

数值天气预报发展进程中若干亮点的回顾及其启迪

纪立人

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 尝试从方法论的视角, 回顾数值天气预报(NWP)早期发展进程中的若干亮点及其启迪。NWP是大气科学的一个分支, 同样具有边缘学科性质和很强的实用性。纵观其发展史, 一个新概念新思想的提出, 以至新研究领域的开拓, 往往可以看到其他学科成果和NWP问题的结合, 更离不开天气预报实践的需求和启发。从这个角度出发, 我们围绕“从理查逊(Richardson)的‘梦想’到原始方程模式的回归”及“数值预报中历史资料的应用到四维同化”两个主题, 分别回顾了NWP有关模式和观测资料处理的研究进程。

关键词: 方法论视角, 原始方程模式, 螺旋式上升, 历史资料应用, 四维同化

大气科学是一门发展中的新兴学科, 一方面它遵循普遍的物理规律, 另一方面又有其本身的特点。数值天气预报(以下简称NWP)作为大气科学的一个分支, 在其发展过程中, 新的生成点的提出, 新研究领域的开拓, 一些重大问题的突破, 似都可以看到其他学科的成果与气象问题的结合。NWP又是一门实用性很强的应用基础学科, 从其研究问题的提出、解决、到进一步发展, 都离不开天气预报实践。下面尝试以熟知的若干事例为视角, 做些探讨。

1 从Richardson的梦想到回归原始方程模式

V. Bjerknes^[1]于20世纪初最早提出用流体动力学方法作天气预报的构思。而后直至1921年Richardson^[2]才迈出实际的第一步。后者在1922年发表的专著“用数值方法作天气预报(Weather Prediction by Numerical Process)”中详细阐述了他所用的计算方法、过程和结果。因为计算工作量极为庞大, 他组织使用了大量人力, 设计了详细的计算表格, 才得以完成, 然而得到的“预报”结果, 却达6小时145毫巴的气压变化, 比实际变化大了许多。

第一次尝试失败了, 后来被称之为Richardson的梦想。但就是这个“梦想”, 长期以来始终未被遗忘, 而被推崇为NWP发展史上的一个里程碑。其原因可归纳如下:

首先, 他构建了实现NWP的蓝图。他用于计算的偏微分方程组(后来称之为“模式”)预报分量有 u , v , T , p 等, 考虑了大气运动的动力学和热力学过程, 采用了经纬度(θ , λ)和高度坐标, 设计了方程离散化的计算方案。考虑了如云、雨、植被、地形等诸多因子的描写和影响, 甚至还提出“地形追随坐标”(如 σ 坐标)的设想。他的工作向人们展示, 天气预

报是可以这样计算出来的。

其次, “前事不忘, 后事之师”。其失败留下了经验教训, 后继者正是在不断探究其失败原因中, 获得启示和找到解决途径的。

最后一点, 也许是最宝贵的, 他的工作表明了科研也是要有“梦想”和实现梦想的勇气和执着的。“梦想”不正是真正具有前瞻性、创造性工作的一个源泉吗?

在Richardson的工作之后, NWP工作表面上似乎沉寂了一个时期, 实际上, 对它的探索并未停止。约30年后也就是1950年, NWP研究有了突破, Charney等^[3]发表在Tellus上的文章, 给出第一张真正意义上的数值天气预报图——用电子计算机ENIAC计算的24小时天气预报图。它的成功使NWP广为气象学界所接受, 从而开启了NWP快速发展的时代。

他们的文章被千百次引用, 而为什么能取得突破, 它有什么启示, 仍值得我们深思。当时三维气象观测资料的获取, 世界上首台电子计算机的出现和计算数学的进展, 无疑为实际NWP提供了基础和动力。据说von Neumann展示其计算机巨大潜力而列出的首批课题, NWP就是其中之一。但主要的贡献还是来自大气动力学的进展, 来自对主宰逐日天气变化的天气系统(或简称长波)的研究。当年Richardson计算用的方程组, 其中包括由牛顿第二定律推导的运动方程, 未作简化, 或仅作静力平衡近似, 及相应的其他方程(如热力学方程, 连续方程等)被称为“原始方程”组。它描写了大气中的各种波动, 包括快速(高频)的惯性重力波。如果处理不当, 高频波可能虚假增长, 甚至淹没天气意义的长波, 这正是Richardson失败的一个重要原因。Charney^[4]运用流体力学的尺度分析方法(据说, 他受到Prandtl“湍流边界层分析”一书的启发)。按大气运动的时间尺度和空间尺度, 将决定天气变化的“长波”和高频的重力波区分开来, 建立了适于刻画天气演变的准地转方程组(准地

收稿日期: 2011年5月31日

资助项目: 科技部创新方法工作专项项目资助

(2008IM020500)

第一作者: 纪立人(1933—), E-mail: jlr@lasg.iap.ac.cn

转系统)。在这个系统中,滤去了重力波,使对长波的计算和预报不受这些“气象噪音”的干扰。也因为滤去高频波,在差分计算过程中按CFL条件要求,得以采用较长的时间步长。还因为准地转近似,方程中风速的两个分量(u, v)得以用气压 ϕ 来代替。此外,他们又以实际大气准辐散层为据,大胆地提出以一层简代表整层大气运动的构思,建立了正压模式。所有这些都大大减少了计算量,从而保证了预报的顺利完成。即便如此,用ENIAC计算机(1000次/秒)24小时的预报也用了24小时的计算时间,勉强赶上了天气变化的速度。据说,当时人们(例如著名的动力气象学家Solberg)对复杂的大气运动如此简化,能否解决问题是心存疑虑的^[5],而Charney等却坚持走先简约后精细的道路。事实表明,即使有了当代的计算条件和观测资料,没有合理和巧妙的简化,突破仍是不可能的。而合理的简化则来自对特定大气运动本质的认识。

有趣的是,在距1950年,也即准地转模型取得巨大成功不到十年,NWP又考虑使用原始方程。因为天气的剧烈变化,往往伴随大气的斜压和非地转发展过程,而为了在准地转(或准平衡)模型的框架下描写它们,模式方程组和计算过程将趋于复杂化,计算量也大为增加。但这个“回归”,不是简单地回到起点,而是“螺旋式的上升”;即使在准地转模式占主导地位期间,对原始方程模式的研究和使用并未中止(包括Charney本人)。正是在简化模型——准地转模型的建立和应用过程中,人们对大气运动有了更深刻的认识。准地转模式滤去了重力波,而原始方程则包含了长波和重力波(快波)。为使计算稳定,更好地刻画大尺度运动的变化,其要点在于避免重力波的虚假产生和增长。为此,人们在三方面作出努力。

首先,要对初值场进行处理,构造相互协调的风场和气压场。后来称之为“初值化”。从最初的准平衡“静处理”,到后来的非线性正规模,数字滤波等一系列方法,目的在抑制初值中重力波的能量及其在初始时段的增长。

其次,既然模式包含了重力波,为保证计算稳定,积分的时间步长 Δt 只能取足够小,以满足CFL条件。这不仅计算代价太大,在当时的计算机条件下,也不可能用于每日预报。原始方程模式积分的时间步长问题成为制约其实际应用的瓶颈。关于大气适应过程的理论研究,为解决这个问题指出了一个方向。

观测表明大气大尺度运动一个最基本的特征,是风场和气压场的准平衡关系。而大气中地转偏差又经常存在,因为完全地转平衡将没有天气变化。地转平

衡不断地被破坏,又不断地重建。大气适应理论研究,将这对同时发生的矛盾过程,抽象地分离开来,模型化为两个相互衔接的阶段:演变过程和适应过程,这两个阶段在时间尺度上有明显区别,前者是慢过程,后者是快过程。其物理特性也有区别,而且可以由运动方程的不同项来刻画。既然如此,可否在模式的时间积分时,对代表快、慢过程的项,采用不同的处理方法呢?这是突破一个模式只能采用同一格式和同一时间步长传统做法的大胆构思。

曾庆存^[6]、Robert^[7]先后提出“半隐式(或称半显式)格式”,对制约慢过程的非线性平流项取显式和较大时间步长,而对制约快过程的气压梯度力项和柯氏力项取隐式格式,从而可以取相同的大时间步长。这就大大减少了计算量,并很快得到广泛应用。即使到了今天,计算机已达到每秒千万亿次的量级,国际上一些著名的业务模式仍然采用半隐式格式。

第三,原始方程是非线性方程,对计算稳定性十分敏感,它得以在NWP中顺利应用的另一个重要保证,是非线性计算不稳定(NLI)的发现及其对策——“物理守恒格式”的构建和应用。NLI的发现始于Phillips^[8]的工作。他在1956年前后,用数值试验方法研究大气环流,并发表了著名论文。在其研究过程中发现,尽管积分所取时间和空间步长满足线性CFL判据,但模式长期积分有时仍会出现不稳定。对此,他没有当成偶然事件,简单加以技术处理,而是见微知著、抓住矛盾、深入探究。这最终导致“非线性计算不稳定”概念及其机理的提出,而其论文的发表,已是1959年了。此后,NLI问题及“物理守恒格式”的构建,成为NWP以至计算流体力学的一个重要研究方向。它的提出竟出自一项科研的副产品,这个过程不值得人们深思吗?

需要说明,早在1940年前苏联著名学者基培尔已经运用尺度理论和小参数展开方法建立了完整的准地转系统,并用以作出了数值预报,无独有偶,据说他也是受了Prandtl工作的启发。为了讨论方便,我们只引用了Charney等人的工作。

2 从NWP中历史资料的应用到四维同化

大家知道,早在一百年前,V. Bjerknes^[1]关于现代天气预报的预言,就将天气预报分为两步:diagnosis和prognosis,也就是初值和预报。以后数值天气预报一直按这个经典定义,提成初值问题。而顾震潮^[9]则由预报实践提出:日常的天气预报主要是由“历史演变”,特别是最近一段时间中的天气变化情况来作的。并用理论研究深刻地揭示了这两种截然不同提法之间的联系。指出在特殊条件下两者是等价

的，但一般来说，是不等价的。这一研究，不仅是数值预报问题在方法论上的突破，更在实践上有十分重要的意义。它指出了使用气象历史资料的必要性和途径。

丑纪范^[10]沿着这个方向，几经寒暑，在理论和实践上进一步深化。他将微分方程的定解问题变为等价的泛函极值问题——变分问题，引进“广义解”的概念，并推导出使用多时刻观测资料的预报方程式。并用实例证明使用500hPa一层多时刻观测资料可以预报出大气的斜压变化。多年来我国学者不断沿这个方向进行研究，先后从不同原理和准则提出了能容纳多时刻资料的预报模式，在短、中、长期数值预报和集合预报中广泛应用。

还应指出，顾震潮先生提出由预报方程与多时刻历史资料相结合来构造当前时刻大气三维结构，实际上已包含了后来称之为四维同化的核心思想，而丑纪范引入的泛函极值的处理方法，正是今日主流方法——四维变分同化（4D-VAR）的主体，而国际上将近十年后才起步研究资料的四维同化问题。我国科学家早期的闪光思想，并未促成我国资料同化科学与技术的发展，未能使这一新的生成点，在我国争得先机。除了“文化大革命”期间NWP工作基本停顿之外，还有其他值得深思的原因，包括：技术发展和业务需求对科学的推动，缺少有效的“孵化”机制，以及科学家参与业务实践的主动性等。不妨考察一下国外的发展轨迹。

20世纪60年代后期，随着新技术的发展，非常规观测（卫星、雷达、飞机航测等）每日提供海量的观测数据。如何充分利用这些数据，如何将这此要素不同、时刻不同、精度不同的观测资料，整合出完整的协调的要素场成为一项挑战性的课题。

此外，推动研究的另一个重要动因是20世纪60年代末国际联合研究计划“GARP”，它旨在探索中长期数值预报的可行性。其中的一个重要组成部分，就是全球资料的获取以定义预报需要的全球大气初始状态，尤其是海洋、沙漠、山脉等广大缺少常规观测地区的分析问题，更备受关注。

Charney等^[11]于1969年发表的一篇题为“应用不完全的历史资料推断大气当前状态”的论文（与顾震潮先生于1958，1959年在国内外发表的论文思路何其相似！），其中心思想是利用历史资料和模式积分相结合，实现气象要素场的时空转换，以及不同要素观测的相互补充。他应用数值模式向前积分，每隔若干小时，不断插入更新温度资料。结果表明由温度场的变化可以降低风分析的误差，由多时次高层温度场可

以推出当前低层的温度分布。他所展示的可能只是四维同化的一个雏形，所发表的不过3页纸的短论，推动了“四维同化”的快速发展和应用。可以说，今天四维同化已成为一门独立的学科分支，不仅提高了NWP的时效和准确率，在大气，海洋多个学科分支中都得到广泛应用。例如在天气气候研究中使用最多、最广泛的所谓“再分析资料”，正是“四维同化”方法的产品。

上述事例援用了数值预报发展进程中的若干亮点，结合学科特点，评述其从科学问题的提出到解决的过程。“一个好的开始等于成功了一半”，从上述事例可以看出，创造性科研工作往往始于独到的选题。一个好题目的提出有时看来是“妙手偶得”，实际上，它离不开科研实践和预报实践，离不开气象学者们深厚的科学底蕴及其对学科发展现状和未来的把握。至于随后“众里寻她千百度”的执着和辛劳，则是可以想见却未能在这篇小文中表达的。

致谢：承蒙薛纪善研究员提出宝贵意见，特此致谢。

参考文献

- [1] Bjerknes V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Meteor. Zeit., 1904, 21: 1-7.
- [2] Richardson L F. Weather Prediction by Numerical Process. London: Cambridge Univ. Press, 1922: 236.
- [3] Charney J, G Fjortoft R, von Neuman J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation, Tellus, 1950, 2: 237-254.
- [4] Charney J. On the scale of atmospheric motions. Geophys. Publikasjoner, 1948, 17: 17.
- [5] Phillips N A. Jule Charney's Influence, Bull. Amer. Meteor. Soc., 1982, 492-498.
- [6] Цзэн Цин-Цунб (曾庆存). Применение полной системы уравнений Термо-гидродинамики к краткосрочному прогнозу погоды в двух уравнений модели. ДАН СССР, 1961, 133: 76-78.
- [7] Robert A. The integration of a spectral model of the atmosphere by the implicit method. Proc. WMO/IUGG Symposium on NWP. Tokyo: Japan Meteor. Soc., 1969: 19-24.
- [8] Phillips N A. An example of nonlinear computational instability. The Rossby Memorial Volume. New York: The Rockefeller Institute Press, 1959.
- [9] Koo C C (顾震潮). On the equivalency of formulation of weather forecasting as an initial value problem and as an "evolution" problem // The Rossby Memorial Volume. New York: The Rockefeller Institute Press, 1959.
- [10] 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学, 1974, 17: 635-644.
- [11] Charney J, Halem M, Jastrow R. Use of incomplete data to infer the present state of the atmosphere. J Atmos. Sci., 1969, 26: 1160-1163.

Some Highlights and Their Implication in the Early Progress of Numerical Weather Prediction – a Review

Ji Liren

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: In this paper, a view in retrospect is made on some highlights in the early progress of numerical weather prediction (NWP), trying to address their implications in methodological perspective. NWP as a branch of atmospheric sciences, is a subject of interdisciplinary nature and immediate practical use. In the course of its development, the raising of a new idea or the advent of a new research area in NWP, not seldom, stems from its integration with other disciplines, let alone the demand and inspiration of weather prediction practice. From this viewpoint, two streams of researches have been traced with respective headings of “from the ‘dream’ of Richardson to the recurrence of primitive equations model” and “from the initiation of using historical data in NWP to the formulation of 4-D data assimilation” in the text.

Key words: methodological perspective, primitive equations model, spiral-type development, initiation of using historical data, 4-D data assimilation

(上接39页)

Reliability and Representative Assessments of Wind Observation Data in the Study of Typhoon Wind Resistance Engineering

Song Lili^{1,2}, Chen Wenchao³, Huang Haohui³

(1 Public Meteorological Service Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration,

Guangzhou 510080 3 Guangdong Climate Centre, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080)

Abstract: The modern large-scale engineering of typhoon wind resistance mainly focus on the analysis of near surface wind characteristics in typhoon boundary layer. Based on the near surface wind observation data of several typhoons in recent years and combined with the characteristic of non-homogeneous cyclone circulation of typhoon and the characteristic of high-frequency sampling anemometer, the necessity of reliability and representative assessment of typhoon wind observation data in the wind resistance study and its potential impact on wind resistance parameters are analyzed and the method of basic data quality test and control are given. Effective integrity rate standard of basic data and the data representative assessment criteria and index of typhoon strong wind are propounded to apply in the study of typhoon wind resistance engineering. By analyzing and comparing the values calculated by the observation data of typhoon Hagupit, the following results are found: 1) High-frequency wind data observed by ultrasonic anemometer processed by 4 times truncation variance method have a better data representative. 2) The outlier in the wind speed time series has significant impact on the reliability of wind resistance parameters. Even 2%-5% outlier can have a large effect on the wind spectrum. 3) Typhoon strong wind representative assessment index for the observation data should be abided by the variation characteristics of parameters demanded by the study of wind engineering at different positions of typhoon. 4) The basic criteria of typhoon strong wind representative assessment are the wind direction alters over 120° in succession and the wind speed curve versus time shows an “M” shape bimodal distribution. If the lowest wind speed between two peaks is less than 11m/s, it can be judged as the typhoon eye area.

Key words: typhoon wind resistance engineering, observation data of typhoon, reliability and representative, assessment method