

王东海, 杜钧, 柳崇健. 正确认识和对待天气气候预报的不确定性[J]. 气象, 2011, 37(4): 385-391.

正确认识和对待天气气候预报的不确定性^{*}

王东海¹ 杜 钧² 柳崇健¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 美国国家海洋大气局, 华盛顿 20230

提 要: 美国国家科学发展的指导机构国家研究顾问委员会(NRC)不久前发表了一份关于天气、气候和水文预报的不确定性的调研报告。报告强调了预报不确定性信息在终端用户应用气象预报作决策中的重要性,同时指出一个预报如果没有定量地估计它的不确定性,那么该预报是不完全的。该报告中文版的出版工作正在进行中,现藉此机会向读者综合地介绍一下预报不确定性的问题。文中首先讨论了预报不确定性的缘由以及应该如何来科学地对待它。然后介绍了要应对这一问题所要进行的一些具体措施和策略。最后,简要地介绍了美国气象界为此所做的一些努力和计划以供参考。通过上述讨论和介绍,希望引起更多的人对预报不确定性问题的重视并科学应对以更好地服务社会。

关键词: 美国国家研究顾问委员会(NRC), 预报不确定性, 概率, 决策, 预报不确定性特别委员会(ACUF)

Recognizing and Dealing with the Uncertainty in Weather and Climate Forecasts

WANG Donghai¹ DU Jun² LIU Chongjian¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington D. C., U. S. A. 20230

Abstract: Not long ago, the U. S. National Research Council (NRC) published a study report about the uncertainty in weather, climate and hydrological forecasts. The report emphasizes the importance of communicating uncertainties associated with these forecasts to users in their specific applications. Otherwise, without quantifying its uncertainty, a forecast is incomplete. The publishing of a Chinese translation of this book is currently under the way. At the moment before the Chinese version is released, this paper would like to take this occasion to contribute a comprehensive review as well as some discussions to readers, which cover the following four aspects: (1) Why is uncertainty in all hydrometeorological forecasts inherited to be intrinsic? (2) What general goals should be set to successfully deal with the uncertainty in solving real world problems? (3) To accomplish these goals, what efforts have to be made and coordinated within the entire weather-related enterprise including government, research community and industries or end-users. (4) Finally, the efforts and roadmaps planned so far by the American Meteorological Society and NOAA in dealing with the forecast uncertainty are briefly introduced for reference. Via this paper, it is hoped that more people will pay attention to the importance of communicating the forecast uncertainty and work toward reforming and improving weather-related forecasts and services to benefit the entire society.

Key words: NRC (U. S. National Research Council), forecast uncertainty, probability, decision-making, ACUF (Ad hoc Committee on Uncertainty in Forecasts)

* 国家自然科学基金(40875022)和气象公益性行业科研专项经费项目(GYHY200806007, GYHY201006014)共同资助

2010年7月17日收稿; 2010年9月7日收修定稿

第一作者:王东海,主要从事中尺度天气动力学及数值模拟与数值预报的研究工作. Email: wangdh@cma.gov.cn

引 言

早在古代文明的曙光期即有人着手做天气预报。我国甲骨文中有关卜雨问晴的片断,是有文字以来的最早的天气预报记载。这种天气预报的蒙昧时代经历了几千年之久,直到大气运动所服从的偏微分方程于 1888 年写出,恰尼、费也托夫和冯·纽曼于 1950 年在世界上用第一台计算机做出了数值预报^[1],天气预报从定性经验预报转向定量预报的可能性才逐渐显现。半个多世纪以来,随着理论气象学的进展和气象卫星与超级计算机等高科技的应用,天气预报技术已取得了长足的进步^[2]。

然而,大气系统是一个极其复杂的系统,天气预报也因其直面固有的可预报性挑战而成为永恒的科学难题。诚如洛伦兹所描绘的,“讽刺天气预报员无能的笑话一直层出不穷,花样翻新。”他紧接着写道,“且抛开笑话不说,天气预报部门和社会大众都清楚地知道,正式的预报(包括当天的天气预报)有时正好是完全错的。”借用他所开创的、藉以引发了 20 世纪第三次物理学革命的“混沌动力学”的语言来说^[3-5],由于大气运动往往对初始条件高度敏感,但初始条件又因受制于气象观测的精度和数值模式初始化的技术水平而包含种种误差,这势必在对大气运动进行预测时引入了不确定性因素,从而导致甚至扩大了天气预报的不确定性。事实上,天气预报的不确定性来源远不止这些。目前,天气预报不确定性问题正日益引起人们的关注和重视。不久前,杜钧等在《气象》杂志上就公众对天气预报的批评事例讨论了天气预报制作和服务形式应该变革的问题^[6]。

通常所谓的不确定性是一个综合性术语,泛指某一系统状态不能清楚无误地被认知。天气预报的理论和实践表明,所有的预报,包括天气、水文气象和气候预报,都存在不确定性;几十年来,对某一特定气象事件的预测,天气预报、季度气候预测和水文预报(总称为水文气象预报)的用户们已经习惯于得到不完整的预报信息;早在 19 世纪,有的预报中即已包含了对不确定性的概率表述(概率即是不确定性的一种表达方式^[7])。到了 20 世纪,气象学逐步发展成一门被认为是更加精确的科学,预报变成了所谓的确定性预报,不再带有不确定性描述。1950 年左右,数值天气预报的产生及其早期的成功更是

加强了这一确定性预报的观点,并且在 20 世纪 70—80 年代随着卫星观测与数值模式的发展取得了引人注目的改进。用户们乐于使用具有确定预报值的预报结果,至多再加上自己的经验来最终判断预报的可信度,对所提供的预报信息的完整性几乎不复置疑。在美国,传媒这一传播天气信息的主要载体的长足进步强化了这一趋势。

在一些人看来,预报中包含不确定性描述信息就是存在缺陷和不足,绝不是科学意义上的更合理、更有用的产品。天气气候研究预报部门(整个行业),包括美国国家海洋大气局(NOAA)和其下属的美国国家气象局(NWS),他们的大多数预报产品都沿用了这种确定性预报。各类用户在对不确定信息一无所知的情况下,依赖预报做出各种决策,甚至包括那些与保护民众生命财产直接相关的决策也是这样作出的。然而,不确定性是天气、气候和水文预报的固有特征,而且这种不确定性一般随预报时效的延长而增加,并视天气形势和地理位置的不同而有所不同。

幸运的是人们对不确定性的认识正日益深入^[8-10]。最近,美国国家科学院(the National Academy of Sciences)出版了一份由国家研究顾问委员会(NRC)下属的天气气候预报不确定性估计和交流委员会撰写的长达 124 页名为“Completing the Forecast: Characterizing and Communicating Uncertainty for Better Decisions Using Weather and Climate Forecasts(完善预报:表征并交流不确定性以利用天气气候预报作出更佳决策)”的调研报告^[11],该报告紧扣“完善预报”的概念明确地指出,由于天气气候预报存在不确定性,欲利用天气气候预报作出比较好的决策,至关重要的一条就是要正确刻画或表征预报的不确定性,并且在用户和预报部门之间进行充分的交流。质言之,一个预报部门在发布预报的同时将天气气候预报中必然包含的不确定性信息有机地融合到用户的使用目标之中,这个预报才是完整的,这个部门才算是完成了预报。因此如何正确认识和科学对待天气预报的不确定性,从而在合理表征与充分交流不确定性以利用天气气候预报作出更佳决策基础上完善预报,是业务预报部门亟待解决的重要问题。

1 正确认识不确定性

传统上,水文气象预报中的不确定性,常由“概

率”这一术语来刻画,它一般随着天气/气候的形势、位置和预报时间长度的变化而变化。早期的预报员虽然面临当时还很年轻的预报科学的重大缺憾,但他们了解水文气象学预测过程中的不确定性特征并乐于在他们的预报中表达这种不确定性。这只要回顾如下这段历史就行了。克利夫兰·阿贝(Cleveland Abbe)成立了作为陆军信号军团组成部分之一的第一个美国气象预报团队,在1871年的第一次预测中并没有使用“预报”这个词,而是使用了“概率”这个词,因此,他以“概率之父”而闻名。数年之后,“迹象”(indication)一词取代了“概率”,直到1889年“预报”(forecast)一词才得到了官方的认可。

事实上,经过比较系统的研究之后发现,预报与不确定性是共生共存的。正如洛仑兹在其开创性工作中^[12-14]所论证的那样,这种不确定性的起源包括缺乏大气三维初始状态的准确和完整的描述;缺乏物理过程的完整和精确的描述,模式系统中也存在着其他不足;以及大气的混沌特性:预报模式或预报系统初始时的很小的不确定性会在预报展开过程中发展扩大。此外,除大气本身固有的不确定性根源之外,在地球表面特征和通量中也存在不确定性,而这也对水文气象预报中的不确定性有推波助澜的作用^[15]。

有鉴于此,我们认识到:

(1) 不确定性是天气预报的固有问题。尽管近20年来天气预报的准确性有很大的提高,然而天气预报在理论上和实践上存在目前尚不可逾越的三大障碍。首先,基于力学原理的数值天气预报是确定论学术观和方法论的产物,这种学术观和方法论认为只要给定初始条件未来的状态就是确定的。然而对于大气运动而言,真正牛顿力学意义下的初始条件只存在于宇宙大爆炸的瞬间,这个初始条件没有观测到而且永远也找不回来,目前采用的初始条件的形成技术只是一种权宜之计,这是预报产品不确定性的主要来源之一。其次,逼近连续的动力学微分方程的各种离散化差分格式是另一种近似,它本身还引入了一系列计算数学方面有待解决的问题,这是求解天气气候预报方程时导致预报不确定性的无庸置辩的另一个重要原因。最后,同样显然的是,目前各种大气观测技术都只能获取实际大气的近似观测数据,不用说直接的气象探空只能近似表征某站点的记录,模式同化中依赖各种反演数据所生成的初始场更是一种近似描述了。当大气演变处于不稳定阶段时,这种不精确的初始场往往会因为大气

这一多体系统本身的混沌性或对初值的敏感依赖性而出现“失之毫厘,差之千里”的戏剧性预报误差。譬如,图1所示的是英国气象局联合模式所作的两个海平面气压预报。由于初值的微小差异(图1a₁、b₁)而导致4天后的预报完全不一样(图1a₂、b₂):在相同的区域,一个是强气旋,而另一个是高压脊。关于更多这类的例子,读者可参考文献[8]。

因此,只要提一下这三个方面的不确定性来源,就可以大致澄清人们(包括用户)的一些疑虑,使他们知悉以天体力学二体系统这种线性预报科学所达到的精度来要求大气力学多体系统这种非线性预报科学的预报精度是有失公允的。更不用说,有的学者^[16]甚至认为,“数值天气预报存在预报时效,并且这个时效是由大气运动固有随机性所决定的,与误差无关。”试想,人们怎么可能对具有固有随机性的大气运动作出确定性的预报呢?

(2) 不同的用户虽对预报有不同的需求,但大多对不确定性并不知情。目前广大的用户群体,从航空航天和军事部门直至企业及个人,他们不断地对预报产品提出严之又严的要求,诸如冬奥会赛场某滑(雪)道某赛日某时气象条件是否符合比赛标准,以及某庆典日某时起1小时内有否强天气出现,如此等等,不一而足。需求迫切而严苛,但几乎所有用户对预报的不确定性却一无所知。这种不知情还无形中加重了业务预报部门的无奈和尴尬。近几年,我国天气气候的监测、预测和影响评估能力确有了大幅提升。然而,极端天气预报与气候预测仍然是一个世界性的科学难题,当前的科学水平在对重大自然灾害的监测、预警和预报能力方面距离人类社会发展的需求仍有很大差距,对极端天气气候事件和未来气候变化趋势的预测预报的能力更是处在一种起步阶段。广大用户群体能认识到这一点也是非常重要的。

(3) 不确定性不是气象预报所独有。虽然混沌学源于气象学,气象学也是预报学的先驱学科之一,但是预报不确定性问题同样存在于其他部门与学科。例如数值水文预报多以天气模式的降水预报输出作为与之耦合的水文模式的输入,而不确定的降水预报必然导致不确定的水位预报和流量预报^[17]。事实上,所有研究多体系统或复杂系统的学科都要面对和处理不确定性问题。气象预报部门率先通过科学处理不确定性而造福社会经济的系统变革是社会与科学协同发展的必然趋势。

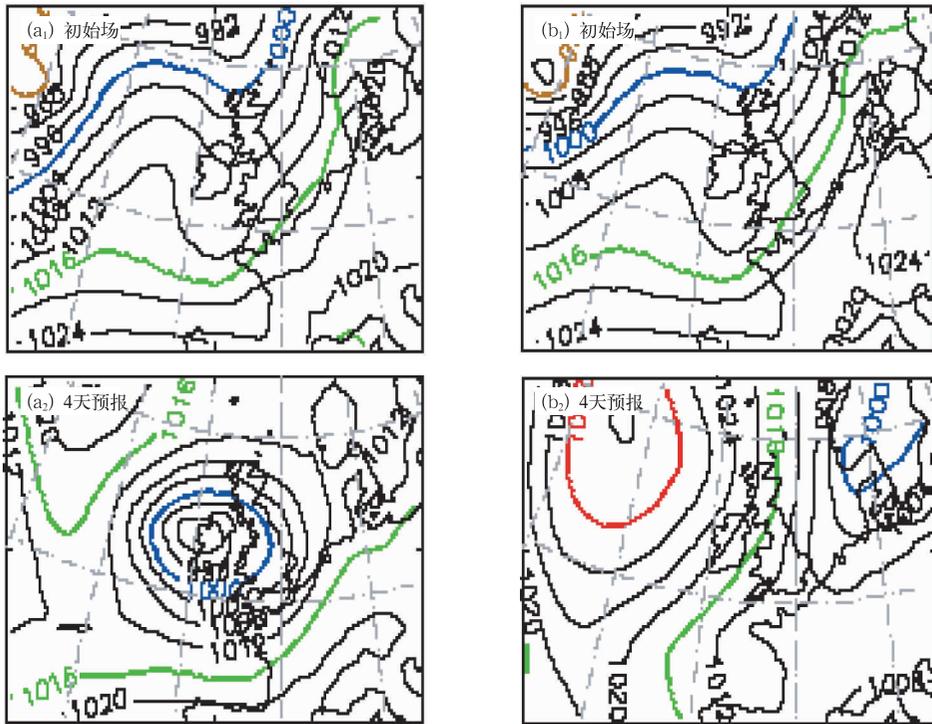


图 1 英国气象局联合模式所作的两个海平面气压场的 4 天预报(单位:hPa)
(a₁)和(b₁)分别为两个不同的起报初值,而(a₂)和(b₂)分别为 4 天后海平面气压预报场
Fig. 1 Two 4-day sea-level pressure forecasts of UKMet Office's united model (unit:hPa)

(a₁) and (b₁) are the two slightly different initial conditions;
(a₂) and (b₂) are the two corresponding 4-day forecasts

2 科学对待不确定性

既然水文气象预测本身就具有不确定性,并且这种不确定性的信息有利于帮助用户作出决策,那么提供不确定性信息就成了发布完整预报的一个有机组成部分。

客观上,除了社会经济价值和科学的有效性之外,提供不确定性信息的意义还在于保持用户的信任度。因为预报的过程中总会出现重大的或者难以避免的误差,所以当预测单一确定的大气或者是水文演变时,如果没有有效地发布不确定性,就会影响用户的信任感。如果用户知道可能发生的事件范围,预报部门的可信度就可以保持住,何况概率预测系统可以为实际发生的事件提供重要概率。

此外,不确定性信息在多数水文气象预测中的欠缺也牵涉到一个伦理范畴。整个行业在为大量用户提供一周或一周以上的确定性预报时,本来是应该暗示预报准确性和技术还没达到相应水准的。即在任何时间范围内提供这种确定的单一值的预报都带有某种迷惑性,并且和科学的已知状态(承认预测中固有的不确定性)不相容。相比之下,在医学领

域,作为表示多种疗法治愈几率的概率预测是很常见的,正如《晴天》报告建议 8^[18]中所提到的,NWS 作为负责为当前气象界制定科学标准的机构,应当“在这些方法被认为更具科学实效性的数据和预报中采用和改进发布不确定性的概率方法。”

考虑到目前的实际情况,针对科学对待不确定性问题,美国科学院归纳了以下几个方面的努力方向:

(1) 指出大气圈中存在的固有的不确定性。必须跟用户交流不确定性信息,在向用户提供不确定性信息的同时,向用户指明考虑不确定性的必要性,如果向用户提供概率意义的预报产品还必须对用户进行必要的培训。

(2) 依据包含不确定性的天气气候预报产品进行决策时,首先要解决如何判定和表征用户的需求问题。不同的用户对不确定性信息的提供有不同的需求,甚至要顾及在解释和使用不确定信息中的心理因素,必要时可向用户建议在依据包含不确定性的信息决策时采用统计方法^[19]。

(3) 应客观地、科学地提炼不确定性信息。不确定性的估计和判定本身就是一种科学技术方法^[20]。针对不同的时空尺度、不同的预报对象以及所用数值模式的不同,不确定性的估计宜遵循不同

的指导原则,各有其侧重点。而且对不确定性信息还必须再三进行检验。

(4) 最后就是交流预报不确定性。可以交流日常(逐日)预报的不确定性,也可以交流灾害性天气预报产品中的不确定性。这其中要发挥用户在产品开发中的作用,涉及到改进预报不确定性交流的研发计划,以及教育、培训和科普等环节。

这里需要特别指出的是,作为信息使用方的用户应积极参与旨在改进预报不确定性交流的研发计划和培训,向信息提供方反馈使用效益并及时反映新需求,在加强对不确定性的理解的同时,结合自己的相关知识和经验,发挥在产品开发中的独特作用。

3 应对不确定性的策略

现在大家越来越清楚地认识到,水文气象预测本来就具有不确定性,并且这种不确定性的信息有利于帮助用户作出决策。相反地,不提供不确定性信息预测会给社会经济带来严重损失和破坏^[9]。例如,Pielke^[21]讨论了由于NWS在1997年对红河水位潜在上升的预测中缺乏不确定性信息而导致全体居民和公共机关准备不足的事件(这一洪灾造成了超过10亿美元的损失)。就预测河流水位而言,这次预报处于常见的典型的失误范围之内,但是,不确定性信息并没有提供给公众甚至其他联邦机构。因此,应对不确定性的首要任务就是向用户科学提供各种可用的不确定信息。

诚然,随着可以获取不确定性信息的进展,有一部分用户对成本和损失有自己的敏感性并能相应改变和采取保护措施来应对突发事件,他们能够更好地对水文气象形势作出判断,决定是否采取行动或采取何种响应措施^[10]。举例来说,2008年8月8日晚北京奥运会开幕式的天气预报,客观地讲,比较准确的预报只能等到当年的8月5—8日才能做出,但作为奥运会的筹备计划方案,气象部门是可以并且应该提供多种天气气候信息的。统计表明,在过去33年中(1975—2007年),8月8日这一天北京出现降雨的概率是41%,晚上降雨的概率是25%,而下大雨的概率是6%。基于这种气候统计信息,我们的筹备方案就需考虑降水的可能性,只是因为奥运会开幕式在晚上,所以降水的可能性较小,下大雨的可能性更小而已。更多关于预报不确定性信息应用价值的例子,读者可参考文献^[9]。可见提供和应对不确定性信息本身就是一个技术含量极高的课题和任务。

特别地,NWS要求国家研究顾问委员会

(NRC)下属的天气气候预报不确定性估计和交流委员会(1)在如何确认和表征不同预报使用者对不确定性信息的需求方面给予指导;(2)确认目前评估和验证预报方法中的局限性,将这些局限性与用户的需求联系起来,并推荐或改进新方法、新途径;(3)弄清错误认识的根源,提供发布和改进不确定性预报的方法。委员会还专门推荐了一种方法,利用它,NWS可开发出一个与用户双方有效互动的系统,从而做出更有效的产品。委员会认为给出全面的不确定性信息来支持所有的预报是NWS任务的核心,并将使所有的用户受益。这些不确定性信息要做到容易获取,要包括所有的原始产品和后处理产品以及验证信息。

然而,由于这项挑战的广度和深度之大,仅靠一个委员会和一个部门是不能彻底解决的。为此,我们极力推介的《完善预报》一书提出了包含下述一揽子建议的总体方案来全面应对预报不确定性;主要建议包括:

(1) 整个行业的参与。整个行业都有责任提供能有效阐明预报不确定性信息的产品。NWS更应发挥引领的作用。

(2) 产品开发从最初阶段起就吸纳广泛的专业技术和知识。书中建议NOAA应该从一开始就与用户以及整个行业的其他参与者合作并利用社会科学和行为科学的专业知识,来实现产品开发过程的改进。

(3) 加强对不确定性和风险发布的教育培训。例如,对一个飓风路径的预报,确定性预报就只给出一条线性路径。然而,概率预报会给出一个圆锥图形来表示可能路径的范围,这才是更为恰当的预报。建议整个行业的所有部门和专业机构应该通力合作倡导教育,这将有助于改进不确定性信息的发布和运用。尤其是在以下三方面:水文气象课程中应包括对风险和不确定性理解和发布这方面内容;对预报员培训时,应该使他们接触到该领域最新的工具手段;以及预报提供方应该帮助用户,尤其是公共用户,理解不确定性信息的价值,并与用户合作来使他们能有效地把这一信息融入到决策中去。

(4) 进一步重视集合预报的研发和应用。报告中建议NOAA应该研发并保持这种能生成从全球尺度到区域尺度的客观的预报不确定性信息的能力^[22-23]。

(5) 确保不确定性信息能被广泛获取。为确保不确定性信息能被广泛地使用,应让整个行业可以全面获取所有时空分辨率下原始数据及经后处理的概率预报产品,保证外部用户和NWS人员能有效

地获取不确定性信息。

(6) 广泛获取综合的验证信息。应该增加对不确定性产品的验证并使所有用户能尽快实时地获取这些信息。验证过程中的一系列量度和方法应该用来恰当地表示验证问题的复杂性和多维性。验证统计结果要对有意义的预报子集(如季节或区域)加以计算,并且要以用户容易理解的形式表述。存档的概率预报的验证信息,包括模式生成的和客观生成的预报结果以及用于验证的观测记录,也应该提供给用户,以使用户对预报做出自己的评价。

(7) 有效地使用试验平台并协调不确定性信息的预估和发布。为了促使整个行业在预估、发布和使用预报的不确定性信息方面加强新方法的研究,NOAA 应该让行业所有部门都参与进来,以确保试验平台的更有效使用。建议 NWS 应该在自身与行业伙伴之间以主管者的态度来协调不确定性信息的预估和发布工作。

4 他山之石

下面简要介绍一下美国气象界为此所做的一些努力以供借鉴。NRC《完善预报》一书出来以后,美国气象学会(AMS)和美国海洋大气局(NOAA)都非常重视这一调研报告。根据这一报告所提到的问题和为实现这一报告所提出的目标,美国气象学会立即成立了一个“预报不确定性特别委员会”(Ad Hoc Committee on Uncertainty in Forecasts, ACUF)^[24]。该委员会由政府、大学、研究所、私营气象公司和气象用户等多方面组成(本文作者之一即系该委员会成员)。该委员会下设五个具体任务小组,这五个小组的任务划分极具创意,对我国气象系统有重要参考价值,特予以重点推介:第一个小组的任务是调研全国气象用户对预报不确定性产品和服务的需求,机遇和效益是什么,也就是用户需要什么样的预报不确定信息来使其决策达到最大经济效益。这是我们发展和扩大潜在用户的基础。具体方法包括社会调查、相关会议、网络和文献等。不久前美国气象学会新增了一份有关的专业杂志《天气、气候与社会》(Weather, Climate, and Society),足见美国对气象预报需求和服务及其社会经济效应的重视,这是极富行业远见的。第二个小组的任务是搞清楚对于预报不确定信息、产品和服务,气象部门能提供什么,目标是什么,这也是完善预报的科学和技术基础。第三个小组的任务是针对第一和第二小组所提出的需求和目标制定具体要做什么事来满足需

求达到目标。这主要包括两方面,一是如何通过普及教育让全社会认知和接受气象、气候和水文等预报普遍存在不确定性这一事实以及建立正确运用不确定信息能使决策达到最佳的经济效益的信念等。第二方面是科学技术的改进,特别是如何改变集合预报系统和集合产品等。第四个小小组的任务是如何达成上述第三小组提出的宏伟计划,政府、研究机构、私人公司和工矿企业等各自的角色是什么以及如何协调配合。这当然包括科研经费的使用和调配等。最后,第五个小小组的任务是总装配/总调度,它根据以上四个小组的结果,在全国各行各业范围内来制定出一个统一的实现从“确定论”向“随机论”转变的路线图(roadmap)。

经过一段时间的讨论和信息收集,该委员会正逐步认识到要实现这一变革的四大具体步骤。这就是:理解标准,制作产生,传播协助和硬件保障。“理解标准”就是要弄清预报不确定性的本质并对其进行量化(“科研”,集合预报技术是核心^[8])以及弄清社会和人的因素如何影响不确定性。“制作产生”这包括信息的产生和传播(“信息”涉及调研、教育和传媒),就是要有能力制作和提供给用户一套基本的包含有不确定性的预报资料、产品、服务和其他相关信息的数据库,以便整个领域的人都获得这些信息。“传播协助”就是要有有效地把不确定信息传达给用户,并协助用户在具体决策过程中理解和应用这些信息(“应用”,如行业气象决策模式^[9])。“硬件保障”就是要在资金、计算机条件、通讯/传输设备以及其他基础设施上能保证上述三个步骤的顺利进行,所以它起到润滑剂和齿轮的带动作用。它把“科研”、“信息”和“应用”三部分紧紧地融为一体(图 2)。

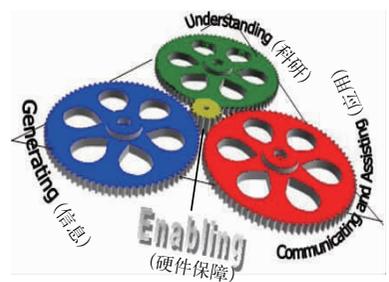


图 2 美国气象学会“预报不确定性特别委员会”为实现 NRC 调研报告所提出的目标而提出的四大具体步骤及其相互关系
Fig. 2 Schematic diagram of the “four strategic goals” and their relationship proposed by the AMS Ad Hoc Committee of Uncertainty in Forecast (ACUF)

NRC 报告发表以后,NOAA 也成立了“预报不

确定性服务发展指导小组”(NWS Forecast Uncertainty Service Evolution Steering Team, NFUSE)。该小组成员由 NOAA 内部各主要机构以及所有区域气象局派代表组成。它有两重任务,对内是协调和强调 NOAA 内部各机构对预报不确定性产品和服务的产生、制作和传播的改善工作,对外是对 NRC 报告的回应。这个小组明确指出,在这场引入预报不确定性的变革中,NOAA 应是中坚力量。NWS 目前正在改进升级它的“现代天气互动处理系统”(AWIPS)以增加处理预报不确定性信息的功能。美国航空局(FAA)的下一代航空天气预报系统(NexGen)计划中也强调了气象资料的六维化(6D cube):除了三维空间,一维时间,一维变量外,重点增加了预报不确定性的一维。概率预报将是未来航空天气预报的重点。

5 结 语

当前我国为了千方百计地提高预报准确率,对业务预报部门的“三定”(定时、定点、定量)预报要求无疑是确当的,因而要将其落到实处并在技术层面上创建与国际接轨的交流平台,对预报内容的涵义作出界定和规范就显得极为重要而紧迫。

有迹象表明,在不久的将来,随着预估不确定性方法的改进、最佳发布方法知识方面的加强、用户和预报者对不确定性信息优势的更好认识以及传播不确定性信息手段的完善,相信人们应对预报不确定性挑战的能力将有实质性的提高。通过处理不确定性问题来完善预报,势将成为世界范围内与预报相关的部门与学科的热点和焦点。目前美国亦属起步阶段。为此,建议我国气象部门在总结自身经验和吸收美国先进思想的同时,在广泛调研和专家论证的基础上及早在国内率先提出这个问题并拟就初步行动方案,走在我国其他必然涉及不确定性信息从而有待完善预报的相关部门和学科领域前面,从战略思维上谋划如何科学应对天气气候预报的不确定性,从而解决这个同时涉及高端管理和前沿科技的重大课题,并借此在全社会彰显气象部门通过精细化预报天气与科学传递预报信息而竭诚致力于社会公益事业的行业风范。

参考文献

- [1] Charney J, Fjörtoft R, Neumann von J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation[J]. *Tellus*, 1950, 2: 237-254.
- [2] 薛纪善. 和预报员谈数值预报[J]. *气象*, 2007, 33(8): 3-11.
- [3] Lorenz E N. 刘式达, 刘式适, 严中伟译. 混沌的本质[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 214.
- [4] 丑纪范. 大气科学中的非线性与复杂性[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 204.
- [5] 柳崇健. 复杂大气系统的性质和问题. 东亚季风和中国暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 465-469.
- [6] 杜钧, 陈静. 天气预报的公众评价与发布形式的变革[J]. *气象*, 2010, 36(1): 1-6.
- [7] Wilks D S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* [M]. New York: Academic Press, 2005: 627.
- [8] 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.
- [9] 杜钧, 邓国. 单一值预报向概率预报转变的价值: 谈谈概率预报的检验和应用[J]. *气象*, 2010, 36(12): 10-18.
- [10] 叶笃正, 严中伟, 戴新刚, 等. 未来的天气气候预测体系[J]. *气象*, 2006, 32(4): 3-8.
- [11] U. S. National Research Council. 王东海, 等译. 完善预报: 表征并交流不确定性以利用天气气候预报作出更佳决策[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [12] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 130-141.
- [13] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. *Tellus*, 1965, 17: 321-333.
- [14] Lorenz E N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion[J]. *Tellus*, 1969, 21: 289-307.
- [15] Beven K. Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models[J]. *J Hydrol*, 1989, 105: 157-172.
- [16] 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.
- [17] Schaake J, Hamill T, Buizza R, et al. HEPEX: The hydrological ensemble prediction experiment[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 1541-1547.
- [18] U. S. National Research Council. Fair Weather: effective partnerships in weather and climate services[M]. Washington D C: The National Academy Press, 2003: 238.
- [19] Murphy A H. Decision making and the value of forecasts in generalized model of the cost-loss ratio situation[J]. *Mon Wea Rev*, 1985, 113: 362-369.
- [20] 杜钧. 集合预报的现状和前景[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 16-28.
- [21] Pielke R A Jr. Who decides forecasts and responsibilities in the 1997 red river flood[J]. *Appl Behav Sci Rev*, 1999, 7: 83-101.
- [22] Tracton M S, E Kalnay. Ensemble forecasting at NMC: practical aspects[J]. *Wea Forecasting*, 1993, 8: 379-398.
- [23] Du J, DiMego G, Toth Z, et al. NCEP short-range ensemble forecast (SREF) system upgrade in 2009[C]. American Meteorological Society 19th Conference on Numerical Weather Prediction, 2009, 4A, 4. [available online at <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF/reference.html>]
- [24] White Paper on proposed way forward for the ad hoc committee on uncertainty in forecasts[EB]. 2007. [available online at <http://www.ametsoc.org/boardpages/cwce/docs/BEC/ACUF/2007-09-White-Paper.pdf>]