数值天气预报的创新之路——从初值问题到反问题*

丑纪范

兰州大学大气科学学院,兰州,730000

摘 要

基于大气并非是一个确定论的系统,从信息论的视角考察了数值天气预报问题。认为表征初值和边值的数据可以视为输入信息(信息源),而数值模式则不过是一个信息变换机构,它把输入信息变换成预报结论而输出来,输出的预报结论则是未来天气状况的信息。于是预报的准确性受制于:一是输入信息所包含的输出信息的信息量,另一是信息在变换过程中丢失的信息量。从初值的形成过程揭示出了当前观测系统在一个时刻提供的数据没有包含初值所要求的全部信息,而缺失的部分或多或少的隐藏在过去的观测数据中。提为初值问题意味着只依据一个时刻的状态导致输入的信息量缺失,应考虑过去的历史数据以增加输入数据中所包含的预报量的信息。文中指出由于输出信息比输入还多的数值模式是不存在的,这样的改进带有根本性。进一步论证了数值模式的误差信息,也或多或少的隐藏在过去的历史数据中,为了充分使用过去的观测数据,本文建议改变问题的提法,不提成初值问题,提成反问题。资料同化本质上是反问题,其欠定性不应人为夸大。提成反问题的数值天气预报能充分应用过去的历史资料,将天气方法、统计方法、动力方法有机地结合在一起。对于这个反问题如何具体求解方面,在分析了业务和研究的区别,模式的普适性和针对性的统一的基础上,给出了反问题的具体解决途径。强调无需构建新模式(这是非常困难的工作),只需运行现成的模式,借助所关心的预报对象的历史数据来改造现成模式,因而是完全可行的。

关键词: 数值天气预报, 反问题, 信息论。

1 引 言

数值天气预报的研究和业务工作,在中国开展不算晚。目前,虽然已建立起了比较完整的数值预报业务体系,但是业务预报的准确率与国外先进水平还存在较大的差距,近10年差距是在扩大而不是缩小。对于导致落后的原因,仁者见仁,智者见智。由此提出了种种解决方案。这些方案尽管着眼点不同,从科技的角度看,似乎都是遵循国际上的发展趋势。国际上数值天气预报研究开发计划尽管各不相同,但基本趋势是一致的,技术是共同的。虽然也强调"我国自主知识产权","原创性科技成果",其实在基本理念,问题的提法上,无意越雷池一步。

中国数值天气预报事业的先驱和奠基人顾震潮先生,早在20世纪50年代就提出这样的问题:我们是不是只能一味模仿;跟在人家后面又永远跟不上呢?难道我们就不能比外国做得更好?他说:"大家研究气象,我们怎样比前人,比外国一定研究得好?""总之要有一些新东西。不然,方法、观点、材料、工具,无一不是与人家一样,那么一定不会比人家更好。对国外来说,由于人家工业基础好一些,器材仪器等物质条件一般说来也要好些,结果,我们还可能搞不过人家。愈搞愈落后,愈赶差距愈大。这不是笑话,而是十分可能的。"[1]

重要的是比外国做得好本身并不是目标,不应该为赶超外国而赶超外国。也不应该为创新而创新,但是难道不应该实事求是的分析考察一下国外在基本理念,问题的提法上是不是很完善,有没有带根本性的可改进的缺陷?作为数学物理问题的天气预报和气候预测应该怎样提法?早在20世纪50年代,顾震潮就尖锐地指出,数值天气预报虽然取得了很大成绩,但存在一个比较根本性的缺陷,一直提成

* 初稿时间:2007年6月20日;修改稿时间:2007年7月26日。

作者简介:丑纪范,主要从事数值天气预报、数值模拟以及气候动力学研究。

所谓初值问题，只使用一个时刻的资料[2-3]。众所周知，天气图方法、物理统计方法依据的是观测获得的数十年的历史资料，特别是近期的演变资料。那么，改变问题的提法，使现在的动力学模式、气候系统模式在作预报时，不仅用到初值，还要用近期的演变资料，乃至积累起来的数十年的历史资料，既考虑了物理规律，也考虑了气候系统的实际行为，岂不是更好吗？

今年是我的恩师中国科学院院士（前为学部委员）、北京大学教授谢义炳先生诞辰90周年。因此，作者就自己对此问题钻研、思考了多年的心得作一总结。用严密的数理语言，系统地阐述数值天气预报和气候预测可以有另外的提法，不提为初值问题，提为反问题。以此小文表示对谢义炳先生的敬意。

2　确定论背后的不确定

数值天气预报的基本理念是大气是一个确定论系统。挪威学者Bjerknes[4]提出数值天气预报概念时，明确表明“原则上大气在将来时刻的状态是由大气在一个时刻的状态决定的”。100多年来，尽管数值天气预报取得了很大的进展，但这一理念迄今未变，把问题提为微分方程的初值问题。

大气真的是一个确定论系统吗？

如果认为人类活动对天气、气候有影响，那么大气就不可能是一个确定论系统，未来的人类活动显然不是现在的初始状况决定得了的。

大气作为一个确定论系统与天气数值预报模式（不论什么模式）作为确定论系统不是一回事。大气状态是否需要无穷个参数来描述？不妨假定只需要n个，而数值模式的状态变量只有m个。于是，$n-m$个未被数值模式包含的次网格变量，就足以使数值模式的预报变得不确定了。如果这$n-m$个次网格变量遵循某种概率分布，则初始状态是按概率分布确定的，相应的预报值也只能按概率分布确定。值得注意的是，这里讲的初值的不确定，与众所周知的由于观测误差、分析误差和代表性误差导致的初值不确定不是一回事，那是把初值不准和模式不准视为数值天气预报误差的两个来源，通过改进资料同化系统来缩小初值误差，通过改进次网格过程参数化来缩小模式误差便成为标准的办法，舍此别无他途。而这里的初值的$n-m$个未被表达的次网格变量的初始状态的不确定性所造成的预报的m个变量的不确定，也可以看成是模式中存在的随机项造成的。初值不准（不完全）造成的误差，可以视为模式不准造成的误差。两者之间并没有不可逾越的鸿沟，而存在着由此及彼的桥梁。何不改变观点，把问题提得高些，索性改变提法，承认初始状态是不确定的，是一个概率分布，预报结果也是一个概率分布。其实现在的数值预报，虽然在理论上仍维持确定论的提法，但在实践上早已承认初值的不确定和模式的不确定，通过集合预报的办法转到了不确定的概率分布上来了，表现为预报结果是由各种可能情景构成的一个分布。结合决策理论向特定用户提供其最需要的信息。很自然地要产生这样的问题，既然如此，为什么不改变视角，从确定论转到概率论上来。

3　从信息论的视角来看数值天气预报问题

顾震潮最先将信息论用于气象问题，讨论了天气预报的评分和使用[5]。随后张学文将信息论用于讨论统计气象预报中的一些问题[6]。张学文在他的专著中用气象工作者易于理解的语言深入浅出的对信息论作了扼要的介绍。他认为气象预报问题本质上是如何取得未来时刻的信息问题。针对统计气象预报，他指出可以把预报因子看成是一个信息源，预报方法则是一个变换、传递信息的机构。预报因子（信息源）经预报方法（信息变换机构）变换成预报结论而输送出来。输出的预报结论中就包含有关预报对象（未来的天气状况）的信息。由此精辟地阐明了预报因子和预报方法在预报过程中的地位和作用。他强调使输出的信息比输入还多的预报方法是不存在的。这与输出的能量比输入的还多的热机不存在是类似的（即永动机不存在）。信息和能量一样，在变换、传送的过程中，只会减少（耗散），不会增加。

对数值天气预报，完全可以进行类似的分析。很自然地要提出这样的问题：对动力学的数值天气预报，什么是信息源？什么是变换、传递信息的机构？对提为初值问题的数值天气预报而言，我们认为表征边界条件和初始条件而输入的数据是信息源，而数值模式则是变换传递信息的机构。进一步要问：边界条件的数据提供的是什么信息？初始条件的数据提供的是什么信息？

大气是一个强迫耗散的非线性系统，存在着系统状态向外源的适应。从数学上讲，就是无论初始

状态如何，系统状态都会演变到状态空间的吸引子上[7-8]。这个吸引子是个混沌吸引子，其上确定了一个不变的概率测度，这个概率测度就是“气候”。它依赖于外强迫的状况，而外强迫不是别的，就是边界条件的数据。具体说就是达到大气上边界的太阳辐射状况，大气下边界的海洋、冰雪、陆地表面的物理状况。它们构成了对大气的热力强迫和动力强迫。反映外强迫状况的参数，当然也不是不随时间变化的，但相对于大气的状态变量而言，它们是慢变量，可将其视为控制变量。在强迫耗散的非线性气候系统中，系统的演变是状态变量向控制变量的非线性适应过程。适应后的状况“气候”是由边界条件数据决定的，而与大气的初始条件的数据无关。在这里展示出了“个别的运动趋向于平衡”（恩格斯），这是运动中的平衡，“总的运动破坏个别的平衡”（恩格斯），这是平衡中的运动[9]。可见，边界条件的数据，提供的是该时刻的“气候”的信息。设“气候”的可能状态是有限个状态（设为 n），那么，边界条件数据提供的信息为 $I=\log n-H_c$，H_c 为混沌吸引子上的概率测度 p^* 的熵[9]。

初始条件的数据提供的是什么信息？

数值天气预报是观测到了在 t_0 时刻状态变量的初始状态 φ_0，即初始分布 $p_o=(0.0,1\cdots00)^{\mathrm{T}}$，预测 $t_0+n\tau$ 时的分布 p_n。有 $p_n=P^n p_o$，其中 P 为对应于时间尺度 τ 的转移概率矩阵，p_o 提供的信息为 $I_{po}=H_c-H_n$。初始条件意味着在 t_0 时刻通过观测，系统的状态是确定的，随着时间的演变，系统的初始场作用衰减和向外源适应。设适应的时间为 T，则当 $n\tau=T$ 时，$p_n=p^*$，于是 $H_n=H_c$，$I_{po}=0$ 意味着初始条件数据所提供的信息，丧失殆尽。状态的不确定性（熵）由零（完全确定）增加到气候分布的熵。在 $n<\dfrac{T}{\tau}$ 时，初始状态的数据提供比气候分布更多的信息。至于提供信息的多少由熵的增长量决定，这意味着未来的状况存在着客观的不确定性，天气预报的准确率存在着理论上的上限。具体说也就是对于未来，客观上只能确定一个概率分布。我们如果把该概率分布的期望值作为预报值，该概率分布的离差作为准确率，那么这个准确率存在着理论上的上界，特别是众所周知的，天气尺度的逐日预报不能超过 2—3 周。

现在提为初值问题的数值天气预报并没有达到理论上的上限。如何能够逐步达到这个理论上的上限就是我们面临的问题。

是什么限制了预报的准确率？

从信息论的视角看存在 3 方面的问题：

一是表征初始状态的数据有的缺测，观测未能提供初值需要的所有数据，导致要预报的状态应有的对气候状态的偏差的信息不足。

二是表征边界状态的数据很多没有观测，导致对气候状态的信息不足。

三是信息变换、传送的机构（数值模式）在转换的过程中信息耗损过大。

因此，解决的办法就是要努力增加信息源（输入数据）所含的信息量和减少信息转换过程（数值模式的向前外推）中信息的耗损。将数值天气预报提成所谓初值问题就将解决的办法圈住在改进观测系统和改进次网格物理过程上，被套住了。“所以这样的提法无论在实际上还是在理论上都有很大的缺陷。为什么数值天气预报只是这样提法，从另外的角度来提，使它与天气图方法统一起来，不是更好吗？”[1]

4　问题应该怎样提法？——正问题和反问题

将气象要素限制为温、压、湿、风，称为模式变量，可以用 6 个 4 个自变量的函数来描述（3 个空间变量、1 个时间变量）。简记为 φ（向量函数）。这里暂不涉及大气成份、云微物理量等。模式变量 φ 随时间的变化要遵循物理规律，这些规律用数学语言表述为数学方程（偏微分方程组），于是把天气预报问题归结为微分方程的初值（边值）问题，即

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\boldsymbol{\varphi}(x,t)}{\partial t}=g(\boldsymbol{\varphi}(x,t),\alpha(x),t)\\ \boldsymbol{\varphi}(x,t)\big|_{\partial D}=\varphi_b(s,t)\\ \boldsymbol{\varphi}(x,t)\big|_{t=t_o}=\varphi_o(x)\end{cases}\tag{1}$$

已知 $\varphi_o(x)$，$\varphi_b(s,t)$ 求 $\boldsymbol{\varphi}(x,t)$，$t>t_o$

采用求近似的数值解，所谓逐步积分。首先对空间变量离散化，用 n 个实数来表征大气状态，偏微分方程组(1)化为常微分方程组。再对时间变量离散化，化为差分方程组，包括了边条件，式(1)变为

$$\varphi_{i+1}=K_i\varphi_i\tag{2}$$

$$\varphi\big|_{t=t_o}=\varphi_o\tag{3}$$

这里 $\varphi_i\in\boldsymbol{R}^n$，$K_i$ 是已知的算子，$K_i:\boldsymbol{R}^n\rightarrow\boldsymbol{R}^n$

t_o 为最近的观测时刻，由观测获得 φ_o，再由模

式(2)获得 $t_i>t_0$ 的预报值 φ_i，φ_o 和实际的不一致(初值误差)，K_i 和实际的不一致(模式误差)，便成了预报误差的来源。改进的办法被局限于使 φ_o，K_i 和实际一致。这是把天气预报作为正问题，正面攻坚去解决，应该说是最自然不过的了。

提为初值问题，“只使用一个时刻的资料，与天气图方法，与统计气象预报完全不同，形成差异很大的两个对立面，并且，在数学理论上来说，它不是什么真正的初值问题，因为这时初值(连同初始倾向)就满足方程本身。所以这样的提法无论在实际上还是在理论上都有很大的缺陷。把问题提得高一些，为什么数值天气预报只是这样提法，从另外的角度来提，使它与天气图方法统一起来，不是更好吗?”(“顾震潮”)[1]。

“怎样在提法上站得高看得远，更高地提问题呢?”

让我们从信息论的角度看。初值 φ_o 是输入的信息，它的信息不足的主要原因是 φ_o 中有缺测的部份，可以将 φ_o 分解为两个子集，记为 V_p 和 V_o，V_p 可由观测得到，而 V_o 则对观测而言是个“黑暗的角落”，未被观测系统所照亮。比如常规的地面、高空观测站，在占地球表面70%的海洋上就很稀少，卫星虽然对全球进行探测，但对风的观测很不足。因此，观测提供不了 V_o 这个子集里的量的信息应该不足为怪。顾震潮[10]、郭秉荣等[11]的工作表明 V_p 这个有观测子集的变量的过去演变情况，蕴含着 V_o 这个子集的信息。为了增加输入的信息，应该不输入这个没有观测的 V_o 的信息，而增加已有的 V_p 的过去演变的信息，这只有改变初值问题的提法才有可能。提法的改变导致了把寻求使 φ_o 和实际一致改变为把 V_p 的过去演变数据作为输入的信息。避免用无观测信息的数据，充分利用已有的观测数据，从而增加信息源(输入数据)所含的输出信息(预报量)的信息量。

从信息论的角度看，式(2)算子 K_i 是信息变换、传递的机构。对信息它只减不增，如果输入的信息过少，不能指望能作出好的预报，所以充分利用过去的观测数据，作为信息输入，这样的改进带有根本性。但是，如果输入的信息足够，在信息变换过程中丢失的信息量过多，也不可能作出好的预报。如所知，K_i 与实际不一致(模式误差)是造成信息丢失的根源，造成 K_i 与实际不一致的主要根源有：一是表征边界状态的数据很多没有观测，信息缺失，二是大气中的物理过程有的描述不准确或者根本没有描述。提为初值问题自然从正面来努力。难道从正面改进是唯一的办法？舍此别无它途。未必！边值、物理过程尽管有未知的部分，但是其最终结果我们知道一些。积累的数十年的气象资料显示出的气候状况就是符合实际的外强迫所致的混沌吸引子上的概率测度。过去的逐日变化的实况，特别是近期的演变状况包含了模式误差的信息。难道不能从过去已积累的数十年的资料和近期的演变资料中找出 K_i 与实际不一致的信息，并加以改进，减少变换过程中信息的丢失吗?

既然初值缺测数据的信息隐藏在已观测到的历史数据中，已观测到的历史数据中还包含有数值模式误差的信息。那么，问题应该这样来提，在作预报时将所有观测到的数据的全体作为输入信息(从纯理论上而非实际上说)。以求输入信息最大。

我们的观测系统观测到的数据的全体如何用数学语言表达?

设观测系统建立并开始观测的时间为 t_1，观测的时间间隔为 τ：则 $t_1+\tau$，$t_1+2\tau$……有观测，现在的观测时刻设为 $t_1+m\tau$。于是我们有 m 个时刻的观测资料。不同时刻观测的要素其性质和数量是不同的。设 $t_1+i\tau$ 时刻观测的数据为 k 个，则 k 是 i 的函数，有 $k(i)$，则观测数据的总量 $a=\sum_{i=1}^{m}k(i)$。在 $t_1+i\tau$ 时刻的 $k(i)$ 个观测，记为 $d_i(1)$，$d_i(2)\cdots d_i(j)\cdots d_i(k)$，$n$ 个表征大气状态的模式变量记为 φ_i，有

$$d_i(j)=M_{ij}(\varphi_i)+\varepsilon_i(j) \tag{4}$$

M_{ij} 为观测算子，$\varepsilon_i(j)$ 为 $d_j(j)$ 观测误差。

式(4)共有 a 个方程，为书写简单，写为

$$\overline{d}=M(\boldsymbol{\varphi})+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{5}$$

这里 $\boldsymbol{\varphi}$ 记 $\varphi_1,\varphi_2\cdots\varphi_m$，即模式变量在迄今为止的观测时刻的全体。现在我们用式(4)替换式(3)。至于式(2)，由于 K_i 和实际的不一致(模式误差)，故 $\varphi_{i+1}\neq K_i\varphi_i$，现令 $\varphi_{i+1}-K_i\varphi_i=E_i$，于是有

$$\varphi_{i+1}=K_i\varphi_i+E_i \tag{6}$$

加上

$$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\varphi})+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{7}$$

这里 $\boldsymbol{d}$，K_i，$\boldsymbol{M}$ 是已知的。$\boldsymbol{\varepsilon}$ 按误差理论由观测系统确定的均值为零、方差已知的正态概率分布。

E_i 是未知的。天气预报怎样提法呢?我们把它提成求 $\varphi_1,\varphi_2\cdots\varphi_m$ 和 φ_m+1 满足式(6)和(7)。这里 φ_m 不是别的,就是式(3)中的 φ_o,而 φ_{m+1} 则是 $t+(m+1)\tau$ 时刻的预报值,逐步外推可以获得 $\varphi_{m+2},\varphi_{m+3}\cdots$。

将式(6)、(7)与式(2)、(3)比较,动力模式中出现了未知的误差项,由于有了未知项,只有增加另外的信息才能求解。另外的信息从何而来?这要从实况观测资料而来。而式(7)就是满足式(6)的一系列特解的泛函。由此可见,方程中的未知项 E_i 的信息包含在式(7)的观测资料中。“如果已知微分方程中的各项和参数来求取方程的解,就是通常所说的正问题;而如果已知微分方程的一些特解的泛函,反过来确定微分方程中的一些未知项或参数,就是所谓的反(逆)问题[12]。实际问题大多属于反问题。本文提出对数值天气预报,需要改变问题的提法,由正问题改变为反问题。

和正问题不同,反问题通常是不适定的。即解不存在和解不唯一。对解不存在,通常采取求广义解,即构造目标泛函,求泛函极小的最小二乘意义下的解。对解不唯一则需要增加另外的先验信息;通常是经验性的来解决。

5　理想化不可避免——分别情况,不同简化

式(2)是现在的业务预报模式,只要它的预报还有误差,用式(6)来代替显然无不妥之处。问题是式(7)说的是将所有观测到的数据全部用上,那是从纯理论上而非实际上说的。实际上,要用上全部观测数据既不可能,也不必要。这就面临一个问题,哪些观测数据用?哪些不用?这是一个很关键的问题,是一个要花大力气才能解决得好的问题。欧洲中心(ECWMF)的全球模式的同化系统中,卫星资料占整个资料的 90%,而中国的业务上的同化系统用的卫星资料不多。更值得注意的是欧洲中心用于业务的卫星资料只有其所掌握的卫星资料的 10%,在中国资料的质量亟待加强。对同化系统而言,质量控制至关重要,不是资料用得多就好。俗话说“一粒老鼠屎,打坏一锅汤”。用哪些资料,不用哪些资料,与所要预测的现象有关。全球模式与中尺度模式是很不相同的。下面我们假设这个问题已经解决,即用哪些时刻的观测资料,每个时刻的何种资料都已确定,为了方便,仍用上述符号;$t_1,t_1+\tau\cdots t_1+m\tau$ 为资料时刻,式(7)写为

$$d_i = M_i(\varphi_i)+\varepsilon_i \qquad 1\leqslant i\leqslant m \tag{8}$$

式(8)是 $\varphi_1,\varphi_2\cdots\varphi_m$ 的 m 个方程,实质上是资料同化问题。而 φ_m+1 的确定则是预报问题我们把它分开成两个问题,加以不同简化来解决。

资料同化问题是求 $\varphi_1,\varphi_2\cdots\varphi_m$,按条件

$$d_i = M_i(\varphi_i)+\varepsilon_i \tag{9}$$

$$\varphi_{j+1} = K_j\varphi_j+E_j \tag{10}$$

这里 $i=1,2\cdots m$,而 $j=1,2\cdots m-1$,式(9)是 m 个方程,式(10)是 $m-1$ 个方程。

而预报问题是求 φ_n+1 满足

$$\varphi_i = C_i \tag{11}$$

$$\varphi_{i+1} = K_i\varphi_i+E_i \tag{12}$$

这里 $i=1,2\cdots n$。需要注意的是 m 和 n 不同。$n\gg m$。资料同化问题是要求出有观测时刻的模式变量 φ_i。预报问题则是在已知 $\varphi_1,\varphi_2\cdots\varphi_n$ 的情况下,由式(12)设法确定 E_n,从而求得 φ_n+1。下面两节讨论资料同化问题和预报问题作为上述反问题的具体解法。

6　同化实为反问题,困在虚假欠定性

如所知,同化问题是求 $\varphi_1,\varphi_2\cdots\varphi_m$,依据

$$d_i = M_i(\varphi_i)+\varepsilon_i \tag{13}$$

$$\varphi_{j+1} = K_j\varphi_j+E_j \tag{14}$$

这里 $d_i\in R^{m(i)}$,M_i 是观测算子,K_j 是数值模式,都是已知的。$\varphi_j\in R^n$ 是待求的。E_i 是未知的,表征数值模式预报的误差。显然如果不依据先验知识提出对 E_i 的限定,让它完全任意的话,则式(14)形同虚设,不起任何作用。这样一来问题的关键就集中在如何给出 E_i 的限定。这是一个没有标准答案的问题,不同作者可以根据其知识和经验作出不同的假定。原则上是构造出一个函数类 Ω,认定 $E_i\in\Omega$。再构造一个 E_i 的目标泛函 $J(E_i)$,把问题化成变分问题,求泛函极小[12]。

如果想不涉及由 E_i 带来的复杂性。最自然地便是作最大简化,仅考虑式(13)。即依据已知的 d_i,M_i 求 φ_i。显然,这是一个反问题。实际上,三维变分就是解的这个反问题。由于 $\varphi_i\in R^n$,$d_i\in R^{m(i)}$,而通常 $m(i)\neq n$。这个反问题是高度欠定的。必须要有另外的信息。“背景场”在这个背景下被引入了。所谓“背景场”不是别的就是数值天气预报给出的 $t+i\tau$ 时刻 φ_i 的预报场。数值天气预报本来是作

为初值问题提出来的。要作预报必须先根据观测资料分析出初始场,分析是预报的“先行官”。现在初始场的分析需要“背景场”,这样一来,预报反而成了分析的“先行官”。这样运行了足够长时间以后,人们已经搞不清是先有鸡(背景场),还是先有蛋(分析场)了。

值得注意的是虽然三维变分实际上是解式(13)反问题,但并没有按解反问题的理念往前走。而是将“背景场”视为另一种观测信息,而依据最优估计(统计意义下),取二者的加权平均。如所知,即将一个目标函数 $J(\varphi_i)$ 极小化。

$$J(\varphi_i)=\frac{1}{2}\{(\varphi_i-\varphi_i^b)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{-1}(\varphi_i-\varphi_i^b)+[M_i(\varphi_i)+d^i]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{O}^{-1}[M_i(\varphi_i)-d_i]\} \tag{15}$$

这里 φ_i^b 是背景场,φ_i 和 φ_i^b 都是 n 维向量,d_j 是 $m(i)$ 维向量,$\boldsymbol{B}^{-1}$ 是 $n\times m$ 预报误差协方差矩阵,$\boldsymbol{O}^{-1}$ 是 $m\times m$ 观测误差协方差矩阵。这样一来,背景场误差协方协矩阵 $\boldsymbol{B}^{-1}$ 起的作用很大。资料同化问题被引导到确定 $\boldsymbol{B}^{-1}$ 上去了。为了能得到随流型而变的 $\boldsymbol{B}^{-1}$,现在又由变分同化转向集合卡尔曼滤波。

让我们沿着解反问题的理念往前走。也就是求 φ_i,满足

$$d_i=M_i(\varphi_i) \tag{16}$$

这里 $d_i\in\boldsymbol{R}^{m(i)}$,$\varphi_i\in\boldsymbol{R}^n$,$M_i$ 是已知的观测算子。有背景场 φ_i^b。如何看待 φ_i^b? 观测是唯一的信息源。φ_i^b 被视为 φ_i 的初猜值,也就是与 φ_i 很接近的一个场。令 $\varphi_i-\varphi_i^b=\varphi'_i$ 于是有

$$d_i-M_i(\varphi_i^b)=d'\approx M'_i(\varphi^b)\varphi'_i \tag{17}$$

$d'_i\in\boldsymbol{R}^{m(i)}$,$\varphi'_i\in\boldsymbol{R}^n$,而 $M'_i(\varphi_i^b)$ 是观测算子 M_i 的切线性算子,是一个 $m(i)$ 行 n 列的矩阵。式(16)是线性反演问题。求得 φ'_i 后,可以将 $\varphi_i^b+\varphi'_i$ 作为新的背景场,这样就构成一个迭代过程,如果收敛的话,那么,最终的由观测决定的解与 φ_i^b 取值无关,φ_i^b 在这里起的作用与在三维变分中起的作用是很不一样的。

式(16)这种线性反演问题有很完善的理论[13]。简述如下:

$$设\ \boldsymbol{Y}=\boldsymbol{HX} \tag{18}$$

$\boldsymbol{X}\in\boldsymbol{R}^n$,称为参数空间,$\boldsymbol{Y}\in\boldsymbol{R}^m$ 称为资料空间。$\boldsymbol{H}:\boldsymbol{R}^n\rightarrow\boldsymbol{R}^m$ 的 m 行 n 列的矩阵算子。存在一步一步的算法,由 $\boldsymbol{H}$ 可以得到一个广义逆矩阵,$\boldsymbol{H}^{-1}$,$\boldsymbol{H}^{-1}$:$\boldsymbol{R}^m\rightarrow\boldsymbol{R}^n$ 的 n 行 m 列的矩阵,有

$$\tilde{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{Y} \tag{19}$$

$\tilde{\boldsymbol{X}}$ 就是由式(17)求得的 $\boldsymbol{X}$ 的反演解。

线性反演理论的精采之处在于:

定义:R^n 中满足 $\boldsymbol{HX}=0$ 的 $\boldsymbol{X}$ 的全体组成的向量集合,记为 $\boldsymbol{V}_o$。

$$\boldsymbol{V}_o=\{\forall\boldsymbol{X}\in\boldsymbol{R}^n\mid\boldsymbol{HX}=0\} \tag{20}$$

$\boldsymbol{V}_o$ 是参数空间中的“黑暗角落”,观测值 $\boldsymbol{Y}$ 中没有 $\boldsymbol{X}$ 在 $\boldsymbol{V}_o$ 空间的分量的信息,$\boldsymbol{X}$ 在 $\boldsymbol{V}_o$ 空间分量的改变不会对 $\boldsymbol{HX}$ 的结果有影响。$\boldsymbol{V}_o$ 空间的存在导致反问题的解不唯一。反问题在 $\boldsymbol{V}_o$ 空间的解必需求助于先验信息。具体到式(17),广义逆矩阵给出的解,在 $\boldsymbol{V}_o$ 空间的分量取为零。即 $\varphi'=0$,这意味着在 $\boldsymbol{V}_o$ 空间取背景场在 $\boldsymbol{V}_o$ 空间的值作为反演值。

定义 $\boldsymbol{R}^m$ 中满足 $\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{Y}=0$ 的 $\boldsymbol{Y}$ 全体组成的向量集合,记为 $\boldsymbol{U}_o$。

$$\boldsymbol{U}_o=\{\forall\boldsymbol{Y}\in R^m\mid\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{Y}=0\} \tag{21}$$

$\boldsymbol{U}_o$ 是资料空间中的“无信息区域”。$\boldsymbol{Y}$ 在 $\boldsymbol{U}_o$ 中的分量对 $\boldsymbol{X}$ 无影响,意味着它不包含 $\boldsymbol{X}$ 的信息,如果 $\boldsymbol{Y}$ 在 $\boldsymbol{U}_o$ 空间的分量不为零,导致反问题的解不存在。令 $\boldsymbol{Y}$ 在 U_o 空间的分量为零,使反问题解存在(最小二乘)

$\boldsymbol{V}_o$ 空间的存在反映信息不足,其大小是信息不足的度量。$\boldsymbol{U}_o$ 空间的存在反映信息多余,其大小是信息多余程度的度量。$\boldsymbol{V}_o$、$\boldsymbol{U}_o$ 是由算子 $\boldsymbol{H}$ 确定的,与观测数据无关。而算子 $\boldsymbol{H}$ 是由观测系统决定的。什么样的观测系统就有什么样的 $\boldsymbol{V}_o$、$\boldsymbol{U}_o$。由此可见,同样是依据 φ' 和式(21),但是作为反问题来解与变分方法不同,并不限于获得一个解,而是探讨所有可能的解,从全局视角揭示出信息多余和信息不足的具体状况,使资料同化不仅仅局限于获得数值预报的初值,还可以用来通过计算机上的数值试验来合理地设计和改进观测系统。其实,资料同化问题最重要的是:“知之为知之,不知为不知,是知也”(论语·为政)

线性反演理论的精彩之处还在于给出了方案好坏应如何评估? 反问题

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{HX} \tag{22}$$

解得 $\tilde{\boldsymbol{X}}$ $\quad\tilde{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{Y} \quad (23)$

于是有 $\quad\tilde{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{HX}=\boldsymbol{RX} \quad (24)$

$\boldsymbol{R}$ 称为分辨率矩阵,反映了反演解 $\tilde{\boldsymbol{X}}$ 与实际 $\boldsymbol{X}$ 的关系,另一方面由反演解 $\boldsymbol{X}$ 代入式(22)得到 $\tilde{\boldsymbol{Y}}$,有

$$\tilde{\boldsymbol{Y}} = \boldsymbol{H}\tilde{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{Y} \qquad (25)$$

$\boldsymbol{P}$ 称为信息密度矩阵，反映了反演解 $\boldsymbol{X}$ 拟合实际资料的程度。希望 $\tilde{\boldsymbol{X}} \to \boldsymbol{X}$，就要 $\boldsymbol{P} \to \boldsymbol{I}$(单位矩阵)，希望 $\tilde{\boldsymbol{Y}} \to \boldsymbol{Y}$，就要 $\boldsymbol{P} \to \boldsymbol{I}$。然而，提高分辨率($\boldsymbol{R} \to \boldsymbol{I}$)和减小方差($\boldsymbol{P} \to \boldsymbol{I}$)往往是相互矛盾的，两者不可得兼，而只能在二者之间取折衷。很自然地要提出这样的问题，根据观测值 $\boldsymbol{Y}$ 求 $\boldsymbol{X}$ 时，单纯追求对观测数据的拟合，如按变分方法求泛函极小，是合适的吗？

值得注意的是直接解反问题的上述方法，对背景场使用的概念与三维变分很不相同，背景场并不看成是另一种测量，因而不需要知道背景场误差的协方差矩阵 $\boldsymbol{B}^{-1}$。背景场的作用在于在观测没有提供信息的 $\boldsymbol{V}_o$ 空间中，作为先验信息给出反演值(显然这实在是无奈之举!)，在有观测信息的空间中它不起作用。作为一个近似的第一猜值在对非线性的观测算子线性化，并使迭代过程收敛方面，有着重要的不可缺少的作用。背景场是需要的，背景场误差的协方差矩阵是不需要知道的。

很自然地要发生这样的问题，上述比较都是理论上的，依据同样的式(13)和背景场 φ_i^b，三维变分和直接反演都可以得出 φ_i。得出的结果是不同的。哪一个更符合实际？这完全可以通过一些理想化的模型(自由度较少，观测算子较简单，给定 φ_i 和 M_i 后，算出 d_i，加以扰动，并由 φ_i 构造出 φ_i^b)进行数值试验。请读者自行试验判断。

直接反演也和三维变分一样存在着两个既有区别又有联系的缺陷：这就是问题是高度欠定的($\boldsymbol{V}_o$ 空间过大)和得到的初始场和模式不是动力协调的。为此人们设法利用多个时刻的资料。这就回到要解式(13)和(14)。如所知，如果不对 E_i 作出限定，则式(14)形同虚设。最简单的办法就是令 $E_i=0$。于是

$$\begin{cases} d_1 = M_1(\varphi_1) \\ d_2 = M_2(\varphi_2) = M_2(K_1\varphi_1) \\ \cdots\cdots \\ d_i = M_i(\varphi_i) = M_i(K_{i-1}K_{i-2}\cdots K_1\varphi_1) \\ \cdots\cdots \\ d_m = M_m(\varphi_m) = M_m(K_{m-1}K_{m-2}\cdots K_1\varphi_1) \end{cases} \qquad (26)$$

这意味着模式是完满的。虽然要求的初始场是 φ_m，但先不求 φ_m，而求 φ_1。φ_1 的自由度是 n，式(26)却有 $a=\sum_{i=1}^{m}k(i)$ 个方程，这就缩小了欠定性，求得 φ_1 后通过数值模式向前积分得出 φ_m 作为初始场。如果 φ_1 和模式不是动力协调的话，那么经过积分调整，可以认为 φ_m 是动力协调的了。

式(26)是与式(13)一样的反问题。四维变分实际上是三维变分的推广。它虽然解的是式(26)的反问题，但没有按反问题的理念往前走。对式(26)同样可以直接反演求出 φ_1，再由 φ_1 通过数值模式向前积分得到 φ_m。

解式(26)，不论是四维变分或是直接反演，解决欠定性和获得与模式协调的初始场是建筑在模式是完美的($E_i=0$)这个基础上的。如果模式误差不能不考虑。难道就没有解决这个问题的别的办法？

何谓“与动力模式协调”？

如所知，大气向外源的非线性适应，使其状态演化到吸引子上，对数值模式而言，状态变量 $\varphi \in \boldsymbol{R}^n$，而吸引子 S 是 $\boldsymbol{R}^n$ 中的一个体积(测度)为零的点集。存在 3 种特征的时间尺度，即趋向吸引子的快变的适应过程；在吸引子上的演变过程(天气变化)；吸引子本身因外强迫的缓慢变化相应的发生更为缓慢的整体特性的变化(气候变化)。“数值模式能够有效描述的是演变过程，快变化成了一种干扰，提出了要求初值与动力模式协调的初始化问题。对于更为缓慢的整体特性的变化问题，最好是另外设计数值模式来研究”[14]。初始场要“与动力模式协调”就是要在吸引子 S 上，避免出现趋向吸引子的快变的适应过程。任一观测值相当于在 $\boldsymbol{R}^n$ 空间中取一点 ω。由于 S 是一个体积为零的点集，那么，$\omega \in S$ 的概率为零，$\omega \bar{\in} S$ 的概率为 1，显然必需经过处理才有可能符合实际。这就是初始化的本质和必要性。既然初始场要在吸引子 S 上，而 S 是 $\boldsymbol{R}^n$ 中一个体积(测度)为零的点集，它的自由度要远远小于 n。设 n 中一个维数尽可能小的子空间 $\boldsymbol{R}^m$，$\boldsymbol{R}^m \subset \boldsymbol{R}^n$，$m \neq n$ 覆盖了吸引子 S。未知量只有 m 个。而不是 n 个。可见，在 $\boldsymbol{R}^n$ 中求解，欠定性被人为的夸大了。正是这个虚假的欠定性使资料同化问题陷入了困境。

回到式(17)的求解，即求 φ'_i 满足

$$d' = M'_i(\varphi^b)\varphi'_i \qquad (27)$$

$\varphi'_i \in \boldsymbol{R}^n$，但是我们在求解式(27)时，把解限定在 S 中，即要求 $\varphi'_i \in S$，这就大大地降低了问题的欠定性，甚至根本不是欠定的了。由于 $\varphi'_i \in S$，求得的解是“与动力模式协调的”一举两得。

问题是如何找到支撑起这个吸引子的向量集(基底)。作为第一步如何找到覆盖吸引子 S 的 $\boldsymbol{R}^m$ 子空间,或者支撑 $\boldsymbol{R}^m$ 的 m 个基底。如果在 $\boldsymbol{R}^n$ 中有一个 $\boldsymbol{R}^m$ 子空间,$\boldsymbol{R}^m \subset \boldsymbol{R}^n$,$m \ll n$ 那么从理论上讲只要找到 $\boldsymbol{R}^m$ 中 m 个线性独立的样本,它就构成了支撑起 $\boldsymbol{R}^m$ 的一组基底,$\boldsymbol{R}^n$ 中的任何向量都可以用它的线性组合来表示。通过运行数值模式可以得到足够多的 S 上的样本,如何从中产生出我们需要的 $\boldsymbol{R}^m$ 的基底呢?经验正交分解方法(EOF),或者 SVD 就可产生[15-16]。从理论上讲上述方案是完全可行是,但要用于实际(业务)还有大量工作要做。

如果认为预报误差主要是初值不准,相对而言模式在传递信息上损耗较小,在这种情况下,解式(26)时,将求的解 φ_1 限定在吸引子上,将是一个很好的同化系统。从理论上讲是没有原则困难的。

需要指出的是将解限制在 S 上的问题并没有解决,S 的点固然都在 $\boldsymbol{R}^m$ 中,但在 $\boldsymbol{R}^m$ 中不等于在 S 上。为了进一步缩减欠定性和确保初始场与动力模式协调,应将解真正限制在 S 上,这是有待研究解决的问题。

7 由果求因、以史为鉴

回到预报问题式(10)和(11)。即求 φ_{m+1},满足

$$\varphi_i = C_i \tag{28}$$

$$\varphi_{i+1} = K_i \varphi_i + E_i \tag{29}$$

这里 $i=1,2\cdots n$。易见,当 $n=2$,而 $E_1=0$ 时,蜕化为

$$\begin{cases} \varphi_1 = C_1 \\ \varphi_2 = K_1 \varphi_1 \end{cases} \tag{30}$$

这就是现在的作为初值问题的数值天气预报。这里考虑 n 足够大,即用数十年的历史数据。对预报 φ_{m+1} 而言,与原先初值问题不同就在于有 E_m。E_m 就是模式误差,主要归因于次网格过程参数化描述的误差。从改进物理过程的描述,使模式更“逼真”于实际大气。“正面地改进模式的各个环节来发展模式是非常重要的,但无论怎样发展,距完美模式仍有很大距离,模式中未知的误差部分总是客观存在的”[17],从另一方面看,过去的历史数据中蕴含了模式误差的信息。不一定非要由因求果,也可以由果求因。任何一个问题都有正反两个方面。所谓正难则反易,很多时候,从正面解决问题相当困难,这时如果从其反面去想一想,常常会茅塞顿开,获得意外的成功。

解式(28)和(29)这样的反问题,必需依靠对 E_i 的先验知识。

如何改进次网格过程参数化?

可以从数十年的历史资料中提取信息。如果 E_i 是次网格参数化过程所导致。那么它应该能用模式变量 φ_i 来表达,也就是它应该是 φ_i 的函数,即

$$E_i = H(\varphi_i) \tag{31}$$

关键在确定函数形式 H,如何找出 H?

通过历史回报式(29),我们得到两个数据集,φ_i 和 E_i,$i=1,2\cdots n$。利用历史资料相似信息直接估计 E_i 以获得 H 的相似误差订正法[18-19],是一个不错的解决办法。它全面地引入相似观点,初步试验显示出应用前景。

如何借鉴天气图方法的外推,考虑场演变的连续性?

可以考虑近期的资料,设 $E_i=q(t)$,将 $q(t)$ 取为低阶多项式,即 $q(t)=a_0+a_1t+\cdots+a_lt^l$

概括地说,将 E_i 分解为下列 4 部分:

$$E_i = \overline{E} + H(\varphi_i) + q(t) + E'$$

$\overline{E}$ 为 E_i 的均值,是系统性误差,即气候漂移。$H(\varphi_i)$ 为 E_i 中由 φ_i 能确定的部分,是可参数化的次网格过程。$q(t)$ 为 E_i 中根据时间序列外推能确定的部分。E' 为 E_i 中除去 3 部分后的余项,被视为随机变量,反映未来的不确定性,可以统计上得出其概率分布。然后,根据这个概率分布产生出一组样本,可用来作集合预报,从而可以集合成员的离散程度先验的给出预报可信度的估计。针对模式不确定性的集合预报是当前研究的热点。提出了一些方法:如扰动单一模式的边界条件或物理过程,采用不同参数化方案,多模式集合,超级集合等。这些方法都是从因到果的正问题思考。这里的模式不确定性集合预报方法则是由果求因的反问题思考的,完全是基于不同理念的。

8 结 论

数值天气预报有走中国自主创新之路的必要性。如果说在工业、农业、医学这些领域,我们不必非要赶上和超过国际的先进水平才行的话,数值天气预报就很不一样了。因为它的目的就在提出未来天气状况的信息。而未来天气状况的信息,现在(至少在和平时期)在世界上并不是保密的。欧洲天气

预报中心、日本等都在发布。我们发布的数值预报，如果准确率赶不上欧洲和日本的话，预报员就用欧洲和日本的。这样一来，我们在数值预报方面的投入，没有发挥应有的作用。这就使得我们发布的业务数值预报，对中国境内的预报一定要比欧洲和日本的准确率高或者至少相当才有意义。可是，在综合探测系统和与之相关联的取得的资料方面，在电子计算机的运算速度和存储方面，中国处于劣势。因此，如果我们没有和他们不同之处，也就是我们有他们没有的东西，那就要问我们凭什么能和他们相比。这是一个非常严肃的问题。这就是必需有与他们不同之处。这是依靠去国外考察、学习和引进解决不了的问题，只有走中国自主创新之路。

凡事都有两面，必要性和可能性。光有必要性而无可能性，必要性是落空的。在数值天气预报领域有没有走出不同于国外的路的可能性呢？这就要看国外走的路是不是已经尽善尽美，不存在什么缺陷可以被我们改进。毕竟我们不能为创新而创新。

本文认为国外走的路并非尽善，大可改进。存在着建立不同于欧洲和日本的数值天气预报的业务系统的可能。国外把问题提为初值问题，“只用一个时刻的资料是一个比较根本性的缺陷”[2]、“缺乏教养”[20]，精细逼真的道路使预报缺乏针对性，纯而又纯的确定论是片面的。

本文针对国外道路存在的缺陷，从信息论的视角，依据强迫耗散非性线大气动力学和线性反演理论的丰硕成果，提出改变对问题的提法，由初值问题改为反问题。

本文对所提出的反问题提出了具体解法；即从现有的业务数值天气预报模式出发，借助丰富的过去的历史数据(所关心现象的实际行为)，将现有的数值模式“本地化”。而所用的技术都是现成的，是完全可行的。其特点是：(1)起点高，从综合了动力学成就的现行的数值预报业务系统出发，并且可随着业务系统的改进而改进。(2)劲头足，将物理规律和历史数据合二而一，调动了两个积极性，(3)方向对，由果求因，事半功倍。承认不确定性，采用概率统计理念，符合大气实际。

需要强调指出的是这些都仅仅是理论上的，要成为业务系统还有大量的工作，目前只不过是万里长征走出了第一步。我们相信在不远的将来，中国有志的年青人一定会走出中国自主创新之路。让我们用谢义炳先生的话作为本文的结语：“我们不能盲目地跟外国，我们常跟外国跟不上，他们一转弯子，我们还沿着切线跑，拼命追他们干什么呢？他们就那么灵呀！他们就都对吗？”[21]。“对气象科学技术来说，是根据中国的情况，走中国的道路，我们不必以赶超国际水平为目标，却会顺带地达到这个目标”[22]。

参考文献

[1] 本书编委会编.开拓奉献 科技楷模——纪念著名大气科学家顾震潮.北京:气象出版社,2006:424pp
[2] 顾震潮.天气数值预报中过去资料的使用问题.气象学报,1958,29(3):176-184
[3] Koo chen-chao. On the Equivalency of Formulation of Weather Forecasting as an Initial Value Problem and as an “Evolution" Problem. In: The Rossby Memorial Volume Oxford University. Newyork Press,1959
[4] Bjerknes V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Stanpunkt der Mechanik und der. Meteor Zeits, 1904,21:1-7
[5] 顾震潮.从讯息论看天气预报的评分和使用.气象学报,1957,28(4):256-263
[6] 张学文.气象预告问题的信息分析.北京:科学出版社 1981:177pp
[7] 李建平,丑纪范.大气吸引子的存在性.中国科学(D辑),1997,27(1):89-96
[8] 李建平,丑纪范.大气方程组的惯性流形.中国科学(D辑),1999,29(3):270-278
[9] 丑纪范.大气科学中的非线性与复杂性.北京:气象出版社,2002:204pp
[10] 顾震潮.作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变做预报的等值性.气象学报,1958,29(2):93-98
[11] 郭秉荣,史久恩,丑纪范.以大气温压场连续演变表征下垫面热状况的长期天气数值预报方法,兰州大学学报,1977,4:73-90
[12] 丑纪范,任宏利.数值天气预报——另类途径的必要性和可行性.应用气象学报,2006,17(2):240-244
[13] Wiggins R A. The general lineral inverse problem: Implieation of surface waves and free oscillations for Earth structure. Rev Geophys Space Science, 1972,10:251-285
[14] 丑纪范.四维同化的理论和新方法//廖洞贤,柳崇健.数值天气预报中的若干新技术.北京:气象出版社,1995:464pp
[15] 张邦林,丑纪范.经验正交函数在气候数值模拟中的应用.中国科学(B辑),1991(4):442-448
[16] 张邦林,丑纪范.经验正交函数展开精度的稳定性研究.气象学报,1992,50(3):342-345
[17] 任宏利,丑纪范.数值模式的预报策略和方法的研究进展.地球科学进展,2007,22(4):376-385
[18] 任宏利,丑纪范.统计-动力相结合的相似误差订正法.气象学报,2005,63(6):988-993
[19] 任宏利,丑纪范.在动力相似预报中引入多个参考态的更新.气象学报,2006,64(3):315-324
[20] Gray W M. Climate perdition methodology//Proceeding s of the Twenty-fouth Annual clinate Diagnotics and Predition and

Predition Diagnotics and Predition and Predition Workshop. Tucson, Arizona. Nov5—9 1999. Doc NOAA. NWS, NCEF CPC,2000:145-148

[21] 谢义炳.气象科学发展的趋势和我们的对策.内蒙古气象. 1981,6:1-10

[22] 谢义炳.回顾过去,瞻望未来,促进我国气象科学技术发展的新高潮.气象学报,1983,41(3):257-262

AN INNOVATIVE ROAD TO NUMERICAL WEATHER PREDICTION ——FROM INITIAL VALUE PROBLEM TO INVERSE PROBLEM

Chou Jifan

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract

Given the fact that atmosphere is by no means a determinate system, this paper considers the numerical weather forecast in the view of information theory. The initial value and boundary value can be regarded as input information(information sources and a numerical model is just a tool which exchanges information. Numerical models can transform input information into results of the prediction of future weather information. So the forecast accuracy is enslaved to two aspects: one is how much output information is contained in input information, the other is how much information will be lost in the process of information transformation. The process of generating initial value means that the observational data of a moment does not include all required information for a model's initial value, and the absent information is more or less hidden in the historical observations. Therefore, it is necessary to utilize historical data to increase predicted information which is included in the input data. This paper concludes that a numerical model which can generate more output information than input information, does not exist, and inreasing input information is of essential sense. Furthermore, this paper demonstrates that model errors are also more or less hidden in historical data. In order to make good use of the historical observational data, this paper suggests that the forecasting problem should be regarded as an inverse problem rather than an initial value problem. Data assimilation is essentially an inverse problem, and its under-determination should not be artificially exaggerated. The numerical weather prediction, an inverse problem, can not only make full use of historical data, but also use synoptic methods, statistical methods and dynamical methods in combination. This inverse problem can be resolved in practice by a specific method which synthesizes distinction between operational analysis and research results, universality of models, as well as statistics of pertinence. Therefore, it is a feasible approach to use historical data to improve model predictions without constructing a new model, which by any means is a very difficult work.

Key words: Numerical weather forecast, Inverse problem, View of information.