

热带气旋集合预报技术的应用情况简介

沈越婷^{1,2,3} 钱传海³ 李泽椿³ 范广洲²

(1 北京市怀柔区气象局, 北京 101400; 2 成都信息工程大学, 成都 610225; 3 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 数值集合预报技术的不断改进和升级促进了热带气旋集合预报技术的发展和應用, 热带气旋集合预报在日常业务中发挥着越来越重要的作用。概述了ECMWF、NCEP、JMA和CMA等全球主要数值预报中心的热带气旋集合预报技术, 总结了当前热带气旋集合预报产品在路径、强度、风雨及生成预报等方面的应用, 对未来热带气旋集合预报的发展和應用进行了展望。

关键词: 热带气旋, 集合预报, 路径预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.004

A Review on Applications of Tropical Cyclones Ensemble Prediction Technologies

Shen Yueting^{1,2,3}, Qian Chuanhai³, Li Zechun³, Fan Guangzhou²

(1 Huairou Meteorological Bureau of Beijing City, Beijing 101400 2 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225 3 National Meteorological Centre, CMA, Beijing 100081)

Abstract: The development and advancement of numerical ensemble prediction technologies have improved tropical cyclone (TC) ensemble forecasts and their applications. TC ensemble forecast has played a more and more important role in TC routine operations. This paper summarizes the TC ensemble prediction systems of ECMWF, NCEP, JMA AND CMA, overviews the applications of TC ensemble prediction on TC' track, intensity, precipitation and genesis forecasts etc., and looks into the future development and application of TC ensemble predictions.

Keywords: tropical cyclone, numerical ensemble prediction, track forecast

0 引言

热带气旋 (tropical cyclone, TC) 业务预报的核心支撑来自于数值预报。数值预报技术的发展, 为预报员提供了准确性越来越高、时效性越来越长、表现形式越来越丰富的指导产品, 推动了TC预报业务的快速发展。近20年来全球TC路径预报取得了长足进步。中央气象台24h台风路径预报误差和20年前相比减少了80~100km, 48h路径预报准确率与20年前的24h预报准确率相当, 72h路径预报准确率甚至高于20世纪90年代初48h预报水平^[1]。而在北大西洋, 2010年1~3d的飓风路径预报误差和15年前相比减少了50%, 4~5d的误差和10年前相比减少了40%^[2]。

数值天气预报是现代天气业务的第一次革命, 预报员正是站在数值预报这一“巨人”肩膀上使得TC路

径预报效果稳步提高。然而, 数值预报不是万能的, 即便再好的数值模式有时也会出现较大的偏差^[3], 2008年的强台风“风神”、2010年超强台风“鲇鱼”、2011年超强台风“梅花”和“南玛都”等, 由于ECMWF等数值模式的确定性预报出现较大偏差, 导致预报员对台风登陆点的预报出现较大误差, 引起较大的社会反响。

大气的混沌特性表明大气状态的演变对初始场非常敏感, 即便初始场的微小误差 (这种误差甚至小到预报员无法注意到) 也可能导致完全不同的预报结果^[3-5]。所以, 对于单一的确定性数值模式而言, 即便拥有“最好”的初值, 也永远无法做出完美的数值预报。针对这一问题, Epstein^[6]和Leith^[7]首先提出集合预报思想。相对于确定性数值模式只进行一次数值积分, 集合预报就是对模式初始场加入一系列小扰动, 再利用这些扰动初始场进行数值积分, 从而得出未来天气演变的多种可能性。除对初始场进行扰动外, 一些集合预报系统还对模式物理过程进行不同组合来开展集合预报 (多物理过程集合预报), 而另一些集合预报系统则采用多个模式进行集合预报 (多模式集合预报系统)。

收稿日期: 2014年2月20日; 修回日期: 2014年10月10日
第一作者: 沈越婷 (1988—), E-mail: anna88516@163.com
通信作者: 钱传海 (1968—), E-mail: chqian@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局2013年小型基建项目“灾害性天气预报业务系统的改进与升级 (二期) 一台风监测预报业务改进”

集合预报是减小因初始条件不确定性、模式物理过程不确定性及模式不确定性对数值预报结果产生影响的有效方法。集合预报系统通常包括一个与集合预报成员具有相同分辨率,但是没有进行初始扰动和模式扰动的控制预报,也有个别的集合预报系统完全由集合成员组成。集合预报能提供比单一确定性模式更为丰富的信息。如果所有集合成员做出的预报非常相似,无疑就会增强预报员的信心,如果不同集合成员给出的预报非常发散,那就预示着未来天气发展具有较多不确定性。集合预报包含了天气演变的不确定性估计,不同用户在应用集合预报产品时可依据成本和损失比做出最优的决策,因而能得到更多的经济效益^[8-9]。

在前期研究探索和数值试验后,美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)^[10-12]和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)^[13]于1992年12月率先建立了各自的全球集合数值预报业务系统。集合预报已越来越广泛应用于中、短期天气预报和短期气候预测^[14-19]。集合预报的业务化应用是现代天气业务的第二次革命^[20]。

集合预报技术应用于TC的数值预报研究起始于20世纪90年代中期^[21-32]。而随着计算机性能的快速提高和资料同化技术的发展,TC集合预报在近十年来逐步投入业务应用。2004年ECMWF依托其集合预报系统(一个控制预报和50个扰动预报)开始发布全球TC集合预报产品,包括TC中心位置、海平面最低气压、中心附近最大风速和TC袭击概率等^[33]。

TC集合预报在TC业务预报中发挥着越来越重要的作用,预报员在使用集合预报产品方面积累了愈发丰富的经验,开发了更有针对性的解释应用产品。下文首先对我国TC日常业务预报中常涉及的ECMWF、NCEP、日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)和中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)等全球数值预报中心的TC集合预报系统进行阐述,然后分析TC集合预报产品在实际业务中的应用,最后进行讨论和展望。

1 全球主要数值预报中心TC集合预报系统

1.1 ECMWF的TC集合预报系统

1992年12月,ECMWF与NCEP建立了全球最早的集合预报系统,标志着集合预报从研究和试验阶段正式走向业务应用^[21, 33-35]。

集合预报的核心之一是初始场扰动技术。不同的集合预报系统构造初始扰动,或估计初始场的不确定性的方法各有不同。ECMWF最初基于奇异向量法

(singular vector, SV)来构造其初始扰动成员^[13, 36],SV值越高,表示在规定时间内(即最优间隔)扰动增长就越快,扰动增长的快慢是导致预报不确定性增加与否的主要因素。考虑到热带地区的扰动增长机制不同于热带外地区,对于热带地区,当有TC时计算湿SV值,以此来表征TC内部及附近区域的分析误差^[35, 37-39];在热带外地区,ECMWF分南、北半球(或冬、夏半球)分别计算SV值,否则会使夏半球的SV值偏小^[34]。

ECMWF早期的集合预报系统并没有考虑模式的不确定性问题。1998年10月ECMWF开始使用随机参数化扰动方案(stochastic perturbed parameterization tendencies, SPPT)^[40]对物理参数化过程中的敏感因子进行扰动,以期增加集合离散度,提高概率预报技巧^[34];2009年9月ECMWF对SPPT方案进行了修订^[41];2010年10月将能量补偿方案(spectral stochastic backscatter scheme, SPBS)^[42-44]与修订后的SPPT算法一同用于业务集合预报系统。

由于早期较低的分辨率和初始扰动技术的局限性等,ECMWF全球集合预报系统并不适用于TC预报。随着计算机性能的快速提升及持续的技术变革,ECMWF不断优化和升级其集合预报系统,其中包括:四维变分资料同化(4D-VAR)技术的改进、大量极轨卫星和静止卫星观测资料的应用、海气耦合模式的改进、初始场扰动技术由SV升级为演化的奇异向量法(evolved SV)并进而升级为集合资料同化-奇异向量法(ensemble of data assimilation SV)等^[45-47]。另外,ECMWF一直致力于提高其集合模式水平分辨率和垂直分辨率:1992年12月ECMWF建立了基于T63L19模式的集合预报系统;至2006年,ECMWF建立了可变分辨率的集合预报系统,即1~10d的预报采用T_L399L62,10~15d的预报采用T_L255L62^[33-34, 37];至2010年,1~10d的集合模式升级为T_L639L62,而10~15d的集合模式升级为T_L319L62^[34]。同时集合成员也由最初的33个上升到现在的51个(表1)。

尽管ECMWF全球集合预报系统的预报着眼点并不在TC,也不像NCEP或其他集合预报系统那样针对TC采用涡旋重定位技术(vortex relocation technique),但由于其在热带地区(30°N—30°S)构造扰动成员时计算TC的湿SV值,并考虑了非绝热物理过程效应,因而使得ECMWF集合预报系统在预报TC时非常有效^[48]。

从2004年10月始,作为常规业务产品的一部分,ECMWF开始发布TC集合预报产品,包括TC中心位置、海平面最低气压和中心附近最大风速及TC袭击概

表1 ECMWF、NCEP、JMA、CMA (热带气旋) 集合预报系统参数概况

初始扰动方法	模式不确定性	模式分辨率	预报时效/d	集合成员	预报时次/UTC	涡旋重定位技术
ECMWF	EDA-SV	SPPT-SPBS 可变的分辨率: T ₁ 639L62 (1~10d) T ₁ 319L62 (10~15d)	15	51	0000 1200	/
NCEP	ETR	STTP 可变的分辨率: T ₁ 255L42 (0~8d) T ₁ 190L42 (8~16d)	16	20	0000,0006 1200,1800	是
JMA	SV	STTP T ₁ 319L60	5.5	11	0000,0006 1200,1800	是
CMA	BGM	/ T ₁ 213L31	5	15	0000 1200	是

注: ①表中各参数为截至2013年6月30日的数据;

②JMA、CMA各运行2套集合预报系统, 即常规集合预报系统和TC集合预报系统, 表中数据为JMA和CMA TC集合预报的相关参数;

③截至2013年6月30日, 上述各集合预报系统所对应之确定性数值预报模式分别为T₁1279L137 (ECMWF)、T₁1148L64 (NCEP)、T₁959L60 (JMA) 和T₆39L60 (CMA)。

率产品等^[45]。上述TC集合预报图形类产品可在ECMWF官方网站(www.ecmwf.int)上获取(图1), 相应的文字类产品经全球通信系统(Global Telecommunication System, GTS)向WMO各成员发放。

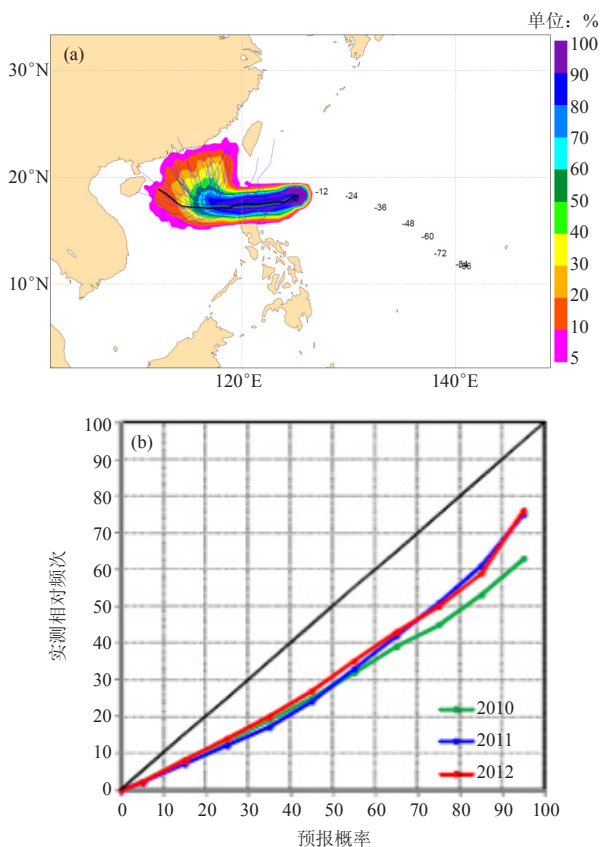


图1 (a) 基于ECMWF集合预报系统的TC袭击概率产品(图中个例是2010年超强台风“鲑鱼”, 预报起始时刻为2010年10月17日1200UTC); (b) ECMWF 2010—2012年TC袭击概率产品评估

1.2 NCEP 热带气旋集合预报系统

NCEP全球集合预报系统采用了与ECMWF不同的初始场扰动方法, 即增殖向量法(breed vector, BV)^[10, 23], 并在1992年建立的集合预报系统中投入

业务应用。BV方法的局限性在于其初始扰动方差是由不随时间变化的气候场分析误差限定的, 且扰动之间并未接近正交^[21]。2006年5月NCEP在其升级后的集合预报系统中使用重新尺度化集合转换技术(ensemble transform with rescaling, ETR)生成集合预报初始扰动成员^[49]。ETR方法生成的各扰动之间接近正交, 同时保留了BV法依流型变化, 代表误差最快增长的非线性扰动, 以及计算资源耗用少的优点。目前NCEP集合成员数由最初的2个增加为现在的20个, 每日0000, 0600, 1200和1800UTC起报。NCEP集合预报系统其预报时效达16d, 水平分辨率于2010年2月升级为T190, 到2012年NCEP再次提高了分辨率, 将0~8d的分辨率提高到T255L42, 8~16d维持原来的T190L42。

在模式的不确定性方面, NCEP从2010年2月起使用随机全倾向扰动法(stochastic total tendency perturbation, STTP)^[50-52], 增加集合离散度, 减少集合平均预报中的系统误差。

NCEP全球集合预报系统在处理TC时与ECMWF最大的不同之处在于使用了涡旋重定位技术^[53]。涡旋重定位技术的核心是先在模式初值场中确定涡旋位置, 然后将模式涡旋从环境场中分离出来, 随后将涡旋移到其被观测位置。如果初值场中的涡旋比实际观测弱, 则加入人造涡旋(bogus vortex)予以修订。涡旋重定位技术在2000年首先用于NCEP的全球确定性模式GFS(Global Forecast System), 2004年修订版的涡旋重定位技术被移植到NCEP的全球集合预报系统(Global Ensemble Forecast System, GEFS)。涡旋重定位技术的应用使NCEP热带气旋路径预报的发散度明显减少, 同时其集合平均路径误差比没有涡旋重定位的要小得多(图2)。

1.3 JMA 热带气旋集合预报系统

JMA运行两套业务集合预报系统, 其一是常规的全球中期天气预报集合系统, 其二是台风集合预报系

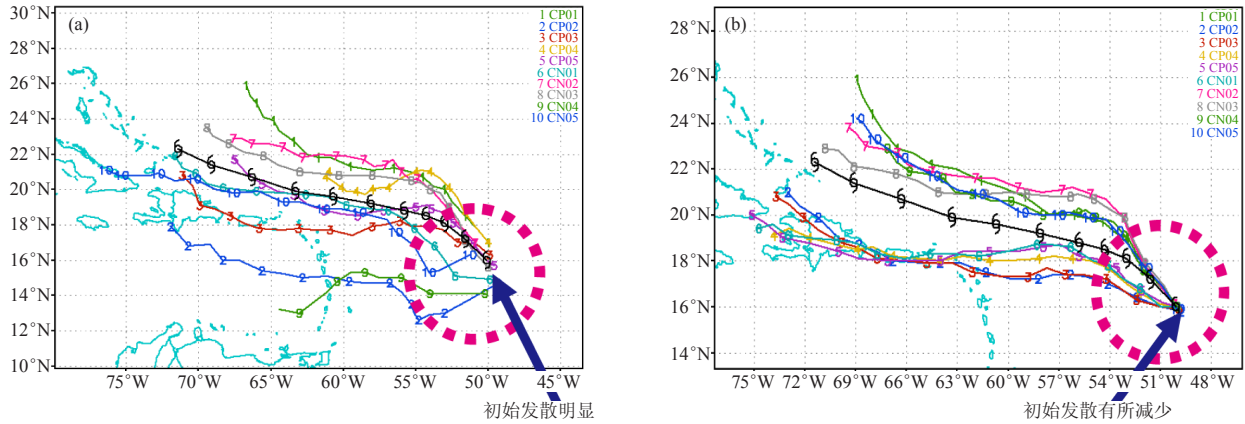


图2 NCEP集合预报系统对北大西洋飓风Frances (2004年8月28日00时) 的路径预报^[54]
(a) 没有涡旋重定位时飓风路径预报; (b) 经涡旋重定位后飓风路径预报

统 (Typhoon Ensemble Forecast System, TEPS), 前者有51个成员, 后者有11个成员。

经过2007年5—12月的准业务运行和评估后, 2008年2月, JMA建立了业务化的台风集合预报系统TEPS。与ECMWF集合预报系统一样, TEPS也是利用SV方法构造集合成员, 但两者最大的差别在于目标区域和权重模^[35]的选定。对于TEPS而言, 湿SV的计算限定在整个热带地区 (20°S—30°N), 而不是像ECMWF那样只限定在TC及其附近区域, 而干SV的计算则限定在北半球 (30°—90°N)。另外, TEPS并没有其自身的资料同化系统, 而是依赖于JMA的全球 (确定性) 模式系统GFS来为其提供初始条件^[55-56]。当下列两个条件同时被满足时, 由JMA的值班预报员启动TEPS: (1) 已有TC位于日本东京区域台风中心责任区域内 (0°—60°N, 100°—180°E), 或预计未来24h有TC移入上述责任区内; (2) TC最大平均风速超过34节 (1节=0.514m/s, 34节约为17.5m/s, 相当于我国热带风暴的强度), 或预计未来24h内TC的强度能达到上述阈值。

TEPS一次能同时追踪3个TC, 如果责任区内同一时间有4个TC存在时, 则需要进行人工干预, 按其影响或受关注程度选出3个目标TC进行作业^[57]。TEPS一天运行4次, 其预报起始时刻分别是0000、0006、0012和0018UTC, 预报时效为132h。JMA正计划对其台风集合预报系统进行升级, 除提高分辨率外, 其集合成员将由11个增加到25个, 期望能进一步改进台风预报效果^[58]。

1.4 CMA 热带气旋集合预报系统

1996年9月, CMA建立了基于T63L16的中期集合数值预报系统并投入试运行^[6], 采用时间滞后平均法生成扰动初值。1998年6月CMA将T63L16的中期集

合数值预报系统升级为T106L19集合预报系统, 并于2001年3月实现业务运行。该系统采用SV生成初始扰动, 集合预报成员为32个。针对该系统存在的系统发散度低、集合平均预报技巧与控制预报相当、集合预报的产品与效果检验产品不足等问题, 2006年底CMA对原有集合预报系统进行了升级, 建成了一套基于增长模繁殖法 (breeding growing mode, BGM) 的T213全球集合预报系统。该系统所用计算资源较少, 预报效果提高, 概率预报技巧大幅度被改善, 给出了分析误差的分布特点, 并以此构造了控制误差增长幅度的地理掩模方案; 同时, 开展了集合预报产品的偏差订正, 以期改善系统偏差, 丰富概率预报产品。

2008年6月, CMA将全球ATOVS资料三维变分同化系统应用到T213集合预报系统中, 进一步提高了集合预报系统的性能。2010年之后, 试验并实施了集合转换 (ensemble transform, ET) 初值扰动方法和物理过程扰动。目前正在进行以全球T639系统为主体的集合预报升级工作。

2006年, CMA在T213全球集合预报背景场扰动基础上开发了TC集合预报系统。由于TC路径数值预报业务模式采用T213全球模式集合预报系统的控制预报, 使得TC的涡旋强度在TC生成初期偏弱, 导致T213全球模式集合预报系统在预报TC路径时有时偏差较大。为了改进这一缺点, TC集合预报系统将TC涡旋初始化技术引入到扰动背景场中, 经过对扰动分析场中浅涡旋的强度调整使得分析场中的涡旋强度同观测更加接近。TC路径集合预报系统于2007年7月进入实时运行阶段, 有TC时每天两次启动业务, 提供120h预报。

2 TC集合预报产品应用

随着TC集合预报技术的不断发展和集合预报产品的不断丰富, TC集合预报产品越来越被广大业务和科

研人员所接受，在日常TC预报中发挥着越来越重要的指导作用。

TC路径集合预报发散度的大小可以用来度量TC路径预报信心指数^[35, 59-60]，当集合成员发散度较小时，预示着未来TC移动较为稳定，路径预报误差也较小；当集合成员发散度较大时，预示着路径预报的不确定性较大，路径预报误差也较大。

事实上，在TC集合预报面世之前，已有业务或科研人员尝试了一种简单的集合预报技术，也被称为“穷人”的集合预报技术，即将不同的确定性模式或官方预报结果进行简单的平均。这种方法多用于TC路径预报，今天已习惯称之为TC路径集成预报。Goerss^[59]认为，考虑到不同模式的相对独立性，基于不同模式的简单集合（或集成）的TC路径预报结果，一般来讲，要比其中任一单个模式的预报更加准确。Elsberry等^[60]研究了西北太平洋TC路径集成预报发散度与集成平均误差的关系，并提出了一种先剔除误差大的成员后再将剩余成员进行平均的集成方法，这种有选择性的集成方法比所有成员的集成平均预报效果要好。Williford等^[61]则利用多元回归技术计算不同成员的权重系数，经过加权平均后的TC路径集成预报比单一模式预报结果有明显改进。早期TC集成预报技术为后来TC集合预报的应用奠定了思路 and 基础。

2.1 TC集合预报产品在TC路径预报中的应用

除开发众多TC集合预报相关应用产品外，在TC集合预报应用方面我国预报员也逐步由定性走向定量。Qi等^[62]利用ECMWF、JMA、NCEP和CMA的TC集合预报资料，提出了两种TC路径预报方法，即选择性简单平均和选择性加权平均（图3），并对

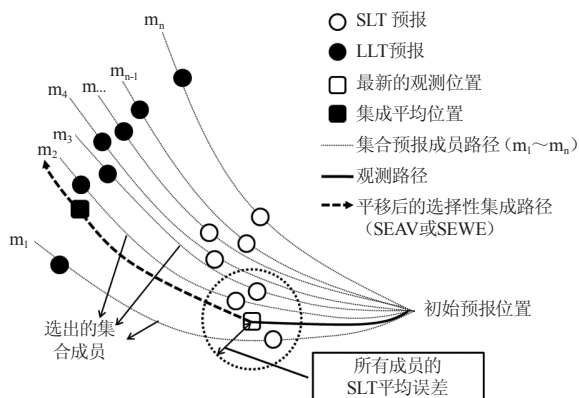


图3 选择性简单/加权平均示意图^[62]

（虚线圆圈半径表示所有集合成员短时效（short leading time, SLT）内的平均路径预报误差，圆圈中心的小方框表示TC最新观测位置。该图例显示只有3个成员的短时效误差小于集合平均误差，因而被选中做长时效(long leading time, LLT)的路径预报（如图中黑方框所示））

2010—2012年西北太平洋35个台风个例进行了预报试验和效果评估。结果表明，选择性简单平均的预报效果要好于加权平均，而相对于单一模式的集合平均预报效果而言，选择性简单集成方法在72hTC路径预报误差方面有5%~30%的改进率。选择性简单/加权平均方法的关键在于“有效成员”的选取，其选取标准是在已知当前TC实况位置的前提下，评估全体集合成员在过去短时效内（如从模式起报时刻1200UTC至次日0000UTC）的预报误差，凡是预报误差小于集合平均误差的成员皆被选为有效成员。

张长安等^[63]、钱奇峰等^[64]基于ECMWF的TC集合预报产品，发展了另外一种适用于台风路径业务预报的TC集合预报订正方法。该方法与Qi等^[62]选择性简单/加权平均方法相同之处在于根据集合成员过去短时效内（如6~12h）表现优劣的基础上，优选出误差较小的成员进行平均，而不同之处在于成员数量的选取。钱奇峰等^[64]在统计分析ECMWF集合预报系统2010—2012年TC路径预报效果后，提出了不同预报时效（24~96h）应选择不同的最佳成员数（图4）进行简单平均，从而达到更好的预报效果。该方法在2012—2013年中央气象台的试用结果显示基于优选成员的集合平均比ECMWF所有成员的集合平均要好，目前该方法已在中央气象台的TC路径预报中得到应用，并已成为TC路径预报最有效的指导产品。

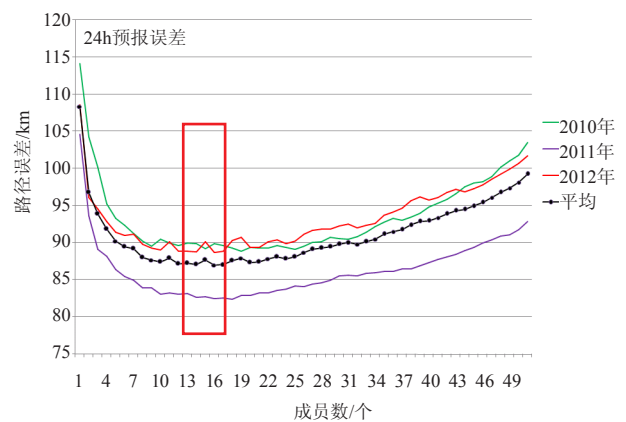


图4 基于ECMWF集合预报的TC路径预报订正方法中最佳成员数的选取（红色方框显示当最佳成员数为13~17个时，24h TC路径预报误差为最小）

从图5可以看出，EC确定性模式和集合平均的准确性相比较，在短时效内（24~48h）两者基本相当，如确定性预报的24h误差为69km，而集合平均的误差为68km。当时效延长时，集合平均的结果要好于确定性模式，72~120h集合平均分别比确定性模式的误差要分别小6，6和35km，这正好体现了集合预报的优势。若考虑模式结果的可用性（模式的前

12h基本用不上），无论确定性模式还是集合模式其准确性大打折扣，确定性模式的24h路径预报误差由69km增大为98km，集合平均的24h误差由68km增大为100km，而此时，集合订正方法展现了其优势，24h误差只有82km。

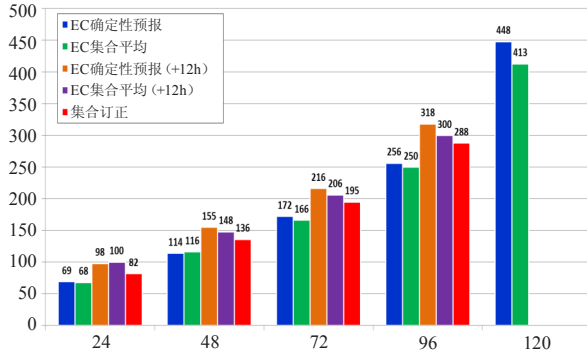


图5 2013年不同方法（EC确定性模式、EC集合平均及基于EC集合预报订正方法）台风路径预报误差比较

（EC确定性预报和EC集合平均是指确定性模式及集合预报各时效路径预报误差；EC确定性预报（+12h）是指从模式起报时刻顺延12h后再进行相应时效的误差评定，因为当模式完成资料收集、积分、后处理并将预报结论发送到预报员手上时，基本上已过去了8~12h，即模式的前12h预报对预报员来讲并没有发挥其作用，所以评定模式误差时应从其发挥作用的时效开始；同上，EC集合平均（+12h）是指从集合预报系统起报时刻顺延12h后再进行相应时效的误差评定）

2.2 TC 集合预报产品在 TC 强度预报中的应用

过去二十年来世界各国在TC路径预报方面取得了长足发展，但TC强度预报准确率仍停滞不前^[1]。目前业务中仍广泛使用统计方法、气候持续法或统计动力相结合的方法等开展TC强度业务预报。TC集合预报虽然提供TC强度预报，如TC中心附近最大风速（图6）和海平面最低气压预报，但由于模式本身还不能准确描述TC内核结构及TC强度变化物理过程，因此TC强度集合预报目前只能为预报员提供TC强度变化趋势，如TC强度未来是增强还是维持或减弱等，为最终强度预报提供定性参考。目前，世界各国对TC强度集合预报的订正能力或定量应用水平远不及TC路径集合预报。另外，如前所述，ECMWF集合预报系统本身并不像NCEP或CMA集合预报系统对台风涡旋做过重定位技术处理，也没有对涡旋强度进行重新调整，因此，即便其路径集合预报稍好于其他几个集合预报系统，但就其强度集合预报水平而言并不具备任何优势。相对于集合预报系统，同时期的业务确定性模式具有更高的分辨率，更先进的资料同化技术，或更完善的物理参数化方案等优势，预报员更倾向于参考其强度预报结果。如何提高TC强度集合预报应用水平，除需要不断总结和挖掘经验外，最根本的还是要提高

模式本身对TC的强度预报水平。

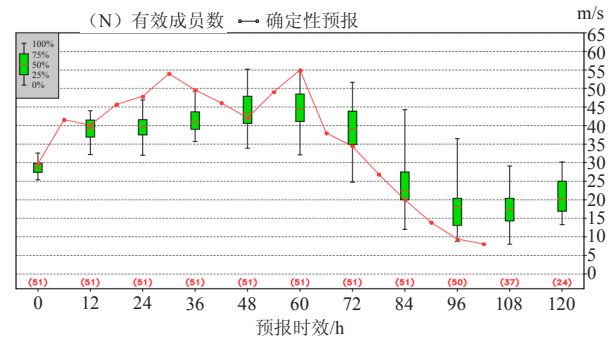


图6 基于ECMWF集合预报的台风苏力（SOULIK）的最大风速离散度图

2.3 TC 集合预报产品在 TC 降水预报中的应用

由于TC路径和强度预报的不确定性，使得TC降水预报更具挑战性。基于集合预报的直接概率、贝叶斯模型平均（bayesian model averaging, BMA）和逻辑回归等方法，可以定量地描述TC降水的概率密度函数，从而提供TC不同量级降水（如小雨、中雨、大雨和暴雨等）的发生概率，进而提高TC不同量级降水的准确率。另外，针对确定性模式对TC降水极值总是偏弱的特点，集合预报成员中降水最大值、降水90%分位数等信息可以为TC最大降水量预报提供有效参考，从而弥补确定性预报对TC降水预报偏弱的缺陷。同时，基于集合预报的极端天气预测指数（Extreme Forecast Index）可以提供极端降水风险提示^[3]。当然，集合预报的应用，尤其是对TC路径集合预报的订正技术已经在某种程度上提高了TC路径预报准确率，进而为提高TC降水预报奠定了一定基础。

2.4 TC 集合预报产品在 TC 生成预报中的应用

TC生成预报与TC强度预报一样，是TC业务或研究领域另一个世界性难题。此前多是应用统计方法，或根据海温、切变或潜热释放等开展TC生成预报^[65]。

Daniel等^[66]对CMC、ECMWF、GFS、NOGAPS和UKMET五个全球模式（确定性模式）对北大西洋2004年以来的约140个热带风暴生成预报进行了评估。结果表明，模式预报TC生成的能力随时间和空间而变化，并且每年表现最好的模式都不相同。空间分析表明不同的模式对某一特定区域的TC生成预报有优势；时间分析的结果则不出所料，模式的预报能力随着预报时效延长而降低。当多个模式预报同一个TC生成事件时，那么TC生成概率会显著增大。整体而言，模式对TC的生成预报有一定能力，但其空报率也较高^[67]。

TC集合预报为开展TC生成预报提供了新的手段，朱跃建指出可根据全球集合预报系统制作TC生成

的概率预报,关键是要对不同集合预报系统找寻其可靠的TC生成判据或标准,然后可据此制作多模式TC生成预报产品^[67]。

日本气象厅基于THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)数据集资料,评估了ECMWF、JMA、NCEP以及英国气象局(UKMO)全球集合预报系统对2009—2012年台风主汛期(7—10月)西北太平洋TC生成预报效果^[68],结果显示,所有的集合预报系统都能至少提前5 d成功预报TC的生成。

NCEP根据其集合预报系统已实时制作北大西洋和西北太平洋TC生成的概率预报产品,其总体思路是选择一些能描述TC初始涡旋的特征物理量,如对流层低层850hPa(700hPa、海平面)最大相对涡度、850hPa(700hPa)最小位势高度、850hPa(700hPa)最大风速、海平面气压梯度等;然后基于统计分析对上述物理量设定阈值,如涡旋附近最大风速须大于5m/s,850hPa最大涡度大于等于 $10^{-4}s^{-1}$,并且300~500hPa层的温度异常大于 $0.5^{\circ}C$,当这几个条件全部满足时,认为该涡旋将发展。

对集合预报而言,若某集合成员预报在T时刻内(24或48h等)满足TC生成的阈值条件,则认为该成员将在T小时内预报有TC生成,“生成成员数/集合预报总成员数”即为该涡旋在T小时内的生成概率(图7)。如果集合预报的多数成员预报某海域将有TC生成,那么预报员则要认真考虑这种可能性^[48,69-71]。

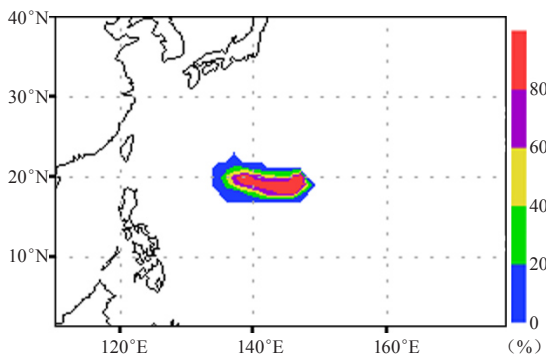


图7 基于NCEP集合预报的TC未来48h生成概率(2013年7月7日1200UTC)。随后,在该海域生成当年第7号热带风暴“苏力”,中央气象台于2013年7月8日00UTC开始进行编号

2.5 TC集合预报产品在TC异常路径预报中的应用

虽然台风路径预报在过去20年间取得了长足进步,预报准确率稳定提高,但每年仍会遇有一些路径较为异常的台风,特别是当环境场快速调整,或多系统相互作用等复杂情况下,台风路径预报不确定性明显增加,预报误差往往较大。2008年强台风“风神”、2010年超强台风“鲇鱼”、2011年超强台

风“南玛都”、2012年强台风“启德”等都是近几年出现的典型个例,由于ECMWF等数值模式的确定性预报出现较大的系统性偏差,导致预报员对台风登陆点的预报出现较大误差。单一的确性模式不足以作为预报员提供未来环流形势演变的丰富信息,此时集合预报的优势得以显现,因为它包含了未来天气形势演变的多种可能性和概率分布特征。Qian等^[72]基于ECMWF集合预报资料对2010年超强台风“鲇鱼”在南海异常北翘的动力学机制和可预报性进行了分析。首先将集合成员分成两组,即转向组和西行组,每组10个成员(图8),进而对这两组路径所对应的环流形势和引导气流等进行合成分析,结果表明台风涡旋大小和早期移动快慢等对后期路径北折起着重要作用。

当面对复杂路径,或当TC集合预报路径发散度较大时,如何发掘集合预报的有用信息,如何从众多集合成员中“找寻真相”,尽力降低预报的不确定性,仍是摆在预报员面前的难题。集合预报的聚类分析技术^[3](是指在特定区域,把在相空间中演变状况相似的集合成员组成一组,并以此提取集合预报概率分布的最重要信息)提供了某种思路,即可将TC集合预报路径进行分簇,通过合成分析不同路径簇所对应的形势场差异,为TC异常路径预报提供参考。

3 结语与展望

相对于单一确定性模式而言,集合预报能提供未来天气演变的多种可能性,是减少预报不确定性的有效方法。集合预报产品越来越得到广大预报员的认同,在日常业务预报中发挥着越来越重要的作用。

随着整个集合预报技术的发展,作为集合预报的重要组成部分,TC集合预报近些年也取得了很大的进展。世界各主要数值预报中心针对TC的集合预报技术不尽相同,JMA和CMA等建立了专门的TC集合预报系统,而ECMWF和NCEP等虽然没有建立独立的TC集合预报系统,但依托其全球集合预报技术的整体优势和对目标TC特殊的技术处理,展示了很好的TC集合预报效果。

TC集合预报产品成为TC预报业务的重要参考:预报员针对实际业务需求开发了众多TC集合预报指导产品,积累了较为丰富的TC集合预报应用经验,开发了基于TC路径集合预报的订正技术、不同量级降水指导产品和TC生成概率预报产品,显示了很好的应用效果;但TC集合预报产品在强度预报方面的应用尚显不足。

集合预报技术目前仍处于进一步发展中。集合预报系统的预报能力通常和它采用的模式的预报能力相当,且具有它所使用的模式的所有系统误差。因此,

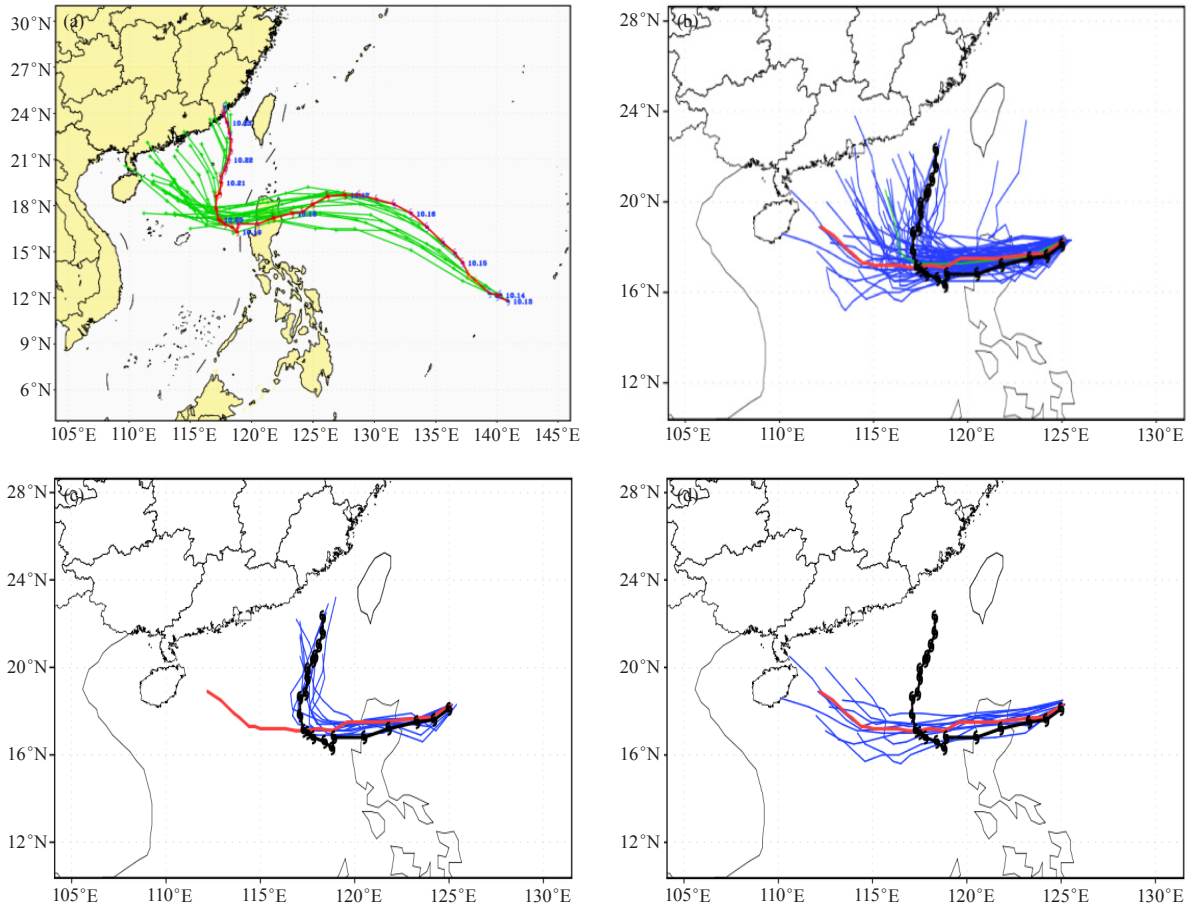


图8 2010年超强台风“鲑鱼”路径预报

(a) 中央气象台路径预报 (对转向点的预报基本失败); (b) ECMWF 2010年10月17日1200UTC的TC路径预报 (蓝线为集合预报, 路径发散度较大, 近一半的成员转向北上, 另一半继续西行; 绿线为集合平均路径; 红线为确定性模式预报; 黑线为实况路径); (c) 转向组 (线条说明同b); (d) 西行组 (线条说明同b)

集合预报相对于确定性预报而言只是“锦上添花”，集合预报技术的进步依赖于模式本身的发展和集合预报技术的改进，包括模式物理过程和参数化方案的改进、模式分辨率的提高、集合成员数的增加等。当然，涡旋初始化及其扰动技术、物理过程的扰动技术作为TC集合预报的重要技术环节应予以持续的关注和改进。另外，由于目前全球TC集合预报系统的分辨率还不够精细，尚不能反映TC的精细结构，导致TC集合预报产品在强度和降水预报的应用效果明显不如其在TC路径预报的效果好，因此现阶段还应大力发展TC区域集合预报系统。由于集合预报与集合同化无可避免地联系在一起，因此集合同化（如EnKF）是TC区域集合预报系统的重要发展方向。相对于TC全球集合预报，区域集合预报技术难度也稍大，除了全球集合预报应该考虑的技术之外，还需要考虑边界扰动、大尺度不确定性的影响等；同时，由于需要考虑TC更精细的结构，TC涡旋的结构性扰动也需要有特别的技

术。当然，随着计算机性能的快速提高，如果未来全球集合预报系统的分辨率能达到5km或更高，那时，区域集合预报系统是否还有存在的必要值得商榷，但这至少将是10年以后的事情。

集合预报含有比确定性预报丰富得多的信息，作为预报员如何尽可能利用这些信息来提高预报的准确性，同时又将预报的不确定性科学地、定量地告知用户则还有很多工作要做。随着集合预报的普及和公众科学素养的提高，公众将会更倾向接受含有不确定性的预报信息，而不是由预报员“自作主张”地将预报的不确定性隐藏起来而告知他们一个唯一的、貌似“确定”的结果。当预报的不确定性或预报误差可以定量描述时，用户将可以据此做出更好的决策，同时也会变得更能够容忍我们预报中的小失误^[73]。因此，集合预报的快速发展必将推动一些新的产品，特别是不确定性信息或概率产品的开发和应用。

另外，随着网络技术的飞速发展，预报员

已能实时获取世界各主要数值预报中心的集合预报产品, 如何实现众多集合预报产品在业务平台上便捷高效地显示, 如何让预报员从海量集合预报信息中快速攫取“有用”信息, 则对TC业务平台的建设提出了更高要求。

参考文献

- [1] 钱传海, 端义宏, 麻素红. 我国台风业务现状及其关键技术. 气象科技进展, 2012, 2(5): 36-43.
- [2] Cangialosi J P, Franklin J L. 2010 National Hurricane Center Forecast Verification Report, 2011, 77. http://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification_2010.pdf.
- [3] WMO. Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting. WMO, 2012, 23. http://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1091_en.pdf.
- [4] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. J Atmos Sci, 1963, 20: 130-141.
- [5] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. Tellus, 1965, 17: 321-333.
- [6] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. Tellus, 1969, 21: 739-759.
- [7] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. Mon Wea Rev, 1974, 102: 409-418.
- [8] Joslyn S, Pak K, Jones D, et al. The effect of probabilistic information on threshold forecasts. Wea Forecasting, 2007, 22: 804-812.
- [9] Nadav-Greenberg L, Joslyn S. Uncertainty forecasts improve decision-making among non-experts. J Cognitive Eng Deci Making, 2009, 3: 209-227.
- [10] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breed method. Mon Wea Rev, 1997, 125(12): 3297-3319.
- [11] Tracton M S, Kalnay E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center. Wea Forecasting, 1993, 8(3): 379-398.
- [12] Tracton M S, Du J. Short range ensemble forecasting (SREF) at the National Center for Environmental Prediction. Beijing: WMO Workshop on the Use of Ensemble Prediction, 2000.
- [13] Molteni E, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. Quart J Roy Meteor Soc, 1996, 122(529): 73-119.
- [14] 王晨稀, 梁旭东. 热带气旋路径集合预报试验. 应用气象学报, 2007, 18(5): 586-593.
- [15] 杜均. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 2002, 13(1): 16-28.
- [16] 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. 应用气象学报, 2002, 13(1): 1-15.
- [17] Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al. Using ensembles for short-range forecasting. Mon Wea Rev, 1999, 127(4): 33-446.
- [18] 王晨稀, 端义宏. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究. 应用气象学报, 2003, 14(1): 69-78.
- [19] 李俊, 杜均, 王明欢, 等. 中尺度暴雨集合预报系统研发中的初值扰动试验. 高原气象, 2009, 28(6): 1365-1375.
- [20] 端义宏, 金荣花. 我国现代天气业务现状及发展趋势. 气象科技进展, 2012, 5: 6-11.
- [21] 王晨稀. 热带气旋集合预报研究进展. 热带气象学报, 2013, 29(4): 698-704.
- [22] Krishnamurti T N, Ricardo C T, Rohaly G, et al. Physical Initialization and Hurricane Ensemble Forecasts. Wea Forecasting, 1997, 12: 503-514.
- [23] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. Bull Amer Meter Soc, 1993, 74: 2317-2330.
- [24] Zhang Z, Krishnamurti T N. Ensemble forecasting of hurricane tracks. Bulletin of the American Meteo Soc, 1997, 78: 2785-2795.
- [25] 黄燕燕, 袁金南, 万齐林, 等. 基于BDA扰动法的台风路径集合预报试验研究. 热带气象学报, 2006, 22(1): 49-54.
- [26] 黄小刚, 费建芳, 陆汉城. 基于集合Kalman滤波数据同化的热带气旋路径集合预报研究. 大气科学, 2007, 31(3): 468-478.
- [27] 黄小刚, 费建芳, 陆汉城, 等. 基于集合Kalm滤波数据同化与偏差修正的热带气旋集合预报研究. 气象学报, 2010, 68(1): 79-87.
- [28] 朱永褪, 程戴晖. 热带气旋路径动力使用预报的集合预报方案. 气象科学, 2000, 20(3): 229-238.
- [29] 朱永褪, 程戴晖. 热带气旋路径动力释用预报方案的业务应用和集合预报试验. 大气科学研究与应用, 2000, (2): 1-10.
- [30] 程戴晖, 朱永褪. 热带气旋路径的一种动力释用预报方法的研究. 大气科学研究与应用, 1995, (2): 43-48.
- [31] 周霞琼, 张秀珍, 端义宏, 等. 滞后平均法(LAF)在热带气旋路径集合预报中的应用. 气象科学, 2003, 23(4): 410-417.
- [32] 陈德辉. 美国数值预报研究动态与业务进展. 气象, 1998, 24(12): 3-6.
- [33] Buizza R, Bidlot J R, Wedi N, et al. The new ECMWF VAREPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System). Quart J Roy Meteor Soc, 2007, 133: 681-695.
- [34] 麻巨慧, 朱跃建, 王益兴等. NCEP、ECMWF及CMC全球集合预报业务系统发展综述. 大气科学学报, 2011, 34(3): 370-380.
- [35] Yamaguchi M, Majumdar S J. Using TIGGE data to diagnose initial perturbations and their growth for tropical cyclone ensemble forecasts. Mon Wea Rev, 2010, 138(9): 3634-3655.
- [36] Buizza R, Palmer T N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. J Atmos Sci, 1995, 52: 1434-1456.
- [37] Barkmeijer J, Buizza R, Palmer T N. Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. Quart J Roy Meteor Soc, 2001, 127:685-708.
- [38] Puri K, Barkmeijer J, Palmer T N. Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. Quart J Roy Meteor Soc, 2001, 127: 709-731.
- [39] Leutbecher M, Palmer T N. Ensemble forecasting. J Comput Phys, 2008, 227(7): 3515-3539.
- [40] Buizza R, Miller M, Palmer T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. QJ R Meteorol Soc, 1999, 125: 2887-2908.
- [41] Palmer T N, Buizza R, Leutbecher M, et al. 2009. Stochastic parametrization and model uncertainty // ECMWF tech memo No.598, ECMWF, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK.
- [42] Shutts G J. 2004. A stochastic kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems // ECMWF tech memo No. 449, ECMWF, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG29AX, UK.
- [43] Shutts G J. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. Quart J Roy Meteor Soc, 2005, 131: 3079-3102.
- [44] Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al. A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system. J Atmos Sci, 2009, 66: 603-626.
- [45] Early medium-range forecasts of tropical cyclones. ECMWF Newsletter No. 102 - Winter 2004/05, 7-14.
- [46] Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF ensemble prediction system. Quart J Roy Meteor Soc, 2008, 134: 2051-2066.
- [47] Buizza R, Leutbecher M, Isaksen L, et al. Combined use of EDA and SV-based perturbations in the EPS. ECMWF Newsletter, 2010, 123: 22-28.
- [48] NHC. Technical Summary of the National Hurricane Center Track and Intensity Models. 2009,18. http://www.vos.noaa.gov/MWL/aug_09/techsummary.shtml.
- [49] Bishop C H, Toth Z. Ensemble transformation and adaptive observations. J Atmos Sci, 1999, 56: 1748-1765.
- [50] Hou D, Toth Z, Zhu Y. 2006. A stochastic parameterization scheme within NCEP global ensemble forecast system // Extended abstract, the 18th AMS conference on probability and statistics, 29 January—2 February 2006, Atlanta, Georgia.
- [51] Hou D, Toth Z, Zhu Y, et al. 2008. Impact of a stochastic perturbation scheme on NCEP global ensemble forecast system // Extended abstract, the 19th AMS conference on probability and statistics, 21—24 January 2008, New Orleans, Louisiana.
- [52] Hou D, Toth Z, Zhu Y, et al. A stochastic total tendency perturbation scheme representing model-related uncertainties in the NCEP global ensemble forecast. Submitted to Tellus, 2010.
- [53] Liu Q, Marchok T, Pan H L, et al. Improvements in hurricane initialization and forecasting at NCEP with global and regional (GFDL)

- models. Tech Procedures Bull, 2002, 472, NCEP/EMC Tech.Rep, 7.
- [54] Liu Q, Lord S, Surgi N, et al. Hurricane Relocation in Global Ensemble Forecast. 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. https://ams.confex.com/ams/27Hurricanes/techprogram/paper_108503.htm.
- [55] Kadowaki T. A 4-dimensional variational assimilation system for the JMA Global Spectrum Model. CAS/JSC WGNE Res. Act Atmos Oceanic Modell, 34: 117-118.
- [56] JMA. Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Numerical Weather Prediction Progress Rep. Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 2007, 194. <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline-nwp/index.htm>.
- [57] Yamaguchi M, Ryota S, Masayuki K, et al. Typhoon ensemble prediction system developed at the Japan Meteorological Agency. Mon Wea Rev, 2009, 137(8): 2592-2604.
- [58] WMO. Review of the activities of RSMC Tokyo 2012 by the RSMC Tokyo. 45th ESCAP/WMO Typhoon Committee session report. Hong Kong, China, 2013: 5-6.
- [59] Goerss J S. Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models. Mon Wea Rev, 2000, 128: 1187-1193.
- [60] Elsberry R L, Carr III L E.. Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts-Error versus spread. Mon Wea Rev, 2000, 128: 4131-4138.
- [61] Williford C E, Krishnamurti T N, Torres R C, et al. Real-time multimodel superensemble forecasts of Atlantic tropical systems of 1999. Mon Wea Rev, 2003, 131(8): 1878-1894.
- [62] Qi Liangbo, Hui Yu, Peiyan Chen. Selective Ensemble Mean Technique for Tropical Cyclone Track Forecast by Using Ensemble Prediction Systems. Quart J Roy Meteor Soc, 2013. doi:10.1002/qj.2196.
- [63] 张长安, 徐海明, 钱奇峰, 等. 集合预报产品在热带气旋路径预报中的使用方法研究. 福建气象, 2013, 1:16-21.
- [64] 钱奇峰, 张长安, 高拴柱, 等. 台风路径集合预报的实时订正技术研究. 热带气象学报, 2014,(5):905-910.
- [65] Zhang chao, Shu hai-long, Zhang qing-hong, et al. Prediction of tropical disturbance development over the South China Sea using SSM/I Data. J Trop Meteor, 2012, 18(2): 242-248.
- [66] Daniel J, Fuelberg H E, Hart R E, et al. An Evaluation of Tropical Cyclone Genesis Forecasts from Global Numerical Models. Wea Forecasting, 2013, 28: 1423-1445.
- [67] Report of the meeting. THORPEX ICSC GIFS TIGGE Working Group Tenth Meeting. World meteorological organization commission for atmospheric, 2012, 16..
- [68] Activities of the RSMC Tokyo - Typhoon center in 2013 [Online]. Available: <http://www.typhooncommittee.org/46th/Docs/item%206%20Activities%20RSMC/6.1%20ReviewRSMCActivities.pdf>.
- [69] Sippel J A, Zhang F. A probabilistic analysis of the dynamics and predictability of tropical cyclogenesis. J Atmos Sci, 2008, 65(11): 3440-3459.
- [70] Sippel J A, Zhang F. Factors affecting the predictability of hurricane Humberto(2007). J Atmos Sci, 2010, 67(6): 1759-1778.
- [71] Zhang F, Sippel J A. Effects of moist convection on hurricane predictability. J Atmos Sci, 2009, 66(7): 1944-1961.
- [72] Qian Chuanhai, Zhang Fuqing, Duan Yihong. Probabilistic Evaluation of the Prediction and Dynamics of Super Typhoon Megi(2010). Wea Forecasting, 2013, 28: 1562-1577.
- [73] Hamill T M, Brennan M J, Brown B, et al. NOAA's Future Ensemble-Based Hurricane Forecast Products. Bull Amer Meteor Soc, 2012, 93: 209-220.

追赶和特色：第32届中国气象学会年会及S21分会场侧记

本刊编辑部

金秋10月，中国气象学会第32届年会在天津举办。会议以“推进科技创新 支持气象现代化”为主题，进行了大会主会场和多达23个分会场的交流。此外，会议还与企业合作，举办了3场技术专题讲座。会议第21分会是大气科学前沿发展暨JMR/气象期刊编辑作者研讨会。在第一天完成大气科学前沿发展论坛的交流后，10月15日全天，包括本刊在内的气象科技期刊编辑和作者，在年会上有机会直接对话和交流。特别难得的是，来自美国地球物理联盟和美国气象学会（AMS）期刊的相关专家与会，介绍了美国气象类期刊的编辑风格和最新动态，让中国气象学者第一次比较全面地了解了美国同行的工作，深受启发。包括本刊在内的10余种中国气象期刊，以会议报告和研讨介绍两种方式介绍了各自期刊的特点，并通过圆桌讨论的方式，与AMS专家一起进行了气象类科技期刊发展方向的研讨。

AMS明年初将举办第96届年会，与美国同行相比，历史还算悠久的中国气象学会举办年会的经历也只是AMS的三分之一。但是，通过会议交流，至少中国气象期刊人在追赶国外同行的同时，其自身的特色的保持，通过年会尽情展现出来。特别是很多期刊，与国内前沿学者更好地形成了“捆绑”关系，身份是“志愿者”的期刊主编和副主编们更多地介入期刊的策划和选题，使得气象类科技期刊真正让科学家们有了“家”的感觉。而AMS同行介绍的提高论文质量和出版时间的“流水线”式的工作流程，以及论文编辑的各个工序配备专业人员把守的规则，也能启发中方与会者更多的关于打造精品期刊的思考。



AMS出版部主任Ken Heideman在会上展示AMS出版的学术期刊