

智协飞,陈雯. THORPEX 国际科学研究新进展[J]. 大气科学学报,2010,33(4):504-511.

Zhi Xie-fei, Chen Wen. New achievements of international atmospheric research in THORPEX program[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(4):504-511.

THORPEX 国际科学研究新进展

智协飞, 陈雯

(南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要:2009年9月14—18日,第三届THORPEX国际科学研讨会在美国加州蒙特利市顺利召开。大会就五个专题进行学术交流,分别是全球交互式预报系统,区域活动和交叉研究主题,可预报性和动力过程,资料同化和观测策略,社会和经济效益研究及应用。本文简要总结了参与此次研讨会的各区域、各工作组及与会专家的最新研究成果。从会议的报告来看,THORPEX的进展主要表现在改善高影响天气外场观测活动以及对如何设计全球观测系统的认识、面向TIGGE的集合预报技术的研究等。

关键词:THORPEX;TIGGE;高影响天气;集合预报;可预报性

中图分类号:P4 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-7097(2010)04-0504-08

New Achievements of International Atmospheric Research in THORPEX Program

ZHI Xie-fei, CHEN Wen

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: The 3rd THORPEX International Science Symposium was held in Monterey, California, USA during September 14—18, 2009. Presentations and posters on five themes were offered by more than 100 scientists from China, Japan, USA, Canada, UK, France, Germany and so on. This paper gives a brief review of the study on Global Interactive Forecast System-THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE), Regional Campaigns and Cross Cutting Research Themes (RCCCRT), Predictability and Dynamical Process (PDP), Data Assimilation and Observation Strategies (DAOS) and Socio-Economic Research and Application (SERA). New achievements in THORPEX show that improvements have been made in the field of high-impact weather observations, design of Global Observing System and study of multimodel ensemble forecast based on TIGGE archive.

Key words: THORPEX; TIGGE; high impact weather; ensemble forecast; predictability

0 引言

大气科学研究的新进展为天气预报及其社会效益的迅速发展提供了良机。过去二十多年科学家们对大气可预报性的局限性有了进一步认识,同时高空、地面观测系统得到了进一步的完善,资料同化技术及数值天气预报技术得到了长足的发展。

为了进一步提高天气预报准确率,世界气象组织(WMO)建立了一个为期10a的研究和发展计划,观测系统研究与可预报性试验(The Observing System Research and Predictability Experiment: a World Weather Research Program,简称WWRP/THORPEX),主要解决当今全球天气研究和预报所面临的问题,及促进解决这些问题所需要的国际业

收稿日期:2010-03-21;改回日期:2010-05-14

基金项目:2007年度公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)2007-6-1);江苏省普通高校研究生科研创新计划(N0782002020)

作者简介:智协飞(1965—),男,江苏滨海人,博士,教授,博士生导师,研究方向为数值预报、季风动力学、短期气候预测, zhi@nuist.edu.cn.

务协作和学术交流^[1-3]。

2009年9月14—18日,第三届THORPEX国际科学研讨会在美国加州蒙特利市顺利召开。来自中国、日本、韩国、美国、加拿大、英国、法国及德国等国家和地区的100多位气象学家参加了此次学术研讨。大会共有72篇主题报告,100多篇墙报,主要涉及区域计划及交叉研究主题(RCCCRT)、交互式全球大集合预报(TIGGE)、可预报性及动力过程(PDP)、资料同化及观测系统(DAOS)、社会和经济效益的研究及应用(SERA)这五个方面及一个特别主题—目标观测系统(Targeting Observations)。

1 THORPEX 的建立和区域活动及合作研究计划

1.1 THORPEX 的建立

自1904年挪威气象学家Bjerknes提出可以用某一个时刻的已知大气状态来求解一般形式的大气方程组来预报大气未来时刻的状态,1950年Charney成功地作出了第一张数值天气预报图以来,过去二十多年数值天气预报的理论及技术有了长足的发展,短、中期数值天气预报准确率有了明显提高。

1963年,Lorenz^[4-5]发现了大气中的混沌现象,天气预报的不确定性引起了众多学者的兴趣。基于这一现象,Epstein^[6]和Leith^[7]提出了集合预报的思想和方法。经过多年的研究和试验,美国国家环境预报中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)先后建立了自己的集合数值预报业务系统。随着集合数值预报的不断发展,集合预报技术在许多国家的气象中心也得到了广泛应用。概率天气预报的出现则进一步反映了大气运动的不确定性。为进一步打破可预报性的局限性和提高天气预报的准确率,2003年第14届世界气象大会决定建立一个为期10年(2005—2015年)的国际研究计划——全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)^[8]。同时,THORPEX也是WMO世界天气研究计划(WWRP)的一部分。其主要目的在于研究全球及区域范围内高影响天气系统的发生、发展及可预报性问题,设计并实现交互式预报系统,优化资料同化和集合预报系统,发展和采用新的方法以促进天气预报技巧的提高所带来的社会、经济效益,开展全球观测系统试验以及区域范围内的活动,以及建立全球大集合预报资料数据库,并向全世界推广THORPEX天气预报和业务应用的研究成果^[8]。

1.2 区域活动及 T-PARC

THORPEX先后建立了不同地区的区域委员会,这些地区包括北美(2002)、亚洲(2003)、欧洲(2003)以及南半球(2006)地区。区域委员会主要负责区域间的协作与研究计划的制定,建立和维护TIGGE资料库,加强热带地区对流活动的研究。北半球三个区域委员会还需承担亚太地区区域计划(T-PARC)的一些观测活动。T-PARC的主要目的是进一步了解和提高对热带气旋的起源、强度、移动路径及结构等的预报技巧,并与WWRP季风研究以及韩国强降水研究协作。此外,T-PARC的另一个重要组成部分是利用T-PARC观测系统对冬季风暴活动的研究^[1]。

Nakazawa等^[9]利用多探空仪资料对台风预报的影响进行了研究,认为由于该观测资料的加入使得模式的初始场更加精确,从而对台风路径的预报具有十分重要的作用,而探空资料在不同的模式中有不同的影响,造成这些不同的主要预报模式的系统误差。Bessho等^[10]则利用下投式探空仪资料及日本气象厅其他飞机观测资料对台风周边环境场进行了研究。

Jung等^[11]对台风蔷薇(Jangmi)进行了研究,认为在台风路径的短期预报中,海洋上空的资料比大陆上空的资料要相对重要一些,而在那些海洋资料中下投式仪器所获得的资料则相对更为重要。尤其在针对台风森拉克(Sinlaku)的研究中,Ohta等^[12]将奇异向量法引入台风集合预报系统,发现了这种算法在湿过程及总能量平衡中有一定的敏感性。在另一项研究中,Sanabia和Harr^[13]则讨论了台风森拉克对北半球中纬度地区的影响。通过对局地涡动动能的分析发现,在北太平洋的东、西及中部预报与观测资料有很大的差异。此外,还发现热带气旋对中纬度环流型的动能贡献也有差别。Weissmann等^[14]则利用T-PARC观测资料、ECMWF的全球模式对台风路径的预报、下游地区的预报技巧进行了探讨,认为这些观测资料的加入能够提高对台风路径的预报技巧,尤其是在台风转向前有更明显的改进。对中纬度太平洋地区的中期预报及北半球的长期预报也都有改进。

2 TIGGE 与集合预报系统的发展

2.1 TIGGE

TIGGE是THORPEX的一个重要组成部分^[1],也是全球交互式预报系统(GIFS)的奠基石。GIFS

的目标是建立一个先进的国际性的高影响天气预警系统以减少其可能带来的生命和财产损失,而实现这一目标的基础则是促进合作者之间的数据共享。有一些高影响天气出现的概率很低但是其带来的影响却是十分可观。概率预报则通过分析某一特殊事件的概率为解决这一难题提供了一种有效的方法。TIGGE 的另一个重要功能就是为全球概率天气预报的发展提供所需的数据。目前全世界共有 3 个 TIGGE 集合预报产品数据库中心,用户可通过网络直接获取所需资料。这 3 个中心收集来自全球十多个主要预报中心的集合预报产品。

2.2 集合预报

1992 年美国国家环境预报中心(NCEP)和 1994 年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)先后建立了自己的集合数值预报业务系统。随着集合数值预报的不断发展,集合预报技术在包括加拿大(CMC)、日本(JMA)、南非等许多国家也得到了广泛应用^[15]。

集合预报方法主要用来描述大气状态的不确定性^[16]。一个好的集合预报系统可滤去预报中某些不可预测的部分,减少预报误差,同时也在一定程度上也为判断预报的可信度提供了依据^[17-21]。

初始扰动的质量会直接影响到集合预报产品的质量。良好的初始扰动场应尽量真实地反映实际的分析误差,在模式中的演变方向应尽可能大地发散。目前初始场扰动方法主要有随机扰动法(MCF)^[7,17,22]、滞后平均法(LAF)^[17,22-24]、增长模繁殖法(BGM)^[17-18]和奇异向量法(SVs)^[17,25-27]等。集合预报系统还受到数值模式性能的影响。目前,集合预报的概念已经从初始场的不确定性问题延伸到模式的不确定性问题^[28-29]。此外,对集合预报系统的检验评价也是一个必不可少的研究重点^[30]。TIGGE 的建立则为这些研究的进一步发展提供了相应的条件。

2.3 TIGGE 与集合预报

随着集合预报技术的发展以及 TIGGE 资料库的建立,基于 TIGGE 的资料的多模式集合预报技术的应用也随之发展起来^[31-34]。

Zhi 等^[35]利用 TIGGE 资料对北半球 2 m 温度的超级集合预报方法进行了研究。结果表明,采用固定训练期的 24 ~ 72 h 超级集合预报效果优于单个模式预报和多模式简单平均的预报效果。而采用滑动训练期的多模式超级集合预报则对 96 ~ 168 h 的预报有明显改进,特别是基于神经网络方法的超

级集合预报改进效果更为明显。对最优训练期长度进行的试验表明,认为北半球赤道地区最优训练期长度约为 1 个月,而热带外地区 24 ~ 72 h 预报的最优训练期长度约为 1 个月,96 ~ 168 h 预报的则为 2 个月。

Wilson 和 Ghelli^[36]利用 TIGGE 资料对 24 h 降水场的集合产品进行了检验评价,他们认为由于采用了较低水平分辨率的预报产品,所得到的结果并不如预期的那样好。有关降水场的检验评价需要做进一步的研究。Tian 等^[37]基于 TIGGE 资料利用 3 个中心——CMA、ECMWF 和 NCEP 的预报对淮河一次降水过程进行了分析,CMA 对微量降水的预报效果要优于其他中心,而 ECMWF 则对中等雨量的预报效果要好。多模式集合预报的效果要优于单个模式的预报效果,同时对 24 h 降水量可能超过 25 mm 和 50 mm 的空间分布有较好的描述能力。

Finocchio 和 Majumdar^[38]利用 TIGGE 资料评估了集合平均路径和最优路径,并检验了来源于集合预报的美国国家飓风中心划分的“不确定区”。他们发现英国气象局(UKMO)2 d 以内的预报效果最好,而对于相对较长的预报时效 2 ~ 5 d 而言,ECMWF 的预报效果最好。而 ECMWF 预报的路径不确定锥面的宽度相对较小。Corti^[39]基于 TIGGE 集合预报系统研究了模式输出结果校准后对天气型的识别,认为采用过去的预报误差来校准现在的模式输出结果,对天气型的识别有很好的改善作用。Xu 和 Zhang^[40]利用 TIGGE 资料通过耦合 XXT 水文模式及 GRAPES 模式探讨了对洪涝灾害的预报。研究表明,采用 TIGGE 集合预报资料作为水文模式驱动场是可行的,对径流的预报效果也有所改进。Raoult 等^[41]、Adam 和 Doty^[42]及 Mylne^[43]则对如何获取、解码 TIGGE 资料及其在 GIF 中的应用前景分别做了较详细的介绍。

3 大气可预报性与动力过程的研究

由于大气的不确定性,在逐日数值天气预报中,进行数值积分所用到的初始场不可避免地与实际大气状态之间存在微小的误差。大气内部的动力不稳定与非线性相互作用导致这种初始误差随时间的延长而不断增大。这种现象造成了在用初始场对动力模式进行积分的过程中,确定论的逐日天气预报存在一个可预报的限度,这就是逐日天气预报的可预报性。与逐日天气预报的可预报性不同,短期气候预测的可预报性表示的是较长时间尺度范围内大气

可预报的程度,即可预报的气候信号超出不可预报的气候噪音的程度^[44-49]。

数值天气预报与大气的动力理论是密不可分的。对大气、海洋的动力、物理过程的进一步认识可很快应用到数值模式中,而这些数值模式又为我们更进一步地认识真实的大气、海洋提供了强有力的工具。国内外有关大气可预报性及动力过程的研究主要包括对热带和热带外风暴(气旋)、Rossby波、MJO、干和湿大气动力过程之间的联系及基于集合预报的预报不确定性研究这几个方面^[49]。

目前有关热带气旋生成的机制还不是很清楚。Montgomery等^[50]利用高分辨率模式研究了临界层东风波对热带风暴起源的影响。模拟结果显示,对流层低层临界层的发展对风暴的形成是十分必要的,同时临界纬度与槽线的交叉点为风暴起源的位置提供了较好的参考。Mahajan和Hakim^[51]对2008年热带风暴鸚鵡(Nuri)的生成进行了研究。他们利用GFS集合预报产品及WRF模式对热带风暴初始条件的灵敏度进行了分析。他们认为当给模式一个相对较小的初始扰动时,模式的响应与集合预报产品相当;而当初始扰动较大时,模式的结果不及集合预报产品。Elsberry等^[52]利用ECMWF月尺度预报模式对2008年6月至12月北太平洋西部热带风暴形成及路径的可预报性进行了研究,发现在大多数情况下ECMWF集合预报的风暴路径较实际的气旋更早开始。结果还显示,预报时间尺度达四周时,热带气旋的形成及路径的可预报性主要与台风路径有关,而与起源于斜压系统的气旋本身关系不大。

直到几年前再分析资料的出现,人们才开始用大量统计样本系统地研究实际大气中的热带外气旋的形成和加强。基于再分析资料的研究发现,下游效应对热带外气旋的形成具有重要的作用^[49,53]。Chang等^[54]通过对西北太平洋地区风暴形成的可预报性的研究发现,强动力强迫的事件更容易预报,而非绝热过程明显的事件则较难预报。Boettcher和Wernli^[55]对北大西洋地区由非绝热Rossby波引起的爆发性气旋的发展过程的个例分析表明,低层位涡的幅度、周围环境的斜压性及湿度梯度对模式预报非绝热Rossby波的发展起着至关重要的作用。

大气动力过程中最有可能延长热带外地区可预报时效的过程就是MJO,同时其也是热带地区的主要变化之一。MJO的时间尺度多于一周少于一个季节。Shelly等^[56]利用UKMO全球及区域集合预

报系统,通过保留未经扰动的成员以检验集合预报系统维持MJO的能力。他们发现,对于短期预报而言,集合预报系统能够较好地捕捉到MJO的信息,预报时效达到10d的时候仍然可以捕捉到MJO的信号。不过UKMO全球及区域集合预报系统却不能很好地再现由印度洋激发的MJO的振幅和位置。他们还发现MJO对热带外Rossby波槽的传播可能有影响。Lin等^[57-58]对MJO和NAO之间的相互作用进行了分析,结果发现MJO与NAO之间存在明显的双向交互影响。他们还对一个原始方程干大气模式中季节内变化做了相应研究。在北半球冬季一个随时间变化的强迫作用下对模式进行了长期积分,发现对应于季节内变化在热带大气模式中存在Kelvin波结构。

众所周知,大气未来的状态总是存在不确定性,这种不确定性是相当可观的,而基于集合预报的预报不确定性研究引起了众多科学家的重视。一般来说,这种不确定性可以通过概率分布来表现。虽然到目前为止理论未能将其完全解释清楚,但是却可以在实际业务中应用。Satterfield和Szunyogh^[59]利用NCEP一个局地变形的集合卡尔曼资料同化系统对预报集合预报系统随时空的变化进行了研究。他们分别利用在完美模式假设前提下模拟的观测资料及实际大气的观测资料进行了试验,发现随着预报时间的增加,由集合扰动提供的线性空间范围反而能够更好地反映预报不确定性的范围。这种情况不是由于局地误差线性增长造成的,而非线性增长的预报误差在线性空间的投影有关。对于可预报性较低的情况即误差增长较快的情况,集合扰动能够更好地表现预报的不确定性。他们还发现对于观测资料密集的地区,集合结果低估预报的不确定性比在资料相对稀少的地区更为严重。Vannitsem^[60]提出了针对确定性预报和集合预报的一种线性标准化的模式输出统计(MOS)方案。他们认为利用这种方案对模式结果做后处理无需再抑制集合离散度,而订正结果主要提供了与观测资料一致的平均值和变化,且该方案只能在控制实验中进行训练。Teixeira等^[61]利用美国海军的一个全球模式(NOGAPS)对集合预报中采用随机参数化方案的效果进行了探讨。他们引入简单的随机对流参数化方案后发现,利用这种方案在热带地区激发的扰动随时间增长,并且向热带地区移动。利用这种方法产生的热带地区的集合离散度与由初始条件扰动所得到的集合离散度相当。当在同一个集合预报系统

中同时采用初始扰动和随机对流参数化方案,则有希望增加集合离散度以及减少热带地区的干扰因素。

4 资料同化与观测系统

资料同化是提高数值天气预报质量的一个重要方面。随着观测资料的增多和观测质量的提高,资料同化技术的进步和发展依赖于对背景场和观测场不确定信息的描述。目前的全球和区域业务数值预报系统,应用较为广泛的数据同化方法包括牛顿松弛逼近(Nudging)、最优差值(OI)、三维变分(3D-Var)。而在各种同化方法中,集合卡尔曼滤波(EnKF)方法可以用集合样本统计出随天气形势变化的误差协方差,目前已发展成为资料同化领域一个新的研究热点。业务应用中复杂程度最高的四维变分(4D-Var)同化方法仅被少数国家掌握^[62-65]。

Bishop 和 Hodyss^[66]介绍了一个四维变分集合资料同化方案。利用一个全球数值预报模式进行试验,结果表明该方案优于美国海军正在使用的三维变分业务资料同化方案。Lorenc^[67]总结了目前 4D-Var 所取得的成果及面临的挑战。Buehner 等^[68]对比了加拿大环境中心采用不同方案(三维变分,四维变分及集合卡尔曼滤波)及不同资料同化方法的混合技术的确定性数值预报的效果,结果发现利用四维变分的效果与集合卡尔曼滤波的集合平均的效果相当。相对于采用三维变分方法的预报效果,采用集合的四维变分方法的预报效果更好,但是其效果又略逊于采用集合卡尔曼滤波协方差的四维变分方案的效果。Whitaker 等^[69]则总结了 NOAA 有关基于集合技术的资料同化系统的对比研究成果及对未来的展望。Rabier 等^[70]、Enomoto 等^[71]、Irvine 和 Gray^[72]等则主要针对观测资料对集合资料同化技术的影响进行了试验和研究。

目前有关资料同化技术和观测系统研究的另一个热点则是观测系统模拟试验(OSSE)^[62]。为了优化观测资料的使用,加深理解分析及预报误差源和完善全球观测系统,THORPEX 资料同化及观测系统工作小组(DAOS-WG)提出了目标观测(Observation-Targeting)的方案,主要针对强热带外气旋、锋面波动和热带风暴、台风的观测^[73-74]。2008 年 T-PARC 的猎鹰行动就是一次目标观测的具体试验^[75]。

5 数值天气预报的社会经济效益的研究及应用

数值天气预报在社会经济发展中具有重要的地位和作用。基于集合预报技术的数值天气预报系统在一定程度上提高了预报准确率,对于防灾、减灾、抗灾及减少经济损失起着重要作用。Mills 等^[76]介绍了加拿大气象信息对地面交通的影响。Duan^[77]就利用改进的数值天气预报系统为 2008 年北京奥运会服务的具体实施进行了总结。Chen^[78]简述了南非灾害性天气预报示范项目所获得的经验教训,提出了关于如何继续提高非洲地区灾害性天气预警系统以减少经济损失的方案。

6 小结

尽管过去几年科学家们在有关观测资料的应用、资料同化技术、集合预报和基于集合预报技术的概率预报等方面的研究取得了巨大进展,但依然存在许多值得关注的问题。本届 THORPEX 国际科学研讨会的召开,展示了各区域、各工作组及与会专家的最新研究成果。

(1)区域活动:主要成果表现在 2008 年热带气旋结构的联合试验。针对台风鹦鹧(Nuri)、森拉克(Sinlaku)及蔷薇(Jangmi)共进行了 26 次飞行试验,总计 93 h 飞行时间。同时还开展了相应的目标观测数值试验,结果显示对台风的预报效果有明显改进。

(2)TIGGE 及集合预报:主要涉及 TIGGE 的应用技术研究及多模式集合预报评估等。从大会报告来看,多模式的预报不确定性很大,而相较于单一模式的预报效果来看,基于多模式产品的预报则更优。

(3)大气可预报性与动力过程的研究:主要涵盖了热带地区、热带外地区大气可预报性与动力过程的研究、集合预报理论研究以及基于敏感分析的伴随研究。其中,交流最多的是有关热带气旋的动力过程及可预报性的研究。

此外,此次大会还展示了有关资料同化与观测系统、数值天气预报的社会经济效益的研究及应用的相关成果,提供了未来有关基于集合预报技术数值天气预报的研究方向,对 THORPEX 计划的顺利执行起着重要的推动作用。

参考文献:

- [1] WMO. THORPEX; Progress report [EB/OL]. [2008-03-14]. http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wrrp/new/THORPEX_other_publications.html.
- [2] WMO. International core steering committee for THORPEX. seventh session; THORPEX final report [EB/OL]. [2008-03-14]. http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wrrp/new/thorpex_publications.html.
- [3] Davies H C. Extra-tropical flow dynamics & THORPEX; Some core aspects [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [4] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow [J]. *J Atmos Sci*, 1963, 20 (2): 130-141.
- [5] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmosphere model [J]. *Tellus*, 1965, 17 (3): 321-333.
- [6] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction [J]. *Tellus*, 1969, 21 (6): 739-759.
- [7] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts [J]. *Mon Wea Rev*, 1974, 102 (6): 409-417.
- [8] WMO. THORPEX; Executive summary of the THORPEX international science plan [EB/OL]. [2008-03-14]. http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wrrp/new/thorpex_publications.html.
- [9] Nakazawa T, Bessho K, Komori T, et al. Impact of extra-sonde observations for Typhoons during T-PARC 2008 [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [10] Bessho K, Nakazawa T, Weissmann M. Dropsonde operation of Falcon in T-PARC and the analysis of surrounding environment of Typhoons [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [11] Jung Byoung-Joo, Hyun Mee Kim, Yeon-Hee Kim, et al. Real-time adaptive observation guidance and observation system experiments for Typhoons observed in T-PARC [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [12] Otha Y, Komori T, Sakai R, et al. Total energy singular vector guidance in JMA for T-PARC 2008 [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [13] Sanabia E, Harr P. The impact of Typhoon Sinlaku on the Northern Hemisphere Midlatitudes during T-PARC [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [14] Weissmann M, Anwender D, Bessho K, et al. Overview of T-PARC Falcon operations and first results from ECMWF data denial experiments [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [15] 智协飞. 气象水文灾害的防灾减灾教育培训新进展 [J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30 (6): 885-889.
- [16] Toth Z. Estimation of atmospheric predictability by circulation analogs [J]. *Mon Wea Rev*, 1991, 119 (1): 65-72.
- [17] Toth Z, Kalney E. Ensemble forecasting at NMC; the generation of perturbations [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74 (12): 2317-2330.
- [18] Toth Z, Kalney E. Ensemble forecasting at NCEP and the breed method [J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125 (12): 3297-3319.
- [19] Zhu Y J. Ensemble forecast; A new approach to uncertainty and predictability [J]. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22 (6): 781-788.
- [20] 段明铿, 王盘兴. 集合预报方法研究及应用进展综述 [J]. *南京气象学院学报*, 2004, 27 (2): 279-288.
- [21] Buizza R. Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system [J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125 (1): 99-119.
- [22] Murphy J M. The impact of ensemble forecasts on predictability [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1998, 124 (529): 463-493.
- [23] Hoffman R N, Kalnay E. Lagged averaged forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting [J]. *Tellus*, 1983, 35A (1): 100-118.
- [24] Brankovic C, Palmer T N, Molteni F, et al. Extended-range prediction with ECMWF model; Time-lagged ensemble forecasting [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1990, 116 (494): 867-912.
- [25] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system; methodology and validation [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1996, 122 (529): 73-119.
- [26] Hamill T M, Snyder M. A comparison of probabilistic forecasts from Bred, singular vector, and perturbed observation ensembles [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128 (6): 1835-1851.
- [27] 杨学胜, 陈德辉, 冷亭波, 等. 时间滞后于奇异向量初值生成方法的比较试验 [J]. *应用气象学报*, 2002, 13 (1): 62-66.
- [28] Houtekamer P L, Lefaire L, Derome J, et al. A system simulation approach to ensemble prediction [J]. *Mon Wea Rev*, 1996, 124 (6): 1225-1242.
- [29] Ehrendorfer M. Predicting the uncertainty of numerical weather forecasts; A review [J]. *Meteorol Zeitschrift*, 1997, 6 (4): 147-183.
- [30] Casati B, Wilson L J, Stephenson D B, et al. Review Forecast verification; current status and future directions [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2008, 134 (1): 3-8.
- [31] Tittle H, Savage N, Swinbank R, et al. Comparison between Met Office and ECMWF medium-range ensemble forecast systems [R]. London; ECMWF, 2008.
- [32] Johnson C, Swinbank R. Medium-range multi-model ensemble combination and calibration [R]. London; ECMWF, 2008.
- [33] Park Y-Y, Buizza R, Leutbecher M. TIGGE; preliminary results on comparing and combining ensembles [R]. London; ECMWF, 2008.
- [34] Pappenberger F, Bartholmes J, Thielen J, et al. TIGGE; Medium range multi model weather forecast ensembles in flood forecasting (a case study) [R]. London; ECMWF, 2008.
- [35] Zhi X-F, Bai Y-Q, Lin C-Z, et al. Multi-model superensemble forecasts of the surface temperature in the Northern Hemisphere [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.

- [36] Wilson L J, Ghelli A. Verification of multi-model ensemble forecasts using the TIGGE dataset [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [37] Tian F-Y, Qi D, Di J-Y. Predicted rainfall estimation in the Huaihe river basin based on TIGGE [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [38] Finocchio P, Majumdar S. Evaluating ensemble track forecasts of tropical cyclones [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [39] Corti S. Weather regime dependent calibration of TIGGE ensemble forecasts [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [40] Xu J-W, Zhang W-C. Coupling XXT hydrological model with GRAPES for flood prediction based on TIGGE data [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [41] Raoult B, Fuentes M, Worley S, et al. Joint presentation of the international TIGGE archive [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [42] Adams J, Doty B. Distribution and access of TIGGE data via OpenDAP using the GrADS data server [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [43] Mylne K. Operational considerations for TIGGE research and developments of GIFS [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [44] 王绍武, 林本达. 气候预测与模拟研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1993: 4-7; 27.
- [45] 周秀骥. 大气随机动力学与可预报性 [J]. 气象学报, 2005, 63 (5): 806-811.
- [46] 丁瑞强, 李建平. 误差非线性的增长理论及可预报性研究 [J]. 大气科学, 2007, 31 (4): 571-576.
- [47] 丁瑞强, 李建平. 初始误差和参数误差对混沌系统可预报性影响的比较 [J]. 地球物理学报, 2008, 51 (4): 1007-1012.
- [48] 丁瑞强, 李建平. 非线性误差增长理论在大气可预报性中的应用 [J]. 气象学报, 2009, 67 (2): 241-249.
- [49] Szunyogh I, Wernli H, Barkmeijer J, et al. Recent developments in predictability and dynamical processes (PDP) research: A report by the THORPEX PDP working group [R]. 2008.
- [50] Montgomery M T, Dunkerton T J, Wang Z. Tropical cyclogenesis within a tropical wave critical layer: Easterly waves [C]//Physical basis and high resolution numerical simulations. Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [51] Mahajan R, Hakim G. Ensemble sensitivity analysis applied to tropical cyclones [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [52] Elsberry R L, Jordan M S, Vitart F. Predictability of tropical cyclone events on intraseasonal timescales with the ECMWF monthly forecast model [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [53] Simmons A, Hoskins B J. The downstream and upstream development of unstable baroclinic waves [J]. J Atmos Sci, 1979, 36: 1239-1254.
- [54] Chang E K M, Raeder K, Collins Nancy, et al. Predictability issues associated with explosive cyclogenesis in the North-West Pacific [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [55] Boettcher M, Wernli H. A case study of an explosively deepening, diabatic Rossby-wave induced cyclone: the influence of environmental conditions [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [56] Shelly A, Savage N, Milton S. Predictability and systematic error growth in Met Office MJO predictions [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [57] Lin H, Brunet G, Derome J. Intraseasonal variability in a dry atmospheric model [J]. J Atmos Sci, 2007, 64: 2422-2441.
- [58] Lin H, Brunet G, Derome J. An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation [J]. J Climate, 2009, 22: 364-380.
- [59] Satterfield E, Szunyogh I. Local predictability of the performance of an ensemble forecast system [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [60] Vannitsem S. Dynamical properties of Model Output Statistics (MOS): The impact of initial condition and model errors [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [61] Teixeira J, Reynolds C A, Kahn B, et al. Stochastic parameterization: From satellite observations to ensemble prediction [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [62] Deley R. Atmospheric data analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [63] Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [64] 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. GRAPeS 三维变分同化系统的理想试验 [J]. 气象学报, 2004, 62 (1): 31-41.
- [65] 庄世宇, 薛纪善, 朱国富, 等. GRAPES 全球三维变分同化系统—基本设计方案与理想试验 [J]. 大气科学, 2005, 29 (6): 872-884.
- [66] Bishop C, Hodyss D. Data assimilation using modulated ensembles [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [67] Lorenc A. Success and challenges in 4D-Var [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [68] Buehner M, Houtekamer P, Charette C, et al. Comparison of the performance of different combinations of the ensemble-based and variational data assimilation approaches in the context of deterministic NWP [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.

- al science symposium. California;THORPEX TTISS,2009.
- [69] Whitaker J, Wang X-G, Toth Z, et al. The main results and future challenges identified by the NOAA THORPEX ensemble-based data assimilation inter-comparison project [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [70] Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, et al. Data assimilation experiments for AMMA, using radiosonde observations and satellite observations over land [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [71] Enomoto T, Inoue J, Miyoshi T, et al. Observing system experiments using the AFES LETKF data assimilation system [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [72] Irvine E, Gray S. Impact of targeted dropsondes on European forecasts [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [73] Langland R. The assessment of the DAOS WG on observation targeting [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [74] Toth Z. Experience accumulated in the Winter Storm Reconnaissance Program of NOAA [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [75] Wu C-C, Lin P-H, Chen J-H, et al. Targeted observations and its impact in DOTSTAR under T-PARC 2008 [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [76] Mills B, Andrey J, Tighe S, et al. Weather information and surface transportation in Canada: The long and winding road [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [77] Duan Y-X. Assessment of the impact of an improved forecast system during the Beijing 2008 Olympic Games [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.
- [78] Chen P. Lessons from the southern African severe weather forecast demonstration project [C]//Abstracts, Third THORPEX international science symposium. California; THORPEX TTISS, 2009.

(责任编辑:张福颖)