

# 和预报员谈数值预报

薛纪善

(中国气象科学研究院,北京 100081)

**提 要:** 用尽可能非专业的词语,向预报员介绍数值预报的成就、问题与应用。在简单回顾数值预报发展历史的基础上,重点分析了近十几年来数值预报的主要技术进步与有待解决的问题,对比了数值预报与主观经验预报的各自优势与不足,提出了优势互补对于提高业务预报的重要性。还分析了数值预报的技术进步对于数值预报产品释用的影响,以及预报员参与数值预报发展的可能性与必要性。

**关键词:** 数值预报 预报员 优势互补

## Weather Forecaster and Numerical Weather Prediction

Xue Jishan

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** The status and applications of numerical weather predictions are introduced to weather forecasters in operational posts in a way of non-specialist terminology. Following a historical review with the stress on the achievements and unsolved issues in the latest decade, the merits and shortcomings of forecasts by numerical models and experiences-based methodologies are compared. The combination of the superiorities of two kinds of approaches is emphasized. The impacts of technical developments of numerical weather prediction on the interpretation and application of model outputs, and the possible roles the forecaster may play in the further development of NWP are also discussed.

**Key Words:** numerical weather prediction forecaster

### 1 发展数值预报是提高天气预报质量与定量化程度的有效途径

可以毫不夸张地说:数值预报的成功是

20 世纪人类能动地认识自然变化规律的最骄人的成果之一。数值预报是从观测到的大气当前信息出发,借助计算机对控制大气运动的方程组进行数值积分,从而对未来天气变化作出预报。一般的数值预报系统由资料

同化、预报模式与产品后处理三部分构成,其中资料同化用于将观测资料加工成预报的初值;预报模式是控制大气运动方程组的数值近似,用于进行预报计算;而产品后处理是将预报结果进一步加工成用户需要的形式。图 1 是我国最近发展的数值预报系统 GRAPES-Meso 的工作流程,它是业务数值预报系统的典型代表,尽管各个预报中心的资料同化方案与预报模式有很大差别,但系统的基本构架都与此相似。

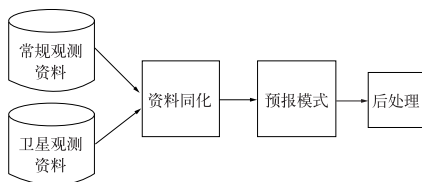


图 1 GRAPES-Meso 系统的构成  
与基本数据流向

数值预报的科学思想提出于上世纪初,在 1950 年代获得成功并应用于业务预报<sup>[1]</sup>。在其后的半个世纪中,数值预报技术不断发展,预报能力持续增强,至今数值预报已经成为业务天气预报的重要基础,还在气候预测、模拟研究中发挥了不可替代的作用。在数值预报出现前,天气预报基本上属于经验性的技术,数值预报大大增强了预报的物理基础,并向客观、量化的方向推进了一大步。与基于天气图分析或数理统计模型的预报技术相比,数值预报具有更坚实的物理基础,其效果不依赖于具体制作预报时的个人经验,并且可以获取定量的三维大气要素,还可以进一步加工成各种需要的预报产品,因而在提供服务产品方面也有特殊的优势。特别要提及的是数值预报的依据是对支配大气运动的普遍物理规律的认识,从这个意义上讲,其预报能力并不局限于过去已经大量出现的天气条件。这与基于经验(包括资料统计)的预报方法或工具有根本的区别,后者的预报能力一般只在与历史上大量出现的个例相近的情

况下才能取得好的效果。例如传统的预报方法一般都难以把握异常路径的热带气旋的预报,而数值预报却常可给出更好的预报。数值预报模式对异常或极端天气事件的预报能力是其又一个突出的优势。

经过几十年的技术发展,数值预报系统已经能够提供具有较高可信度的中期时效(一周或更长)的天气形势与大尺度天气过程的预报与短期的定点气象要素的数值。总体上说,无论是精细与量化程度,还是准确率都已经超越单凭传统天气图分析制作的预报。如果说二三十年前多数预报员对数值预报还心存众多疑虑、更多相信自己的主观经验的话,现在预报员的看法已经完全不同,恐怕已经很难找到制作预报时完全不参考数值预报的预报员了。尽管如此,数值预报毕竟不能替代预报员的综合预报,预报员对数值预报产品的正确解释与应用可以明显提高预报的水平。这在一定程度上取决于预报员对数值预报特点的了解。由于数值预报本身处在迅速发展中,预报员需要根据数值预报的新特点调整使用数值预报产品的策略与方法,改进使用数值预报产品的效果。如果根据二十年前、甚至十年前的数值预报水平来确定如何应用数值预报的产品,显然会大大低估数值预报的使用价值。但对数值预报的局限毫无所知,同样会在使用中陷入盲目性。预报员增进对数值预报的了解,无论对有效应用数值预报还是促进数值预报本身的发展都是至关重要的。

## 2 当代数值预报的成就与不足

### 2.1 快速发展的数值预报技术

半个世纪前数值预报刚取得成功与建立业务的时候,预报产品仅限于对流层中层的大尺度天气形势的短期预报。而五十多年后的今天,数值预报的有效预报时效已经超过

一周,对具体气象要素的预报也已达到相当的精度,采用数值模式制作的月、季或更长时间的短期气候预测也已经应用到业务中。几十年来计算机技术、大气探测技术的进步与大气科学及相关学科的发展使得数值预报保持了持续发展的趋势。特别值得注意的是接近世纪之交数值预报又进入了新的快速发

展。图 2 是近二十几年欧洲中期预报中心的 500hPa 位势高度数值预报与实际分析的距平相关系数的变化,不仅可以看出二十多年来数值预报质量的持续提高,而且从 1990 年代后期的改进特别明显,表明数值预报正处于又一个快速的发展期。概括起来这一阶段的数值预报技术发展主要有以下几个方面:

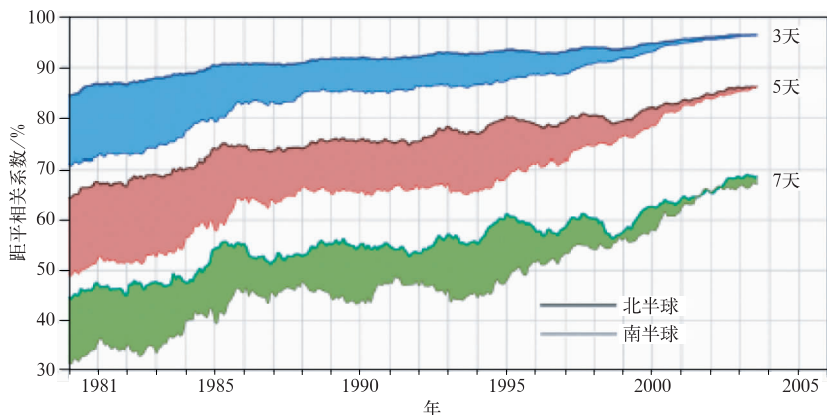


图 2 1980—2004 年,欧洲中期天气预报中心制作的南北半球温带预报 3、5、7 天 500hPa 位势高度预报的距平相关系数,按 1980 年 1 月—2004 年 8 月期间距平相关系数滑动平均值绘制。阴影区表示南北半球预报技巧评分差距,引自文献[2]

(1) 遥感资料变分同化的技术突破,极大地提高了数值预报的初始场质量

数值预报是一个数学中的初值问题,初值的正确性对预报有决定性的影响。而初值是由对观测资料同化而获得的。长期以来数值预报的基本观测资料来源是全球探空与地面气象观测网,但探空与地面气象站主要局限于人类活动的区域,广大海洋与人类难以生存的陆地区域成为探空的“盲区”,而这类区域占了地球的大部分,因而数值预报的初值误差很大,成为提高数值预报质量的一大障碍。尽管从上世纪六七十年代开始人类已经获取了大量的气象卫星遥感资料,但卫星所观测到的并不是模式的基本预报变量,而是与基本预报变量间有着复杂非线性关系的各种波长的辐射量,因而在数值预报中的应用率很低。从 1990 年代初开始,利用三维与

四维变分同化系统直接同化卫星的辐射观测数据取得突破,使得卫星资料在数值预报里的定量应用效果有了大幅度改善,补充了常规探空观测的不足。随着卫星资料同化技术的进一步成熟与卫星资料的增多,卫星资料的贡献已经接近甚至超过常规的气象观测,大大改善了数值预报的初始场,并进而提高了预报的水平。这种变化最明显地表现在常规资料稀少的南半球地区,至今南、北半球的预报水平已经非常接近,这主要归功于卫星资料同化的贡献。

(2) 数值模式向高分辨率发展

十几年间国际上各个业务预报中心的数值预报模式所采用的网格距普遍缩小了 5~10 倍,意味着数值预报模式向高分辨率方向的大步迈进。目前发达国家全球模式格距已经普遍达到 50km 或更小,而区域中尺度模

式格距一般都达到了 10km 或更小。缩小网格距只是提高模式分辨率的一个方面,还必须改进模式对更精细动力过程描写的能力,例如把过去被过滤的一部分运动保留下来,并改进数值计算方案使模式能够分辨更小尺度的运动和天气过程细节。过去的模式中被忽略的垂直加速度,在对流系统的发展中有决定性的作用,因而新发展的中尺度模式一般不再采用垂直加速度为零,即静力平衡假定,使模式更适用于预报或模拟中尺度系统。图 3 是利用我国新发展的中尺度模式 GRAPES-Meso(参见文献[3])在不同的分辨率设置下模拟的 2003 年一次台风过程,可

以看出模式的精细化程度对于台风的预报是十分重要的:当模式分辨率很粗时,台风的云带结构完全没有表现出来,只有当模式的分辨率相当高时,台风本体的结构才在数值模式中得到恰当的反映,而这对于台风的预报,特别是强度、风雨分布的预报是十分关键的。模式分辨率的提高无疑带来对计算机资源的更大需求,因此发展高效并行计算方案成了发展新数值预报模式的重要方面。需要指出的是模式动力过程精细度的提高并不等于模式发展的全部,但它无疑是提高模式性能不可缺少的重要内容。

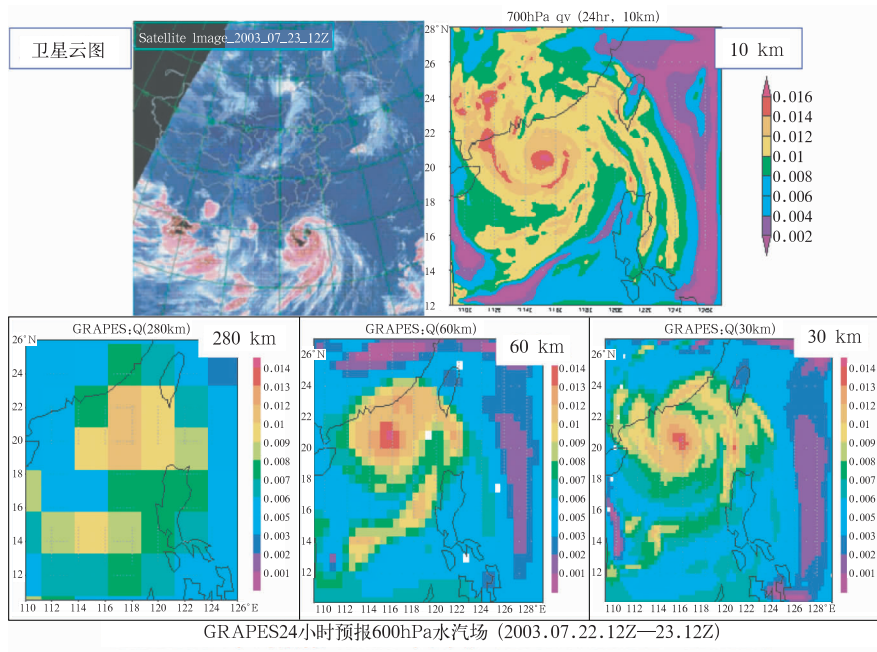


图 3 中尺度模式 GRAPES-Meso 在不同的分辨率设置下模拟的 2003 年一次台风过程(徐国强提供)

### (3) 模式物理过程的完善与精细化

在数值预报的早期,模式只包含大气动力过程,以后大气中的各类物理过程逐步通过直接的显式表达,或者通过一定的参数化方案引入到模式中,使模式中的大气过程越来越接近真实大气,不仅改进了对天气形势的预报,还使模式的预报内容扩展到各种天

气要素。目前的数值预报模式一般都包括大气中的云与降水过程,辐射能量的传输过程、边界层过程、各种下垫面与大气的能量与物质交换过程等,这些过程的表述也越来越精细。与我们最关心的暴雨等天气直接有关的云与降水过程则已经由简单的大气饱和凝结过程与对流参数化向细致描写成云致雨的复

杂微物理过程方向发展,模式内的水物质预报变量一般包括水汽、云中液态水与冰晶、雨水、雪、软雹等,复杂的模式水物质预报量可以多达 20 多种。模式所预报的不仅是地面的累积降水量,也包括云与降水的三维微物理信息,并在一定程度上预报了对流风暴内的环流过程。为了细致考虑下垫面的性质对大气的影响,先进的数值预报模式中下垫面的分类多达二十多种,界面与界面下发生的主要过程都被逐一加以考虑,使得模式能比较恰当地反映模式大气与海洋、陆面、地上或海上的冰雪等的相互作用及其对大气过程的影响,预报更为可信。大气中的气溶胶过程与大气化学过程也被一部分模式所引用,特别是涉及气候问题与环境问题的模式。模式物理过程的完善与细化对模式的动力框架与资料同化都提出了新的要求,因此后两者的发展实际上也包含了模式采用更精细的物理过程方案的需要。例如显式表示积云过程必定包含垂直加速度的显式计算,为此需要放弃静力平衡的假定并且建立各种相态水物质的资料同化方案。同样陆面过程的细化,需要相应的陆面资料同化。对于地形的作用,在优化模式动力框架中与地形相关的计算方案的同时,还增加了对次网格尺度地形的影响的描述。模式物理过程的细化进一步提高了模式预报的精度,也大大丰富了模式直接预报产品。

#### (4) 集合预报与数值预报结果的概率化

数值预报是作为初值问题提出来的,对一次具体的预报无论数值预报模式还是初值都是确定的,从这个意义上讲数值预报也是确定的。但实际上模式与初值只是大气过程与状态的近似,因此我们对未来大气的预报具有不确定性。基于对数值预报的不确定性的认识,近十几年发展起集合预报的概念与方法。集合预报模拟模式与初值的不确定

性,由此产生多个预报,可以获取关于一次具体天气过程预报的更多信息,特别是预报量的概率分布。即使在很多情况下最终使用的预报产品依然是单值的,但集合预报可以给出对预报可信度与误差范围的估计,增加了预报产品的应用价值。习惯上将构成集合预报的单个预报称为集合预报的一个成员,集合成员与作为集合预报出发点或参考点的确定性预报的初值或模式的差异称之为扰动。按照成员的形成方法,常将集合预报技术分为初值扰动、模式扰动以及将两者结合在一起的方法等。通常对全球天气尺度的预报比较强调初值的扰动,而对中尺度系统的预报则强调模式的扰动。集合预报在实际业务中发挥了很好的作用,因而已经成为各国数值预报业务的重要组成部分。图 4 是一个集合预报的典型个例,原来的确定性预报漏报的重要过程,通过初值扰动方法被一部分集合成员预报出来。集合预报的应用尽管只有短短的十几年历史,却显示了很强的生命力,不仅被应用到从短期气候预测、中尺度短时预报的各种尺度的预报,还被广泛地应用于资料同化与观测系统的研究,例如集合预报与卡尔曼滤波结合形成的集合卡尔曼滤波资料同化方法,利用集合卡尔曼变化进行观测对预报的敏感区的研究等。由于集合预报与其它数值预报技术相比更为年轻,因而相当一部分业务人员对集合预报还比较陌生,特别需要澄清的是集合预报可以提高现有模式的应用水平与效果,但不能替代新模式的发展,改进模式与改进对模式的应用方式是改进数值预报不可偏废的两个方面。反过来也不能认为现有模式不完善就不适合开展集合预报,集合预报本身就是承认现有的模式与初值的不确定性而改进数值预报的一种途径,与模式的改进是相辅相成的。



图 4 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)对破坏性的法国/德国风暴“Lothar”进行的集合预报结果(1999年12月26日12时世界时)

线条及阴影部分表示平均海平面气压(间距:4hPa)。最上方的两图:左图是确定性预报,右图为验证分析的结果。下方50张图分别对应各个预报成员的预报结果。注意:确定性预报未能捕捉到这个极端事件,有14个集合预报成员预测到的风暴剧烈程度与检验分析相似(引自文献[2])

包括前面4个方面在内的当代数值预报的科技进步与数值预报支持条件如高性能计算机与大气遥感资料的不断改善促成了数值预报的持续发展。目前欧洲中期预报中心的可信中期预报时效已经达到8天左右,其它国家的业务中期预报时效也达到或超过一周,数值预报模式对定点气象要素的预报已经有很强的实用性,由数值预报模式直接制作的各地温度、湿度、风、降水、云量与天气现象的时间序列预报已经在业务与服务中得到广泛的应用。重大的灾害性天气系统如热带气旋,不仅其位置与强度的预报有明显改进,大概有一半的热带气旋的生成可以在中期时效内预报出来。

## 2.2 数值预报存在的问题

当代数值预报尽管取得了很大成就,但存在的问题也还很多。对天气尺度的系统,

普遍接受的可预报时效的理论上限是两周,目前的实际可信预报时效离这一上限还很远,表明还有很大的发展空间。国际上过去几十年的发展速度大致是每十年可信预报时效可延长一天,这一进程无疑还需要加快。其中的一个环节是进一步改进预报的初值。目前使用的卫星资料实际只占已经获取的卫星资料的一小部分,增强同化系统的功能,从观测中提取更多有用的初值信息还有很多工作可做。模式中的大气与地球其它圈层的耦合也还很粗糙,这在一定程度上影响了可信预报时效的延长。中尺度数值预报远不如大尺度预报那么成熟,模式对于云与降水过程的描写存在很多不足,而模式中的水物质变量的初值形成方法只是有了一个开端,要稳定地对模式预报产生正的贡献,特别改进模式的降水强度与落区预报还需要做大量的工作。在研究中不少被证明对于中尺度系统的

发生发展有明显影响的物理过程在中尺度模式中还没有被正确地描述,例如中尺度系统的日变化问题,它受到云与下垫面上复杂过程的影响,现在的模式物理过程对于描写这些过程过于简单。这些缺陷也使得模式对中尺度系统的生成预报能力很低。集合预报尽管在一定程度上弥补了模式的缺陷,但正如前面提到的集合预报不能替代模式的发展,而集合预报技术也还有很多不足之处,特别是中尺度集合预报也还只是处于“初生”阶段。清醒的认识数值预报的成就与问题对数值预报的产品应用与数值预报的改进都是十分重要的。

### 3 数值预报与预报员经验的优势互补和数值预报的产品释用

尽管数值预报取得了巨大的成就并在业务预报中发挥了巨大作用,但预报员的作用依然是不可替代的,轻视预报员的贡献和他们主观经验的价值必然导致数值预报产品得不到有效应用与业务预报质量的下降,同时对数值预报本身的发展也是不利的。数值预报的优势在于所依据的物理定律的普适性与制作预报过程的客观性,以及量化的预报结果。但不可避免地把复杂的大千世界简单化,几条已经被大大简化处理的物理定律并不能概括全部天气变化事实,并且数值预报系统所包含的大量计算方案与参数的设定其实带有经验性与一定程度的主观随意性,因此数值预报的客观性是有局限的。与数值预报相反,预报员的预报很大程度上依赖于主观的经验,难以把握没有遇到的特殊天气事件,其结果也常常难以量化。但预报员在实践中积累的经验来源于对真实天气过程的体验,突破了模式在认识上的局限,有可能对模式不能把握的天气过程做出更好的预报。数值预报的定量化计算的要求还带来数值分析

对资料的简单化、模型化处理,重要的天气系统细节被模式预报所忽视,而预报员的主观分析却对关键的细节更加敏感。数值预报与预报员的主观预报各有优势,也各有弱点,在业务预报中应该向两者扬长避短、优势互补的方向努力。

### 4 数值预报的产品释用

数值预报产品释用的目的是充分发扬数值预报的优势,而根据其不足通过动力、统计的方法或主观经验加以订正,从而改进总体预报效果。为了做好释用,必须对数值预报产品的优势与问题有确切的了解。由于数值预报本身的技术发展很快,因此不仅释用的工具,如统计模型需要发展更新,释用的内涵也会随着科技发展而调整。上世纪后期我国数值预报产品的释用已经有了很大发展,特别是1980年代初,模式输出方法(MOS)与完全预报(PP)<sup>[1]</sup>等统计方法作为我国早期数值预报业务模式产品的使用工具在业务中得到广泛的应用,并对以后的研究与方法产生了很大影响。当时的思路与方法在今天依然值得借鉴,但必须注意数值预报技术在近三十年中的发展与变化。当时的模式分辨率大体在200~300km,即使对大尺度形势的预报也是相当粗略的,而关于具体气象要素预报的可用性还很低,没有有关定点定时要素的直接预报产品。当时首先需要对天气尺度的形势预报进行订正与细化,再根据天气尺度的形势推定具体的要素预报,可以说这是一种“天气尺度的释用”。而现在的情况已经有了根本的变化,模式分辨率的提高与可信预报时效的延伸不仅使得对天气形势的中短期预报有了相当高的精度与可信度,而且大范围天气现象的预报也已有了很高的可信度,对天气尺度的数值预报的订正与细化的任务已经大大地减轻了。与此同时,业务中

尺度数值预报系统已经在直接预报天气要素,但常常由于对中尺度天气系统的细节(强度、位置等)的预报误差而造成具体的天气预报误差,特别是强灾害性天气的预报误差。当前释用的主要任务是提高对中尺度天气系统细节与天气要素的预报能力,我们不妨将它称之为“中尺度释用”。另一方面,模式已经提供了比过去多得多的直接与天气有关的信息,如边界层内的动力稳定度、模式预报的云量,其中某些量比天气现象本身有更高的可信度,它们不仅为统计释用提供了更多备选的预报因子,使统计模式更具有物理意义,而且使所选取的预报因子与预报量之间的关系简单化,在统计上也更容易处理。例如对流层中层的位势高度与地面降水的关系一般会比中低云量与降水的关系复杂,后者在统计上处理起来会简单得多,而二十年前数值预报模式还不可能提供这类预报产品,现在它们也与前者一样在统计中释用了。部分预报员误认为数值预报的发展使得产品释用失去了生存的空间,而事实却是数值预报技术的进步使得数值预报产品释用的基本任务发生了变化,也提供了更多有利的条件。数值预报的产品释用应得到更多的重视,也需要适当调整技术思路,特别是更多地应用模式提供的中尺度信息解决局地灾害性天气的预报。

集合预报产品的释用是一个相对新的方向,对集合预报产品的释用应该更重视其提供的天气要素或事件的概率分布方面的信息。目前集合预报的应用有简单化倾向,例如只看集合平均,使集合预报的优势没有得到充分发挥。数值预报与传统的临近预报的结合是数值预报又一个新的应用。数值预报在一定程度上是“远视眼”,而基于实况分析的临近预报则是“近视眼”,探索两者的优势组合对提高变化剧烈的中尺度天气的预报水平是很有意义的。

## 5 我国数值预报的发展期待预报员的广泛参与

我国早在 1950 年代就开展了对数值预报的研究,但直到 1980 年代才建立正式的业务。经过二十多年的努力,我们已经从无到有建立起完整的数值预报业务体系,包括全球资料同化与中期数值预报系统、不同区域的资料同化与短期中尺度预报系统、针对特殊天气(如热带气旋、沙尘暴)的数值预报系统,还建立了短期气候的动力预测系统,这些系统在业务与服务中发挥了重大的作用。但由于我国数值预报业务起步晚、基础薄弱以及开始阶段计算机等支持条件不足,直到新世纪之初大部分数值预报业务都是建立在从国外引进的系统基础上,不仅技术的先进性受到技术提供方的控制,并且我国的数值预报人员难以全面掌握系统的底层技术,因而不能按照我国的天气气候条件与业务环境对数值预报系统进行深层次的优化,限制了系统预报性能的提高。从新世纪开始,我国数值预报领域的自主创新得到大幅度加强,经过多部门的共同努力,完全由我国科学家自主发展建立的全球与区域同化预报系统(GRAPES)已经开始应用于数值预报业务或业务前的试验<sup>[3]</sup>。尽管系统的完善与在预报能力上达到先进国家的水平还需要假以时日,但对我国数值预报的长远发展产生了深远的影响。

历来数值预报系统的研发与业务天气预报被视为两种不同的专业,两个专业的研究或业务的人员间的交流与合作很少,预报员基本不参与数值预报的研发或者改进。但实际上预报员是数值预报产品的最直接、最有专业水平的用户,他们对数值预报系统的性能,特别是实际效果的体验往往超过数值预报的研发专家,在数值预报的研究开发中是



可以有作为的。过去我国的业务数值预报模式与同化系统绝大多数是从国外引进的,我国的数值预报专业技术人员不掌握系统的底层细节,因此很难针对系统对我国天气的预报结果进行深层次的系统优化。当前我国数值预报逐渐转向自主创新为主,有针对性的深层次优化已经不仅是需要也已成为可能,预报员将可以为我国数值预报发展做出独特的贡献,其中包括参与对数值预报性能的评价、对数值模式方案的研究、新系统的试验与优化等多个方面。

对数值预报系统性能的全面评价必须有预报员的参与。无论对于资料同化还是模式预报结果的评价,只靠几个简单的客观统计指标是不够的。从主要天气系统的角度出发,通过对数值预报系统的同化预报能力的分析,预报员对确认系统的优化与改进的方向可以提供十分重要的线索。这种评价还应该包括对客观分析效果的评价。分析是预报的基础,如果分析结果有大的偏差,预报也不可能准确。而预报员对观测资料的使用尽管带有主观性,但有丰富的天气学知识与经验作基础,因此对资料的使用比资料同化系统更接近实际的大气状态。从经验的角度出发,对同化系统的检验与发展也是很有价值的。

具有天气预报实践经验的专家参与数值预报系统方案的研究也是有意义的。在数值预报系统中,无论是大气中的各种物理与动力过程,还是对观测资料的信息提取都被过度地模型化了。预报员的经验可以帮助鉴别这种近似是否可以容忍,因而对改进同化预报系统有特别重要的意义。数值模式中的大部分物理参数化方案是根据国外的观测事实而发展的,应用于我国预报并没有经过足够的试验研究,它们对于我国天气气候条件的适应形势是我国数值预报研究中的重大课题,而对我国天气过程特点的理解与体验是取得研究进展的重要条件,有经验的预报专家的参与无疑可以促进这方面的研究。

数值预报系统是在一个开发、试验、改进、再试验的循环中向前发展的,实际预报试验及其结果的分析是其中的重要环节。预报员参与数值预报系统的试验研究,对揭示系统存在的问题、加速系统预报性能的提高都很有帮助。预报员对数值预报产品的批评意见是值得重视的,其中常包含着数值预报的研发或运行人员所没有看到的问题,特别是我国目前从事数值预报研究或业务的大部分人员对作为自己预报对象的中国天气系统知之甚少,来自预报员的意见更显得重要。当然希望预报员对于数值预报技术不成熟的一面能有充分的理解,特别是关注我国数值预报系统的发展,帮助它茁壮地成长起来。

经过半个世纪的发展,数值预报已经成为预报员制作预报时不可或缺的重要依据,但预报员在业务预报中仍起着核心作用,无论对数值预报产品的应用,还是参与数值预报本身的发展,预报员能发挥作用的空間很大。了解当代数值预报的特点与局限对于科学、有效地应用数值预报产品是至关重要的。目前数值预报的研发与业务天气预报专业人员间的联系合作还很少,我们期待着更多预报员不仅用数值预报模式预报产品,也对数值预报有更深入的了解,还能参与数值预报的研究发展。如能这样,我国的天气预报必然会做得更准,数值预报科技水平也会有更大的提高。

**致谢:**作者感谢国家“十五”科技攻关项目“中国气象数值预报系统科技创新研究”各个课题提供的最新进展,并感谢徐国强博士等提供的图表。

## 参考文献

- [1] Eugenia Kalnay. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability[M]. Cambridge University Press, 2003.
- [2] WMO/TD1246. THORPEX International Science Plan, 2004.
- [3] 薛纪善. 我国新世纪初的数值预报科技创新研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 602-610.