效,以后还会继续进行这方面的尝试。

## 7 结论和讨论

中央气象台自成立以来始终不忘初心,台风预报一直是主要任务之一,是从国家经济发展的气象保证迫切需求中来的,所以其业务及研究都是从实际需求为出发点,最后落实到改进预报效果上。中央气象台踏踏实实做好台风预报预警和相关科研工作,不追求文章篇数和国际排名,把论文写在我国的台风防台减灾的实际工作中。中央气象台是研究型业务单位,预报员是研究性预报员,既是第一线的灾害性天气的监测者,又是业务科学问题的提出者和研究参与者,呼吁我们的研究部门和高校也把部分立足点建立在解决国家需求,与业务部门合作一起来解决业务中急需解决的科学技术问题上,特别在台风异常变化的机理研究方面,最好能形成行之有效的应用思路与技术。尽管中央气象台的台风预报能力已经明显提高,但是还是不能满足不断精细化的防台减灾需求,主要表现在对台风异常变化的预报能力、台风精细化预报能力、台风灾害预评估能力等的不足上,而以上问题的解决只能依靠科技支撑,为此提出了提高台风业务预报的有效途径,包括预报员综合素质的提高、重视对数值预报的检验评估和客观方法的研发、继续发展高分辨率台风数值模式和台风集合预报系统,重点研究台风环流内部的中尺度系统的变化规律、开展登陆台风精细化结构演变特征及其机理研究、开展登陆台风精细化结构对风雨强度和分布的影响机理研究、深入开展登陆台风灾害影响预(评)风险评估方法的应用研究,重点在风险预评估、推进AI技术在台风预报中的应用等。

## 参考文献(References)

- Chen B F, Chen B, Lin H T, et al., 2019. Estimating tropical cyclone intensity by satellite imagery utilizing convolutional neural networks[J]. *Wea Forecasting*, 34(2): 447-465.
- 陈博宇, 郭云谦, 代刊, 等, 2016. 面向台风暴雨的集合预报成员优选订正技术研究及应用试验[J]. *气象*, 42(12): 1465-1475.
- Chen B Y, Guo Y Q, Dai K, et al., 2016. Research for the ensemble member optimization correction technique on typhoon rainstorm forecast and its application ex-

- periment[J]. Meteor Mon, 42(12):1465-1475. (in Chinese).
- 陈联寿, 丁一汇, 1979. 西北太平洋台风概论[M]. 北京: 气象出版社: 262-318. (in Chinese).
- Cheung K K W, 2001. A review of ensemble forecasting techniques with a focus on tropical cyclone forecasting[J]. Meteorol Appl, 8(3):315-332.
- Cloud K A, Reich B J, Rozoff C M, et al., 2019. A feed forward neural network based on model output statistics for short-term hurricane intensity prediction[J]. Wea Forecasting, 34(4):985-997.
- 代刊, 毕宝贵, 朱跃建, 2018a. 2016年7月华北极端降水的中期预报误差分析[J]. 科学通报, 63(3):340-355. Dai K, Bi B G, Zhu Y J, 2018a. Investigation of the medium-range forecast errors for the extreme rainfall event in North China during July 19—20, 2016[J]. Chin Sci Bull, 63(3):340-355. (in Chinese).
- 代刊, 朱跃建, 毕宝贵, 2018b. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. 气象学报, 76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018b. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteorol Sin, 76(4):493-510. (in Chinese).
- 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等, 2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. 气象学报, 72(5):969-986. Duan Y H, Chen L S, Liang J Y, et al., 2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling[J]. Acta Meteorol Sin, 72(5):969-986. (in Chinese).
- Fischer M S, Tang B H, Corbosiero K L, 2019. A climatological analysis of tropical cyclone rapid intensification in environments of upper-tropospheric troughs[J]. Mon Wea Rev, 147(10):3693-3719.
- Ghosh T, Krishnamurti T N, 2018. Improvements in hurricane intensity forecasts from a multimodel superensemble utilizing a generalized neural network technique[J]. Wea Forecasting, 33(3):873-885.
- 赖巧珍, 吴立广, Shie Chung-lin, 2013. 0908号台风“莫拉克”登陆过程中海表温度变化特点及其对“莫拉克”的影响[J]. 热带气象学报, 29(2):221-234. Lai Q Z, Wu L G, Chunglin s, 2013. Sea surface temperature response to typhoon morakot (2009) and the influence on its activity[J]. J Trop Meteor, 29(2):221-234. (in Chinese).
- Li Y, Guo L, Xu Y, et al., 2012. Impacts of upper-level cold vortex on the rapid change of intensity and motion of Typhoon Meranti(2010)[J]. J Trop Meteor, 18(2):207-219.
- 倪钟萍, 吴立广, 张玲, 2013. 2005—2010年台风突变路径的预报误差及其环流背景[J]. 气象, 39(6):719-727. Ni Z P, Wu L G, Zhang L, 2013. Analysis on forecasting errors and associated circulations of sudden typhoon track changes during 2005:2010[J]. Meteor Mon, 39(6):719-727. (in Chinese).
- 钱奇峰, 张长安, 高拴柱, 等, 2014. 台风路径集合预报的实时订正技术研究[J]. 热带气象学报, 30(5):905-910. Qian Q F, Zhang C A, Gao S Z, et al., 2014. Real-time correction method for ensemble forecasting of typhoon tracks[J]. J Trop Meteor, 30(5):905-910. (in Chinese).
- Seongchan K, 2018. DeepTC: ConvLSTM network for trajectory prediction of tropical cyclone using spatiotemporal atmospheric simulation data[C]// 32nd Conference on Neural Information Processing Systems(NeurIPS 2018). Montréal, Canada.
- 沈新勇, 毕明玉, 张玲, 等, 2012. 中尺度对流系统对台风“风神”移动路径影响的研究[J]. 气象学报, 70(6):1173-1187. Shen X Y, Bi M Y, Zhang L, et al., 2012. The impact of mesoscale convective systems on the track of Typhoon Fengshen(2008)[J]. Acta Meteorol Sin, 70(6):1173-1187. (in Chinese).
- Titley H A, Bowyer R L, Cloke H L, 2020. A global evaluation of multi-model ensemble tropical cyclone track probability forecasts[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(726):531-545.
- Wang Y, Wang H, 2013. The inner-core size increase of Typhoon Megi(2010) during its rapid intensification phase[J]. Tropical Cyclone Res Rev, 2(2):65-80.
- Wimmers A, Velden C, Cossuth J H, 2019. Using deep learning to estimate tropical cyclone intensity from satellite passive microwave imagery[J]. Mon Wea Rev, 147(6):2261-2282.
- Wu L G, Liang J, Wu C C, 2011. Monsoonal influence on typhoon morakot (2009). Part I: observational analysis[J]. J Atmos Sci, 68(10):2208-2221.
- Wu M C, Yang S C, Yang T H, et al., 2018. Typhoon rainfall forecasting by means of ensemble numerical weather predictions with a GA-Based integration strategy[J]. Atmosphere, 9(11):425.
- 徐洪雄, 徐祥德, 陈斌, 等, 2013. 双台风消过程涡旋能量、水汽输送相互影响的三维物理图像[J]. 气象学报, 71(5):825-838. Xu H X, Xu X D, Chen B, et al., 2013. The structure change and energy moisture transport physical image in the development and decay processes of binary typhoon vortices[J]. Acta Meteorol Sin, 71(5):825-838. (in Chinese).
- Xu X D, Lu C, Xu H X, et al., 2011. A possible mechanism responsible for exceptional rainfall over Taiwan from Typhoon Morakot[J]. Atmosph Sci Lett, 12(3):294-299.
- 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).
- 薛建军, 王维国, 王秀荣, 等, 2010. 决策气象服务回顾与展望[J]. 气象, 36(7):69-74. Xue J J, Wang W G, Wang X R, et al., 2010. Review and prospect of meteorological decision-making services[J]. Meteor Mon, 36(7):69-74. (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 fast-moving of No.1330 typhoon Haiyan[J]. Meteor Mon, 40(12):1464-1480. (in Chinese).

## The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center

LI Zechun<sup>1</sup>, ZHANG Ling<sup>1</sup>, QIAN Qifeng<sup>1</sup>, MA Suhong<sup>1</sup>, XU Jing<sup>2</sup>, DAI Kan<sup>1</sup>,  
CHEN Yun<sup>1</sup>, WANG Yuedong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Meteorological Center(NMC), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

With the continuous progress and improvement of numerical prediction technology and comprehensive detection system, the typhoon operational prediction of the Central Meteorological Center has made remarkable progress in the past decade, especially the operational prediction level of typhoon track, which has basically reached the international advanced level, but the progress in the prediction of typhoon intensity, wind and rain impact and typhoon risk assessment is relatively slow. This paper reviews the severity of typhoon disaster in China, the importance of Typhoon Forecast in the Central Meteorological Center, the development of Typhoon Forecast of CMC, the role of typhoon forecaster in CMC, the proposal and solution of major scientific problems in typhoon operation, and the promotion and guidance of major scientific research projects for typhoon operation in CMC. Some effective ways to improve the operational typhoon forecast ability in the future are put forward.

**typhoon forecast; scientific research and development; ensemble forecast; artificial intelligence**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200110015

(责任编辑:刘菲)