

业务化数值天气预报 50 年： 科学传承与未来展望^①

贾朋群¹ 胡 英¹ 薛纪善²

(1. 中国气象局培训中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院)

提 要

数值天气预报是气象科学在 20 世纪创造的巨大成就,它给出的计算天气的可行性方案不仅服务于日常生活,也改变了人们对天气预报的认识。在数值天气预报业务开展 50 年之际,回顾了数值天气预报在科学思想上的脉络,对该领域未来发展进行了展望。

关键词: 数值天气预报 业务化 发展评述

引 言

1954 年 12 月 1 日,瑞典空军气象局与斯德哥尔摩大学国际气象研究所合作,在同 3 月和 9 月开展准业务化试验的基础上,正式开始进行业务化 24h、48h 和 72h 数值天气预报(NWP)^[1],成为中外公认的自 1950 年利用电子计算机进行 NWP 研究取得成功后首次投入业务化运用^[2,3]。如果以 1904 年皮叶克尼斯提出天气预报问题不过是一组控制大气动力和热力过程的物理方程的初值问题,算作 NWP 科学理念的提出,则人类对 NWP 问题的研究已走过了 100 年,而更有实际意义的业务化 NWP 实践也已历经了半个世纪的历程。

世界气象组织新任秘书长雅罗先生在以“信息时代的天气、气候和水”为主题的 2004 年世界气象日致辞^[4]中指出:“数值天气预报的质量和准确性的巨大提高,是 20 世纪下半叶所有科学分支中的主要成就之一”。从 20 世纪初构建在经典物理学丰硕成果之上的现代气象学脱颖而出,到 20 世纪末世界各主要气象中心天气预报业务,几乎完全依赖由最先进的高速电子计算机和电子通讯系统支撑

的 NWP 模式的预报和分析结果,这一科学发展历程中令人感触最深的,是 NWP 模式技术的成熟,使得大气与相关科学的最新研究成果,无论是在大气动力学、热力学、大气边界层和中小尺度等直接的研究领域,还是各圈层相互作用等相关领域,大多数能够通过模式系统和同化系统等 NWP 的支撑技术获得实际应用。所以秘书长的论述不仅是客观的,也指出了气象科学是科学技术造福于人类的典范应用学科之一。本文试图回顾现代气象学的发展渊源,尤其是造就了业务化 NWP 所体现出来的科学观和科学方法的改进,梳理学科进步的规律,并对今后 NWP 的发展提出见解。

1 20 世纪上半叶完成了数值预报理论和技术铺垫

1543 年哥白尼发表了《天体运行论》,以日心说批判了主要是为宗教神学服务的地心说,从而宣布了自然科学(从经院哲学和教会的统治中)的独立,揭开了人类对宇宙认识科学革命的序幕。从伽利略开创性的探索到牛顿集其大成,发现了万有引力定律和力学三定律,被认为是现代科学的起点。牛顿涉及

^① “十五”国家重点科技攻关计划“中国气象数值预报技术创新研究”资助

力学、光学、数学、天文学、热学和化学等学科的一系列成就,是科学走上理性道路的标志,并建立了在科学推理和数学演算的严谨基础之上研究自然世界的科学框架。这种理性和严谨的科学思想启示人们将自然现象所服从的客观规律表示为物理和力学定律,这些定律可以用数学的语言写成数学方程(通常是微分方程),于是把自然现象的研究归结为这类方程的求解。在这种数学物理方法或动力学方法的演算中,如果在方程中包含了时间变量,那么,就在描述这种自然现象随时间变化的同时,具有了预报意义。这种从根本上有别于传统以主观猜测为主的动力学预报方法在17世纪末开始发展起来。

牛顿经典力学的很快流行,在很大程度上取决于依照其理论对自然现象给予的解释和预测的成功。科学史显示,天文学首先教导我们大自然中存在着规律,自然现象所服从的客观规律可以表示为物理和力学定律。在气象学研究方面,牛顿的同时期学者哈雷以及后来的哈德莱应用经典力学对信风现象的研究,是历史上首次对大气运动进行的定性动力学解释。

现代气象科学的发端是20世纪初的1904年,挪威物理学家皮叶克尼斯(Vilhelm Bjerknes)给出一组控制大气演变的动力、热力和质量守恒方程。从此经典的力学、流体力学和热力学等物理学理论开始溶入气象学,新的技术和科学突破越来越快地应用到气象研究和天气预报实践中。皮氏思想的重要意义在于,它将气象学造就成为严谨的应用物理学科并为后来取得的一系列重要成就指明了道路。

天气预报在数学上不过是一个初值问题的思想很快获得了广泛认同。但由于这些复杂的偏微分方程的解析解无法得到,只能采用图形解并在卑尔根气象学校首创的天气图诊断分析方法,即所谓挪威学派的“气团”、“锋面”学说中定性地加以应用。但是这种思想孕育了大气动力学,并带动了气象学家试图用偏微分方程表达一切可以表达的事情,

用数学的语言描述并进一步建立数学模型解决气象问题。例如,1920年代,G. C. Simpson用数值实验的方法研究地球大气电磁辐射这一气象学最基本的问题,而Harold Jeffreys和David Brunt等分别用数学的方法计算了大气平衡和气压分布对降水的作用。这些今天看来非常简单的数值实验,一方面帮助气象学家们在80多年前就认识到了气象学研究中“算法”的重要性,同时还让他们第一次感到了精确计算带来的问题。由于气象观测的精度一般为3、4位,而当时的模拟计算工具,如计算尺和计算图表等的准确性仅为2、3位。当出现气象学中常见的计算结果依赖于两个大量之间的差或需要进行一连串计算时,利用这些计算工具数值实验几乎无法进行。这种情况在全面试验皮氏思想的第一人,被誉为现代NWP之父的英国数学家里查孙(Richardson)于1922年进行的手工NWP实验中达到了极点^[5]。里查孙的突出贡献之一在于他以自己的实践,最早打破了当时数学家盛行的以发现真理为己任,不屑于“近似”的传统。里查孙的工作至少提醒了气象学家,在等待数学家们得到复杂的微分方程的理论解的同时,还可以期待计算工具,即技术层面上的突破带来的另一种天气预报解决方案。于是,在20世纪50年代物理和数学成果在气象应用研究中获得巨大进展^[6]的背景下,电子计算机时代的到来,为NWP的成功完成了最后的理论和技术铺垫。

2 1950年代电子计算机的出现真正实现了数值天气预报

如果说现代NWP的理论突破,是以20世纪初皮叶克尼斯的工作为标志,那么以电子计算机为运算工具的现代NWP的研究试验,则起源于1946年美国普林斯顿大学高级研究院研制第一台电子计算机ENIAC(电子数字积分器和计算器)项目中的气象项目。即NWP研究几乎与电子计算机的研制同步进行。从20世纪50年代后期开始,NWP无论是在理论上还是在实践中,都获得了飞速发展^[7]。

1950年NWP研究成功后,各国都力争早日在业务预报上得到应用。利用数值预报实时进行准业务和业务天气预报的结果,最早刊登在1954年“Tellus”杂志上。这一年杂志第2期的一篇署名为斯德哥尔摩大学气象研究所员工的论文“在电子计算机上用正压模式进行预报的结果”^[8],第一次给出了分别在1954年进行的24次24h预报试验的结果,预报场和观测场的相关系数平均达到了0.77。尤其是在3月23、24日进行的试验为准业务化试验,为随后的数值预报进入天气预报业务打下了基础。与此同时,在NWP的诞生地美国,受到冯·诺依曼和切尼等人工作的影响,1954年美国天气局、空军天气局和海军航空局三家联合成立了目的在于NWP业务化的联合数值天气预报中心(JN-WU),并从1955年5月6日开始NWP业务。

NWP在20世纪的最后几十年里获得了稳步发展,从正压模式到斜压模式再到原始方程模式直至现在的非静力模式,模式的时空分辨率和各种性能一步步提高。值得注意的是,在模式的升级换代过程中计算机技术的发展,即计算系统的计算能力的提高起了决定性的作用。上个世纪80年代有人估计,计算能力每增加1个量级,模式的分辨率加倍,预报的准确性提高约15%^[9]。

3 数值天气预报的未来:机会与挑战并存

NWP理论研究的很多成果,都已经在业务实践中获得了应用^[10,11],进入21世纪NWP巨大的价值将通过与各种专业信息的充分融合并在更具针对性的产品中体现。另外,随着有效预报的时限逐渐接近可预报性的当前理论极限,NWP要获得跳跃式的重大进展,还有赖于理论上的创新突破。

3.1 构建在集成天气信息系统框架之上的面对不同用户的精细预报

随着NWP的预报准确性和精度提高以及时空范围的扩展,其应用价值将不断提高。另外,大气信息与其他圈层甚至人文社会信息的相互融合,会在公共卫生、污染物扩散等

领域产生有更大附加值的预报产品。于是,20世纪末NWP产品释用和图像显示等技术在21世纪将走向更广泛意义上的综合应用,其两个最显著的特点,一是信息高度集成,二是针对具体地区或服务提供的多样化和高度精细化信息。信息集成将落实到天气信息系统框架的建立,该框架以多圈层耦合地球系统模式为基础,综合国家、区域甚至全球的各种信息并不断更新。多样化高度精细化信息的各类应用是依托上述信息框架的各种专门的可嵌套的区域模式或专家系统。这样的信息融合和服务的方式,最大限度地综合和利用了各种信息来源,也体现了最精细的信息,例如某个街区某天的夜间最低气温等。目前世界上各主要大气科学中心纷纷建立科研-业务公用模式和开展地球系统模拟框架研究^[12,13],就是在塑造未来的信息框架。这样的框架不仅是未来强大的业务支撑,也为模式研究者检验新模式或模式的改进是否适用于业务数据流和计算环境提供了最有效的平台,即很好地解决了研究与业务改进相互脱离的问题。

3.2 集合预报——确定性预报向概率性预报的再转变

NWP的科学理念是建立在确定论的牛顿力学基础上的,但地球自然系统永远是开放的,要在严格的意义上证实任何地球系统模式都是不可能的^[14,15]。这就直接导致了决定论的唯一的NWP模式结果的价值总是存在疑问。面对这样的疑问,近年来已经引起各国极大重视的,建立在动力-随机预报思路的基础上的集合预报成了未来数值预报发展的一个重要方向^[16]。集合预报的思想,客观地审视了NWP模式在本质上与自然界的呼应关系以及天气分析场和预报场均不能无条件反映大气“真值”的事实,将“初值”变为“初值的集合”,相应地,“预报值”也变为“预报值的集合”。预报值可以来自同一个模式,也可以用不同的模式,即所谓的超级集合预报。后者将模式中各种物理过程的不确定性也考虑进去。集合预报的方法还可以应用于

数据同化,并且在各种观测试验,尤其是“目标观测”中^[17]受益最大。

3.3 大气科学的理论突破是数值预报跳跃发展的关键

在世纪之交,世界各国纷纷制定了新世纪前10年或更长时间数值天气预报的发展框架^①,目标都是针对预报准确率的提高。对NWP的进一步发展科学家依旧是乐观的。遥感技术、计算机技术和多圈层相互作用的理论研究成果,还将继续为NWP系统的升级提供科学技术支撑。而NWP系统的升级也将导致预报准确率的进一步提高与时效的延长。但我们也应看到过去数值预报准确性的提高主要建立在技术领域的创新发展,以及仍然和技术相关的观测上的改进。虽然技术改进的步伐在新世纪不会放慢脚步,甚至更快,但在数值预报已经拥有较高水平的基础上,新技术带来的“增幅”可能会逐渐减少。数值预报跳跃发展也许依赖于更深层次的理论突破,例如对多圈层相互作用的更深入、全面的理解和对大气混沌性质的更清晰的科学描述。

地球大气系统有限的可预报性早在1876年就由Maxwell提出,1957年,在数值预报发展初期,Thompson也较为全面地定义了可预报性概念及其与初值不确定性的关系,随后洛伦茨完整的论述使混沌现象引起了科学界的巨大重视。然而,大气混沌理论形成的几十年里,其概念和方法大多应用于相对简单并被准确控制的系统之中,而对于开放和多元、多维的这一相对更为复杂的大气系统,我们仍然不清楚能够在多大程度上用已有的混沌理论进行认识并应用到系统行为的预测之中。揭开这一迷团也正是在新世纪初开展的如THORPEX(观测系统研究和可预报性试验)等一系列项目^②的重要目标之一。

参考文献

- 1 Bolin B. . Numerical Forecasting with the Barotropic Model, *Tellus*, 1955, 7(1):27—49.
- 2 游性恬,张兴旺. 数值天气预报基础. 北京:气象出版社,1992:1—333.
- 3 Kalnay E. . Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge: Cambridge University Press, 2003:1—341.
- 4 雅罗 M. 信息时代的天气、气候和水——2004年世界气象日致辞. *气象知识*, 2004(1):4—5.
- 5 Platzman G. W. A Retrospective of Richardson's Book on Weather Prediction, *Bulletin of American Meteorology Society*, 1967, 48(8):514—550.
- 6 Charney J G. Progress in Dynamic Meteorology, *Bulletin of American Meteorology Society*, 1950, 31(7):231—236.
- 7 Wiin-Nielsen The Birth of numerical weather prediction, 1991, *Tellus* 43A-B, 36—52.
- 8 Staff Members, Institute of Meteorology, University of Stockholm. Results of Forecasting with the Barotropic Model on an Electronic Computer (BESK), *Tellus*, 1954, 6(2):139—149.
- 9 Shuman F G. History of Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center, *Weather and Forecasting*, 1989, 4: 286—296.
- 10 薛纪善. 美国天气预报技术的发展. *气象*, 1998, 24(11):3—6.
- 11 胡英,贾朋群. 数值天气预报方法改进和各国业务预报进展. *气象科技*, 2000, 28(4):22—27.
- 12 Serafin R. J. et al. Transition of Weather Research to Operations, *Bulletin of American Meteorology Society*, 2002, 83(3):377—392.
- 13 Max Planck Institute for Meteorology, International Conference on Earth System Modelling, 15—19, September, 2003.
- 14 Oreskes N, K Shrader-Frechette, K Belitz, Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences, *Sciences*, 1994, 263:641—646.
- 15 Randall D A, B A Wielicki. Measurements, Models, and Hypotheses in the Atmospheric Sciences, 1997, *Bulletin of American Meteorology Society*, 78(3):399—406.
- 16 杜钧. 集合预报的现状和前景. *应用气象学报*, 2002, 13(1):16—28.
- 17 胡英,贾朋群,高良成. 近5年大气科学外场试验及其重要成果. *气象*, 2001, 27(1):3—8.

① 见,例如,“为挽救生命共同努力:(美国)国家天气局 2003~2008 财年战略计划”,*气象软科学*, 2004, (1), 48—63.

② 薛纪善. 参加 THORPEX 国际核心指导委员会第 1 次会议汇报, 2003, *气象科技合作动态*, 2003, (1):1—3.

Operational Numerical Weather Prediction: the Last Half-century and the Future

Jia Pengqun¹ Hu Ying¹ Xue Jishan²

(1. Training Center, CMA, Beijing 100081; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences)

Abstract

Numerical weather prediction (NWP) crowned 20th century meteorology with our irreversible changed view of the weather prediction and with a feasible calculating way serving our everyday life. At the time of the 50th anniversary of the emerging of the operational NWP, a review of notable advances in scientific idea and technology progress which paved the way for the remarkable improvements in its evolution is made, as well as a vision for its future.

Key Words: numerical weather forecast operation progress