

客观分析和四维同化

—— 站在新世纪的回望

(I) 客观分析概念辨析

王跃山

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要 该文专论客观分析的概念。从大家熟悉的名词“分析”入手, 给客观分析下一个相当精确定义。介绍了客观分析定义的历史演变, 同时发表了对这些定义的评论。阐述了客观分析乃是应数值预报的需要而诞生, 但又有独立于数值预报的多种用途。辨析了客观分析同数值预报的初值、插值和四维同化的关系。强调了客观分析的重要性, 希望以此能稍稍改变国内看重模式研究、轻视分析工作的不正确观念。

关键词 客观分析 初值 插值 同化

引言

人类已经迈进了 21 世纪。对于中国的气象、海洋事业来说, 这个世纪具有特别的意义: 卫星观测让我们的视角伸进了过去从来不能涉猎的地域, 比如广阔的洋面及其以上的大气。这对我们进一步认识大气和海洋的运动规律, 从而能够比较准确地预测它们, 不能说不是一个至关重要的条件。虽然我们的气象卫星目前还只能探测到有限的大气要素, 比如说近年内尚无装载散射计的计划, 这就意味着从卫星的探测中我们仍得不到风向量的信息, 但不管怎样, 太空中已有我们的气象卫星在探测着大气辐射, 从中可以反演出大气等压面的高度和温度; 卫星云图让我们能直观地监视着大气系统的演变, 并且从这种演变还能估算出某些高空风的大小。此外, 我们不久还要发射海洋卫星。到那时, 海浪、海冰、风暴潮乃至海流都会得到有效的监测。总之, 新世纪为我们展示了美好的前景。

当我们一只脚刚刚跨入新世纪的门槛之际, 当我们怀着欣喜的心情去迎接新世纪的曙光之时, 常常身不由己地回望那刚刚走过

的 20 世纪——迄今为止人类最为辉煌的世纪! 在这些辉煌之中, 数值天气预报的诞生和发展无疑是一簇夺目的璀璨之光。

当人类刚刚进入 20 世纪之时, 英国年轻的数学家 Lewis Fry Richardson 试图用数学计算来预报天气。为此, 他研究了计算大气运动的理论和方法, 研究了大气中存在的各种运动, 并试图用数学方法加以描绘, 以便通过数学计算达到预报天气的目的。正当 Richardson 的研究取得进展的时候, 第一次世界大战爆发了。他被征召入伍, 并奔赴欧洲战场。他不忍心中断已经卓有成效的研究, 便带着必要的资料踏上了征途。1916 年 5 月在战场上他完成了数值预报的理论研究。但可惜的是, 他的手稿和资料竟在德、法之间的香槟战役中失散了。不过他并未因此灰心。两年后战争结束了, Richardson 重新投入研究, 并于 1922 年发表了《用数学方法制作天气预报》一书^[1], 并在世界上首次进行了数值天气预报的试验。虽然他的尝试以失败告终, 但他的垂直运动方程却永远留给了动力气象学, 而且他所设计的预报模式, 在本质上同 20 世纪 60 年代美国国家气象中心的业务模

式相差无几^[2]。所以,笔者称他的失败为“伟大的失败”,因为它带给后人的是沉重的思考和随之而来的成功。Richardson 后来成为有限差分理论的奠基人。

30 多年以后,直到 20 世纪 40 年代末,世界上第一次成功的数值天气预报终于姗姗来迟。令气象学家感到欣慰的是,这次预报是在刚刚诞生的世界第一台电子计算机上完成的,而且计算机的发明人和计算机理论的奠基人 von Neumann 亲自参加了这次预报^[3]。这里我想指出的是,计算机发展至今仍然没有突破 von Neumann 的理论框架。

1953 年 Charney 和 Phillips 研制了三层准地转模式^[4],并用它成功地预报(后报)了发生在 1950 年 11 月的一次强风暴。

著名的美国气象学家,前美国国家气象局局长 Cressman 博士曾在 1981 年向笔者¹⁾详细地回忆了数值天气预报进入业务系统的那段峥嵘岁月。他说:“要把数值天气预报引进我们的业务系统主要依据两点考虑:一是需要,二是认识。人们对天气预报进一步改善的需要是急切的。现代社会对频繁发生的风暴深感忧虑。在许多情况下,风暴预报不准会造成许多死亡和巨大的经济损失。1950 年 11 月一个强大的东海岸风暴造成了财产和商业的严重破坏,也造成了人员的大量死亡。当时预报员没有预见到它的发展,预报‘第二天天气晴朗并将变冷’,可实际上一个局地的风暴正在发展。这件事导致了人们对天气预报的强烈批评。人们强调,应当进一步改善目前的预报技能。直到 1950 年中期甚至其后的几年,美国的天气预报主要依靠预报员个人的技能和一些简单的预报规则。到了 1953 年某些人开始进行图解法的正压预报试验。与此同时,有关使用早期计算机进行正压预报试验的某些研究文章开始出现,它们给出了令人鼓舞的结果。1953 年 Charney 和 Phillips 使用三层准地转模式对 1950 年 11 月的风暴作出了一次非常成功的数值预报。由于这一结果导致了一个决定:应当按照业务工作的

要求着手数值天气预报的准备工作。当时人们认识到数值天气预报仅仅处于起步阶段,它是一门新的学科。基于这种认识,成立了一个天气预报研究组,作为数值天气预报中心的一部分。这显然是一个明智的决定。其后,这个研究组对改进客观分析和数值预报作出了许多重要贡献。1957 年,也就是有限区域数值天气预报用于业务工作之后的两年,北半球正压模式开始投入使用。那个时候,数值预报方法可以改善业务预报已经被人们所接受。”

Cressman 博士的回忆一下子把我们带进了数值天气预报刚刚开始发展的最初岁月。我们不妨怀着这样的心境来回顾一下客观分析和四维同化在上一个世纪的进展。

1 关于客观分析概念的辨析

1.1 分析和客观分析

让我们首先弄清客观分析的含义。为此又须先来谈谈什么是分析。“分析”在天气预报领域中专指“实况天气图的绘画”。通俗地讲就是画天气图。过去在中央气象台的业务值班中,有一个岗位是专门负责画实况天气图的,叫做“分析班”。也许就是这个缘故吧,以后气象界就把绘画实况天气图的工作称为“天气图的分析”。依据这个约定成俗的定义,我们可以对“分析”作进一步界定:①天气图分析仅指对实况天气图的绘画,不适用于预报图;②实况天气图包括常规的地面图、标准层等压面图、剖面图、诊断量图等;③天气图的分析包括画等值线、锋和锋区、槽线以及大风区雨区等;④这里的绘画虽然是靠手工进行的,但它必须满足三个原则:第一,遵从动力约束;第二,空间上的连续性;第三,时间上的连贯性。

由于这里的分析是靠手工进行的,所以存在着不客观的毛病^[5],如果让两个预报员

1) 当时笔者正以访问学者的身份在美国国家气象中心从事最优插值的学习和研究。

来画同一张天气图, 由于学历不同、经验不同、动手能力和敬业精神不同, 他们会得到很不相同的结果。

所谓“客观分析”是指使用满足某一动力约束、能最优地拟合气象要素场的数学模型或方法, 通过一定的算法而在计算机上实现的天气图的自动绘制。对于这一甚为冗长的定义, 我们分 5 个要点分别加以说明: ①客观分析首先必须是“天气图的分析”。其内容见“分析”定义的①~④(其中的“手工进行”除外); ②分析是在计算机上自动进行的; ③这个自动进行的分析过程是由一个数学模型或者数学方法(比如迭代法)控制的。该模型或方法中必须满足一定的动力约束(即某一或某些气象规律), 而且能最优地拟合气象要素场。这里所说的“最优”是指用该模型拟合气象场, 拟合结果具有某种统计意义上的最优, 如最小残差、最大概率等; ④这个自动进行的过程是通过一定的算法实现的。因为计算机并不懂控制分析过程的数学模型, 必须把该模型转化为算法(应用程序和系统软件); ⑤在设计数学模型和计算机算法时, 必须充分考虑到空间连续性和时间连贯性的原则。

实际上, 客观分析的概念随着科学的不断进步在不断地变化着。Cressman 在 1959 年把客观分析过程定义为“从不规则分布的测站资料内插出网格点上的值, 为数值预报模式提供初值”^[6]。Гандин 在 1963 年则定义为“应用不规则分布的观测资料, 客观地重新构造气象要素场, 最优地表示出大气的瞬时状态, 并给出网格上的要素值”^[7]。Charney 在 1969 年给出了一个更加简短的定义: “从不完善的历史资料来推断大气的现状”^[8]。笔者认为, Cressman 的定义至少在两点上是不完善的: 第一, 客观分析绝对不仅仅是内插, 现在用于客观分析的数学方法已多达十几种。即便数学方法用的是内插法, 它还必须满足动力约束(比如地转关系), 而且还必须在数学上具有“最优”的特征。第二, 客观分析的结果不一定就是预报模式的初值, 因为许

多分析方法(比如最优插值法)并不以模式动力学作为约束条件。对于大多数分析方法, 最后的分析场还必须作进一步的初始化处理才能成为预报模式的初值。实际上更为准确的情况是, 分析场大多是模式尺度内的大气实况场。或者更进一步地说, 分析场是模式尺度内的真实大气(更精确的说法应是真实大气的抽样)实现, 它在一般情况下都不同于模式大气。Гандин 的定义也至少在两点上是不确切的: 第一, 客观分析绝对不是气象场的重构, 在大多数情况下它必须考虑模式的某些特征, 也必须满足某些动力约束; 第二, 他之所谓“最优地表示出大气的瞬时状态”是一个十分含混的提法。我们知道, 大气具有从分子尺度到行星尺度的连续尺度谱, 而对人类活动影响较大的大气运动位于小尺度 α (200 m 至 2 km) 以上的尺度范围。这里所谓的“瞬时状态”, 是指什么尺度范围内的状态? 其实连中小尺度内的大气观测都只能在有限的区域内实行, 观测仪器和方法都必须特别地设计, 更不用说分子尺度内的观测了。另外, 到目前为止, 客观分析的主要目的仍是为预报模式提供初始场, 所以一般都要考虑模式尺度的大小和模式的动力学特征; Charney 的定义就更加含混, 该定义实际上更接近同化的含义。因为严格地讲客观分析中不应使用历史资料, 它只使用实况资料。在实际业务中有时使用气候场作为预备场, 那是因为在地球的某些区域(如大洋上)缺乏实时的观测资料; 另外, 笔者还想指出的是, 以上三个定义都没有体现“分析”的原意: 绘制天气图。

1.2 客观分析和数值预报

客观分析是为了满足数值预报的需要而诞生的。数值天气预报诞生时, 使用的预报模式是有限差分模式, 它的空间定义域是规则的网格区域。由于数值天气预报是初值问题(虽然它不能看作精确的初值问题), 所以它需要网格点上的实况值作为模式积分的初值预备场。在数值预报工作开展的初期, 模式的初始场是这样得到的: 将模式的网格画在一

个透明的胶片上,把该胶片罩在手工分析好的天气图上,然后靠主观估计读出网格点处的要素值。这样做会遭遇以下几个问题:第一,手工分析天气图的精度因人而异,不客观;第二,用眼睛去做要素值的内插就更加不客观;第三,这种估计出来的内插值精度必然很低;第四,用这种人工从天气图上内插读取数据的方法获得初始场,在时间上也满足不了数值预报对时效的要求:完成这件工作需要一个有经验的预报员花费几天的时间^[9]。因此需要一种更客观、更精确、更快捷的方法获得模式的初始场,这种方法就是客观分析。

1954年7月为了开展数值天气预报,美国空军、海军和气象局共同组成了联合数值预报中心,于次年4月作出了世界上第一个业务数值预报^[10]。当时使用的初始场是由国家天气分析中心提供的手工分析。由于在质量上和上都满足不了数值天气预报的需要,所以1955年7月便开始了客观分析的试验,并于同年10月10日投入了业务使用。

在数值预报中使用客观分析比使用手工分析更快捷、更客观这一点恐怕无人提出疑问。但问题是,使用客观分析真的能够改善数值预报吗?这个问题早在业务数值预报开展的初期就已经有了肯定的答案。Gilchrist和Cressman在1954年曾使用1950年11月24日15:00(UTC,下同)的分析^[9]:一个手工分析,一个客观分析,用三参数数值模式分别作了预报,得到了十分明确的结果,使用客观分析的预报优于主观分析的预报。Bushby和Huckle在1957年使用不同的模式和不同的客观分析方法^[5],对于东北大西洋和欧洲的4组观测分别作了主观分析和客观分析,并以他们为初始场作了数值预报。为了评价预报结果的优劣,他们分别计算了预报场和主观、客观分析场之间的相关,结果如表1。

由表1不难看出,对于前3种天气形势,两种分析的预报效果相当;对于第4种天气形势(强梯度型),客观分析的预报效果要好得多。

虽然客观分析是为了适应数值预报的需要而诞生的,但它却有多种用途,不仅仅是为了数值预报的需要。

表1 15:00数值预报场与分析场之间的相关系数

	分析方法	相关系数		
		500 hPa	1000~500 hPa	1000 hPa
1955年	主观	0.95	0.91	0.87
9月12日	客观	0.92	0.85	0.89
10月15日	主观	0.82	0.90	0.81
	客观	0.90	0.88	0.81
10月31日	主观	0.93	0.83	0.86
	客观	0.92	0.85	0.85
1952年	主观	0.47	0.72	0.58
1月30日	客观	0.60	0.86	0.76

1.3 客观分析的目的

(1) 为数值预报模式提供初值预备场。

(2) 为预报员提供实况天气图 从事经验预报的预报员们需要天气图。过去这些图都是靠预报员的手工绘制,现在大都使用客观分析了。常常引发的一个争议是:客观分析图在质量上能同预报员的手工分析相比吗?这个问题早在1954年就有人作过了比较^[9]。他们对于1950年11月25日03:00的500 hPa图,分别由A、B和C3人完成。A和B是有经验的预报员,并且有充分的时间去做仔细的手工分析;C是在业务条件下完成的。然后将他们的分析同客观分析进行比较。其结果是,客观分析同主观分析之间的差别相当于主观分析之间的差别。1990年我们把1989年2~4月国家海洋环境预报中心的业务客观分析同预报员的主观分析作了比较^[11],表明用客观分析绘制的天气图优于预报员手工绘制的天气图。实际上这是很必然的,因为在预报员画每一条等值线时,除了要时时刻刻通过眼的估计进行要素值的内插外,还必须做到以下几件事:①不同区域的观测,其精度是不同的。要随时订正某些区域内观测的系统误差;②不考虑个别错误的观测;

③等压(高)线和风的交角不能太大;④画出的等值线要光滑,疏密度的变化要连续;⑤要遵守等值线的走向原则等。另外,绘画还须在很短的时间内完成。这么多的要求,就是再有经验的预报员也很难做得好。可是计算机则不然,只要你能将这些要求通过算法表达出来,计算机就会百分之百地予以满足。

(3) 大气的诊断研究 对于某些强烈的天气过程(寒潮、强风或暴雨等)常常在事后对该过程进行诊断分析,比如了解锋区的三维结构,冷平流的强弱,垂直运动的分布,大风区和雨量的分布等,这些都需要客观分析场作为必要的条件。

(4) 为统计预报提供因子 许多统计预报方法(如多元回归,逐步回归等)和有些预报系统(如 MOS 和 PPS)都需要客观分析场作为预报因子。使用客观分析场作为因子与使用站点观测相比,其优点是:第一,分析场值不会是错的,而站点观测却无法保证;第二,分析场值已对误差作了处理,将其降到“最小”的程度(这里的“最小”是指在某种统计意义下达到最优);第三,分析场值不是点观测,它在以网格点为中心、以网格距为边长的正方区域内具有代表性;第四,分析场的格点值不可能在某一天突然缺少,而对站点观测值而言却是常常发生的事。

(5) 资料检误 资料检误分为水平检误和垂直检误,对于这两种检误,又都包含极值检查、一致性检查、逻辑性检查和物理学检查等内容^[1]。对于极值检查,其极值宜于选择多年客观分析的极值。尤其对于数值预报工作而言,选用客观分析极值比选用观测极值要好得多;对于一致性检查,初估场不要仅仅使用预报场,而应使用由上一时刻分析场加上预报的增量场(这样可以克服预报模式的系统偏差)所构成的初估场。

(6) 预报误差统计学 一般都把预报场同客观分析场之间的差叫作预报误差场。预

报误差场的某些统计学特征,如均值、方差、协方差和相关系数等,不但是评价模式的重要参数,而且也是某些分析方法(如最优插值分析)必不可少的条件。

1.4 客观分析和初值

数值天气预报属于初值问题(虽然它不是精确的初值问题),所以模式需要初值。提供初值的场通常称为初始场。有些人常常把客观分析场误认为初始场。其实,客观分析场一般不是初始场。但是,假如客观分析使用的数学方法或者模型以预报方程作为动力约束,那么分析场同时也是初始场。在一般情况下,尽管客观分析场满足一定的动力约束,但它仍需要经过初值化才能成为初始场。这是为什么呢?

我们知道,大气运动具有连续的尺度谱。但对于天气预报具有重要意义的尺度(或叫做天气尺度)大约处在几百公里和几千公里之间。按照通常的尺度划分并以尺度较小为前、较大为后,它应属于中尺度 α 的中后部至大尺度 β 的中前部。天气尺度的运动一般处于准无辐散和准地转的状态,它是一种无论在铅直方向上或是在水平方向上都处于准平衡的状态。这里之所以称其为“准”平衡状态,因为它不是真正的平衡状态。由于科氏力的变化、该尺度内的非线性作用和各尺度之间的非线性相互作用(比如动量交换和热量交换),大气的平衡状态会遭到破坏,于是产生了声波和重力波这种高频快波。这种快波属于中尺度 β 以下及至小尺度范围内的运动。在真正的大气中,这一尺度范围内存在着对这种快波运动的消耗机制。这种快波生成后一方面很快移出生成区,另一方面由于能量频散的作用它的能量会很快被耗散掉。这样大气又会回到平衡状态。大气一般就处在“平衡”和“不平衡”之间的中间状态,客观分析通常也处于这种状态。对于模式大气而言,破坏平衡状态的原因除了科氏力的变化和非线性

作用外,还有一个重要的因素是观测资料中存在误差。我们知道,大气位势(气压)的垂直梯度力和重力之间,位势(气压)的水平梯度力和科氏力之间都是近于相等的。如果位势观测或者风的观测(尤其是风的观测)中出现较大的误差,模式大气中就会产生声波和重力波,而模式大气又只具有有限的尺度谱,缺乏快波的传播和频散机制,结果就使模式大气的能量迅速增长直至计算溢出。这是客观分析必须进行初值化的第一个原因。此外,模式常常都是为了某些特定的需要设计的,比如有些模式是为了报风,有些模式是为了报雨。不同的需要必然导致在设计模式时考虑不同的动力、热力特征。客观分析在设计数学模型时不可能完全考虑个别模式的动力、热力特征。即使客观分析场是准无辐散和准地转的,但用于个别模式仍然会产生不协调的问题。这是客观分析必须进行初始化的第二个原因。

至于初值化的方法有:动力平衡(如准静力平衡、地转平衡或平衡方程)、变分调整、正交模初值化、阻尼技术、牛顿松弛以及平滑和过滤等。

1.5 客观分析和插值

许多人常常把客观分析视作插值,其实这是错误的。就论域而言,后者是前者的真子集。根据笔者在前面给出的定义可知,客观分析逼近观测场可以有两种方式,一种是通过数学模型,另一种是通过数学方法(如迭代法),并非必须使用数学模型。即使用数学模型,可以用插值公式,亦可用哈佛函数、变分原理和有限元法等。即使用插值公式,它还必须满足动力约束,并具有“最优”特征。可见,一个单纯的插值过程绝不能和客观分析相提并论。

笔者对于垂直插值^[12]和水平插值^[13]都曾做过研究,这些插值方案都可用到客观分析之中,作为客观分析中的插值工具。

1.6 客观分析和四维同化

有些人把客观分析和四维同化混为一谈,常在客观分析方法名称的后面加上“同化”两字,就以为把客观分析变成四维同化了。比如常听人说“最优插值同化”。其实,一般所说的“最优插值”是指三维空间内的客观分析,不包括时间维,它是客观分析的一种方法。如果在推导最优插值公式时加上时间维,推导出来的插值函数(假如还能这样称呼的话)已不再是客观分析的方法了。因为对于分析而言,时间层是固定的, $t = t_0$,它不可能变化。有人称其为“四维分析”,其实这是一种错误的叫法。道理很简单,“分析”问题只能限于物理空间内。它是物理空间在分析时 t_0 刻的快照,所以它一般只可能是三维的。这里之所以说“它一般只可能是三维的”,因为笔者曾提出物理空间应是五维的^[14]。假如在这五维空间作客观分析,会有四维分析和五维分析。不过,对于人类来说,在可以预见到的未来,尚无能力进入四维空间和五维空间。所以,完全用不着为四维分析费神。在迄今人类能够触及到的空间内,分析都还只能是三维的。含有时间维的最优插值可以称为“四维最优插值”,它实际上是四维同化的一种方法。

所谓“四维同化”,从本质上讲是使客观分析场趋于一种最优的状态,这种状态使观测、分析、预报和初值之间的偏差达到最小;促使分析场达到这种最优状态的手段,可以是一种数学模型(比如四维最优插值、变分公式、Kalman 滤波、Bayes 估值、样条函数和 Green 函数),也可是一种数学方法(比如广义解方法和张弛逼近法),也可以是一种过程(比如插入观测同化、伴随方程同化)。说的更直白些,这些手段都是让客观分析场在时间维展开,延拓至预报的初始时刻,并具备最优的特性。在促使分析场达到最优状态的过程中,预报模式本身也得到了优化(比如在伴随方程同化中模式参数的优化)。至于四维同化

的概念和主要方法,将在其他的文章中论述。

1.7 客观分析的重要性

客观分析的用途广泛,我们前面列举了六种,当然远不只此。这其实已经显示了客观分析的重要性。但我们在这里所谈的重要性仅限于它在数值预报中的重要性。这种重要性其实是很显然的。

数值预报虽不是严格的初值问题,但初值的优劣仍是预报能否成功的关键。俗话说:“棒子面做不出馒头来”其实就表明了一个道理:没有比较正确的初值,就不可能得到比较正确的预报。现在,为预报模式提供初始场的方法大体有两种:一种是初值化,一种是四维同化。无论哪一种方法,都需要分析场作为输入场。如果沿用前面俗语表明的道理,我们亦可以说:没有好的分析场,亦不可能得到好的初始场。

对客观分析重要性的认识,气象界经历了一个漫长的过程。世界上第一次成功的数值天气预报诞生于上世纪 40 年代,第一个业务化的数值预报诞生于 1955 年 7 月,而第一个业务化的客观分析则诞生于同年 10 月,时间上只相差 3 个月。可以看出,这时人们对客观分析不能说不重视。其实也不能不重视,因为没有客观分析,就不可能有数值预报的业务化。可后来人们渐渐冷淡了对客观分析的研究(这一点很容易从发表文章的数目上得到证实)。一直到 70 年代末 80 年代初,气象界又把注意力投向了初值。人们为什么又会重视初值了呢?因为人们发现,只把注意力放在模式上是不对的——模式再好,没有好的初始场预报效果也不会好。何况,由于模式受着动力学框架的限制,即使在形式上千差万别(有的是欧拉型的,有的是拉格朗日型的;有的是差分格式的,有的是谱格式的;有的使用投影网格,有的使用经纬度网格等),其实都是“换汤不换药”,预报效果相差不大。1982 年美国国家气象中心就曾对 4 种形式上完全

不同的模式作了比较,发现它们在预报效果上相差甚微。实际上这一点很容易理解:在动力学框架基本相同的条件下,怎能期望明显不同的预报效果呢?

人们又把注意力投向了初值,但不是对过去的简单重复。人们已不再是单单去研究客观分析,而是研究包含客观分析的四维同化。对于世界气象界而言,80 年代可以说是同化的年代。气象界许多优秀的人才都致力于四维同化的研究,而且他们大都有毕业于数学专业的背景,像前苏联的 ПЕНЕНКО,法国的 Le-Dimet, Talagrand 和 Morel,美国的 Sasaki, Daley, Ghil 和 Lewis,英国的 Lorenc,澳大利亚的 Seaman 和加拿大的 Staniforth 等。其结果,一个波澜壮阔的四维同化风暴席卷了全球,诞生了许多四维同化的新方法。1982 年 Sasaki 和 Goerss 提出了变分同化法^[15],1985 年 Dee 等提出了滤波同化法^[16],1986 年 Lorenc 提出了最大概率同化法^[17],1986 年 Le-Dimet 和 Talagrand,1985 年 Derber 分别提出了伴随方程同化法^[18,19],1989 年 Lyne 等人提出了动力逼近同化法^[20]等。可以说是一个成果累累的 10 年。

80 年代风云乍起的四维同化风暴,一直延续到今天,甚至波及到其他的科学领域。尤其是伴随问题,由于伴随方程可以求出价值函数(cost function)的梯度,所以伴随方程成了最优控制应用的得力工具。伴随问题走出了气象、海洋界,在许多科学领域找到了用武之地。现在世界上正在兴起一股伴随热,并已经出现了一个世界性的、定期开会交流的伴随问题协作组,应当说这是气象界的光荣。

现在已经是 21 世纪,我国在客观分析和四维同化领域内的研究,尤其在应用方面,总的来说还处在较低的水平。虽然在研究方面,丑纪范早在 60 年代初就曾提出在数值预报中使用历史资料的问题^[21](笔者认为这实质

上就是世界上最早的同化方法)。曹鸿兴在1993年导出了包含多时刻观测的大气运动的自忆性方程^[22],但这些研究距离业务化还很遥远。当然,我国在同化领域的落后主要源于观测的落后(我们迄今为止仍旧得不到实时的非常规资料),但国内存在的重视模式、轻视客观分析和四维同化的错误倾向不能说不是重要的原因。

参考文献

- Richardson L F. Weather Prediction by Numerical Process. London: Cambridge University Press, Reprinted by Dover, 1922. 236
- Platzman G W. A retrospective view of Richardson's book on weather prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1968, 48: 514- 550
- Charney J G, Fjortoft R and Neumann J V. Numerical integration of the barotropic vorticity equations. Tellus, 1950, 2: 237- 225
- Charney J G and Phillips N A. Numerical integration of the quasigeostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows. J. Meteor., 1953, 10: 71- 99
- Bushby F H and Huckle W M. Objective analysis in numerical forecasting. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1957, 83: 232- 247
- Cressman G P. An operational objective analysis system. Mon. Wea. Rev., 1959, 87: 367- 374
- Гандин Л С. Объективный Анализ Метеорологических Полей. Ленинград: Гидрометеорологическое Издательство, 1963
- Charney J G, Hale M and Jastrow R. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere. J. Atmos. Sci., 1969, 26: 1160- 1163
- Gilchrist B and Cressman G P. An experiment in objective analysis. Tellus, 1954, 6: 309- 318
- Staves of Joint Numerical Weather Prediction Unit. One year of operational numerical weather prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1957, 38: 263- 268
- 王跃山, 金振刚, 孙燕. 国家海洋环境预报中心的业务客观分析系统. 第一部分: 系统结构及其功能. 海洋预报, 1990, 7(1): 37- 47
- Wang Y S. The Comparison of the Fundamental Vertical Interpolation Methods for Height Fields. Ninth Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences, AMS, Virginia, U. S. A., 1995. 243- 246
- 王跃山. 贝塞尔插值及其在数值预报中的应用. 海洋预报, 1995, 12(2): 12- 17
- Wang Y S., Mathematical Model of Super- Universe with Five Dimensions. Abstracts. X VII Pacific Science Congress, Honolulu, Hawaii, U. S. A., 1991
- Sasaki Y K and Goerss J. Satellite data assimilation using data systems observations. Mon. Wea. Rev., 1982, 110: 1635- 1644
- Dee D, Cohn S E, Dalcher A and Ghil M. An efficient algorithm for estimating noise covariance in distributed systems. IEEE Trans. Automatic Control, AC- 1985, AC- 30: 1057- 1065
- Lorenz A C. Analysis methods for numerical weather prediction. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1986, 112: 1177- 1194
- Le-Dinet F X and Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects. Tellus, 1986, 38A: 97- 110
- Derber J C. The variational 4-D assimilation of analyses using filtered models as constraints: [Ph. D. thesis], Madison: Univ. of Wisconsin-Madison, 1985. 142
- Lyne W H, Swinbank R and Birch N T. A data assimilation experiment and the global circulation during the FGGE special observing periods. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1982, 108: 575- 594
- 王跃山. 数据同化——它的缘起、含义和主要方法. 海洋预报, 1999, 16(1): 11- 20
- 曹鸿兴. 大气运动的自忆性方程. 中国科学(B辑), 1993, 23(1): 104- 112