

近十年数值天气预报的回顾和展望

廖洞贤

(国家气象中心,北京,100081)

提 要

对近十年来数值天气预报总的趋势,以及在业务预报、模式和模式设计、物理过程、资料四维同化和有关计算方法等方面的进展进行了评述,并指出了其中存在的问题,作了展望。

一、引 言

自从1950年Charney等发表了世界公认的第一张数值预报形势图以来,至今已有40多年的历史。在这个时期中,数值天气预报经历了许多变化。如果说1966年以前为准地转(或平衡)模式时期,则以后为原始方程模式时期。但是,在数值预报发展的前30年,其对象主要是1-2天的短期天气。虽然在这段时间里,有些中心曾发布过中期预报,但它仅是短期预报的延伸,没有针对中期天气的特点。中期预报是从1979年开始的^①。可以说近十年数值天气预报的发展主要是围绕中期预报进行的。

另一方面,中尺度数值天气预报近年来也有较大发展,提出了很多不同类型的模式(静力的和非静力的)。在长期数值天气预报方面,也有很多新的成就,如考虑了海-气耦合的长期预报模式和其理论结果等。

二、业务预报

现在,许多国家都制作从只包括本国到半球,甚至全球范围的预报,其所用模式、分析方案、预报范围和预报时效如表1所示^[1]。从表1中可以看出:它们所用的有限区域模式,其水平分辨率普遍在150km以下,层数在10层以上;而半球或全球预报大多采用谱模式,层数也在10层以上;客观分析,则绝大多数采用最优插值。上述现状与1980年以前全球模式很少,且大多为10层以下差分模式的情况相比,变化就不小了。

1991年5月19日收到,11月20日收到再改稿。

① 准确地说,应该是以欧洲中心1978年8月发布中期数值天气预报开始的。

表 1 一些国家所用的模式、分析方案、预报范围和时效

国 家	区 域				全球(G)/半球(H)			
	水平分辨率 (km)	层数	主要区域	分析方法	水平分辨率	层数	预报时效 (小时)	分析方法
澳大利亚	150	12	澳大利亚	SC	R21(H)	9	48	OI
加拿大	100	15	2/3 北半球	OI	T59(H)	15	144	OI
欧洲中心	—	—	—	—	T106(G)	19	240	OI
法国	35	15	法国	OI	T79(H)	15	48(12 GMT) 96(00 GMT)	OI
西德	127	9	欧洲	OI	254(H)	9	96	OI
日本	a. 75	16	东亚	OI	T106(G)	21	192(2/周)	OI
	b. 40	19	日本	OI				
英国	a. 75	15	欧洲	R1	150km(G)	15	144	R1
	b. 15	16	不列颠群岛	SC				
苏联	150	9	欧洲和西亚	OI	T40(H)	15	120	OI
美国	80	16	北半球嵌套	OI	R40(G)	18	240	OI

注:SC,逐次订正;OI,最优插值;RI,重复插入;R,菱形截断;T,三角截断。

在预报准确率方面,根据英国气象局 1967—1988 年 48 小时 500hPa 高度预报的统计,其均方根误差是不断下降的,平均每年约下降 2.7 位势米。至于中期预报,如欧洲中心,其可用预报(距平相关系数大于 0.6)在 1980 年为 5.5 天,1985 年已提高到 6.5 天^[2]。

三、模式和模式设计

目前用作数值天气预报和研究试验的模式各式各样;除按时间、空间尺度划分的短、中、长期预报和大、中尺度预报等外,就所用计算方法分,还有差分模式、谱模式和有限元模式;就网格分,有均匀网格模式、嵌套模式和变网格模式等;就物理内容分,还有大气模式和海-气耦合模式等。此外,还曾发展过自适应网格模式和有限区域模式,自适应模式可以根据某些物理量的梯度使网格距局部缩小,提高计算精度^[3]。有限区域谱模式,现已有两种用于业务,一是台风预报模式,一是有限区预报模式^[4]。

还提出一种以坐标

$$\eta = \frac{p - p_T}{p_s - p_T} \eta_s \quad \eta_s = \frac{p_{rf}(z_s) - p_T}{p_{rf}(0) - p_T}$$

设计的模式。其中 p 、 p_T 、 p_s 、 p_{rf} 各是气压、大气顶气压、场面气压、参考气压。这种坐标在大气低层近似于 σ -坐标,在高层近似于 p -坐标^[5]。

由于很多灾害性天气是由中小尺度天气系统所引起的。为此,近年来发展过许多网格距在 50km 以下的准静力中尺度模式。但其中有些著名模式只在模拟中应用,未投入预报业务。其所以如此,看来和受客观条件,如观测系统的限制,以及发展的水平有密切关系。今后除应加强与有限区预报相似的侧边界等问题的研究外,还应根据中尺度天气的特点进行动力框架和物理过程、资料同化的研究,以及建立适合于中尺度天气的观测系统等。

由于上述模式的发展,给模式设计提出了新的问题:即如何使模式设计得更精密,更可靠。在这方面也有令人鼓舞的进展。

我们知道,能量守恒是设计模式的一项重要原则。这在六十年代初已由 Lorenz 阐明过。但是,过去的模式,特别是国外的模式,一般只能达到能量瞬时守恒,时间离散后模式大气的能量守恒性则不能保证,而且,考虑的问题也较粗。近年来在这方面取得了较大的进展。在标准层结近似下,我国气象工作者提出了可以保持总动能、总有效位能和总有效表面位能之和守恒,并有正确能量转换关系的模式^[6]。这样,就把这方面的工作推进了一步。

在模式结构和网格设计上,过去除根据天气经验和计算机等客观条件外,一般都比较任意,如对大气顶高度、垂直和水平分辨率的选择等。近年来在这些方面作过许多研究试验^[7,8],结果指出:模式顶取在小于 10hPa 处较好,最好在 0.01hPa,否则超长波表示不好,其移速和波幅增长率都会受到较大歪曲。还给出了垂直网格距和水平网格距的协调关系式,数值试验证明:二者不协调可以产生虚假的重力波^[9]。

四、物理过程

物理过程是模式的核心之一,一直受到数值预报工作者的注意,特别是在次网格过程的参数化方面,更是如此。其主要成就有:

1. 包络地形和地形重力波拖曳力的考虑^[10,11]

主要是针对冬季在中期预报和大气环流中出现的系统性误差,如流型纬向化,地面中纬西风偏强,温度偏低,特别是在平流层内等,而引入模式的。包络地形在冬季效果较好,夏季稍差;地形重力波拖曳力可以使平流层极区增暖,对流层西风减弱。这些,对减小数值预报中的系统性误差都有所贡献。

2. 新的积云对流调整方案和积云的质量通量方案^[12,13]

在前一方案中, T 、 q 可以向实测大气的准平衡热力结构调整;在后一方案中,在水汽耦合的假定下考虑了积云中的上升流、饱和和下降流、环境场的下沉、动量传递和简单的云物理等。

值得注意的是,当分辨率提高时,次网格尺度积云对流参数化对降水的作用,相对于大尺度降水,往往减小。尤其对网格距为 1 到 10km 的中尺度模式^[14],是否还需要参数化,或需要参数化的分辨率界限,是不清楚的。

3. 浅积云方案^[15]

对信风带中边界层内水汽、动量和热量的垂直输送有改善。

4. 边界层湍流能量方程参数化^[16]

应用高阶闭合方法,对边界层湍流能量方程参数化。可以根据湍流能量方程,定出随时间和空间变化的湍流垂直交换系数。

5. 辐射^[17,18]

和 70 年代方案相比,已大有改善。如对散射、云和太阳天顶角日变化的考虑,以及计算方法的改进、云和辐射的相互作用等。还针对不同时间尺度运动区别对待。如欧洲中心

对于中期预报,着重考虑云中气溶胶、Rayleigh 散射等的作用,而把气体对辐射的吸收看作一个扰动。不过,存在的问题也不少。如计算量太大;即使如文献[18]那样简单的方案,也占模式计算整个机时的 1/3。如何用较简便的方法以获取较满意的结果,是一个亟待解决的问题。另外,如何近似给出计算中所需大气光学性质,以及云、水汽、臭氧和气溶胶等,也是一个问题。比如,在相当长的时间内,大气模式没有专门的云模式,云量等通过水汽由经验决定,因此,有时辐射可以产生负影响。这是一个薄弱环节。

6. 对近地层和下垫面等的考虑

已提出了能表征植被层内质量交换和复杂能量交换的方案^[19],可以考虑该层和下垫面,以及和大气之间的相互作用,并区分植被和裸地上空水汽通量的型态。在长期积分中,可以改变地面上的 Bowen 比和地面与海洋的降水分布,为改善下垫面气象要素预报带来了希望。

总之,物理过程,特别是其中次网格过程的参数化,存在着很多复杂问题,解决它们看来还需要相当的时间。但是,从目前情况看,至少在如下几个方面还须要进行或加强研究。

- (1) 参数化应当有一些原则。哪些次网格过程可以参数化,哪些不可以参数化。
- (2) 对须参数化过程进行观测事实分析和机制的研究。
- (3) 各不同参数化过程如何相互匹配,如何作为整体在模式中考虑。
- (4) 各不同尺度的参数化过程的特点。

五、资料同化

当前,用得最多的分析方法是多元最优插值,它可以处理各不同类型,不同精度的资料。这比十年前用的逐步订正法等要先进得多。使天气预报的质量也有所提高,特别是缺少常规资料的南半球地区。以澳大利亚 24 小时预报的技巧评分为例,其 1970—1986 年的结果如图 1 所示^[1]。可以看出,预报的改进是明显的,持续的。虽然这不能全归功于多元最优插值,但它的作用是重要的。

在初始化方面,十年前发展的全球绝热非线性正规模获得广泛应用,后又考虑加热的作用。试验表明,用它作的预报一般都比较平稳。近年来,有限区域非线性正规模方法得到较大发展,其中一种隐式方法已在加、美等国业务中应用^[20]。

还发现了所谓 Sping-up 问题,即在预报最初几小时,降水和蒸发总是相差较大。有人认为是初始化问题,也有人认为是物理过程问题。有人用物理初始化方法,即利用卫星估测的降水量和湿度,通过模式调整加热和散度等,来解决这个问题^[21]。

长期以来,在资料分析中用得最多的是统计方法,动力上的考虑很少。这与用动力方程作预报是不太协调的。

如众所知,在不同时刻,用最优插值法作的分析各自是独立的。研究中所依据的资料则是这样形成的时间序列。这相当于把最优插值在时间上推广。根据 Ghil 等的研究,如模式是线性的,最优插值在 Kalman-Bucy 滤波形式下,可以推广为时间上的同化。但是,如模式为非线性的,则这种推广有困难^[22]。而且,由于最优插值的统计性质,分析的场往往过分光滑,使强的系统不够强。近年来有人提出了在以模式方程为约束的前提下,变分的四

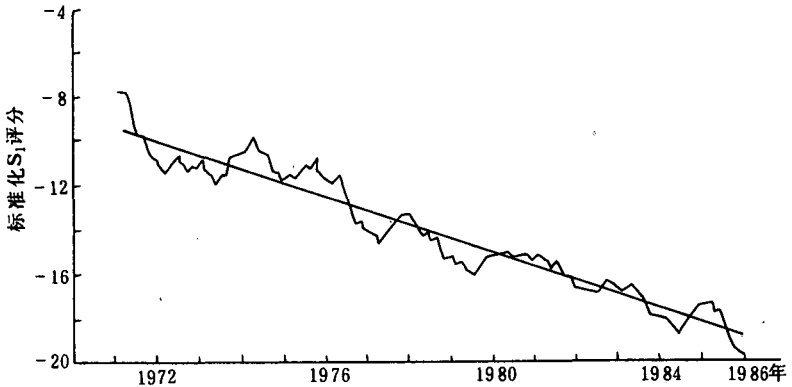


图1 澳大利亚 24 小时标准化 S_1 评分

(标准化 S_1 评分定义为预报评分和持续性预报评分的差,差值负得愈大表示预报改进愈大)

维同化方案,其中以利用模式伴随方程求解最有效^[23]。在理论上这种方案可以同化不同时间,不同地点的资料,并与模式协调一致。

不过,作为现代化的数值天气预报,其所根据的某些气象要素的观测精度却较差,而且,观测频率也太低(指常规观测),使重力波得不到正确表达,这对天气预报或试验研究都是很不够的。可是,目前许多中心都在努力提高模式的水平分辨率,这实在是太不相称了。根据我们的研究,虽然截断误差随网格距的减小而减小,但在一定观测误差的情况下,最大梯度计算误差却随网格距的减小而增大。两种误差有一个最优关系,也就是说,分辨率的提高应有个限度^[24]。只有在探测精度不断提高的前提下,不断提高分辨率才有意义。否则到一定程度以后,会出现适得其反的效果,对观测频率也类似。不过,这些问题已越来越引起气象界的重视,相信在不久的将来,将会有较好的解决。

六、计算方法

重要的工作有:

1. 有限元法的应用^[25]

有限元法适应性强,可以在同一计算域中构造不同网格距的网格,并适应边界形状。也和工程上对平衡问题的应用不同,数值预报中多采用 Galerkin 法。

2. 半拉格朗日法的应用^[26]

和半隐式结合,用原始方程模式,一般时间步长可取到 1/2 小时,甚至 1 小时,而结果仍和用 Euler 方法的结果很接近。

3. 完全能量守恒格式^[27,28]

是我国独创,优于国外一般所用瞬时能量守恒格式。有隐式和显式两种。

4. 非线性计算不稳定^[29]

不仅和时、空步长有关,也和初值、方程的性质有关。近年来,我国学者作了系统的研究,提出了其产生机理、能谱迁移和解决措施等。

5. 有限区谱展开和谱方法理论基础^[30,31]

在我国开展得很活跃,不仅有具体方法,也有理论研究。

6. 气压梯度力的计算^[32]

如改进的静力扣除法,可以使散度方程中的地形项由地形扰动项所取代,从而,降低截谱模式中因截谱带来的误差。

7. 水汽平流的正定性

针对水汽平流计算可能出现的水汽值为负的问题,曾提出过许多方法。其中之一是在迎风格式中加一负扩散项^[33],另一是所谓保形方案^[34]。

七、展 望

从上面的情况可以看出,在过去 10 年中数值天气预报,特别是中期天气预报,以及围绕它进行的研究获得了巨大进展,但仍然有薄弱环节需待改进。而且,由于生产的发展和人类生活、防灾等需要,现有的数值天气预报还远远不能满足客观的需求。其中一个方面是对较长时间尺度预报的需求,另一个方面是对时间尺度较短,但却是局地的天气预报,特别是灾害性天气预报的需求。由于受客观条件和数值天气预报水平的限制,要满足这些需求还存在不易克服的困难。

如上所述,中尺度预报和长期天气预报的研究试验已取得巨大进展,搞清了许多重要问题,为今后这方面工作的开展创造了极有利的条件。至于计算条件,由于电子计算机软、硬件和有关算法(如并行算法和几十亿次/秒的多处理计算机)的飞速发展,也是很有利的。而且,由于新的探测技术和仪器的应用,观测质量正在改善。有的国家正在建立适于中尺度天气的探测系统。此外,通信技术的发展,也为资料的收集和产品的发送准备了良好的条件。

上述情况表明,研制实用、及时、高效的中尺度模式和长期预报模式的时机已经成熟。估计在未来 10 年或稍长的时间内,长期预报业务将可建立,中尺度预报质量可望有明显的提高。但是,要达到这个目的,以及进一步改进中短期预报,还有如下工作需待解决或完善。

1. 非绝热物理过程参数化方案,如针对辐射和云的方案等,以及参数化的理论和方法等;

2. 结合动力方程的连续资料同化;

3. 有较高精度和分辨率的探测方法和探测系统,特别是风和水汽的探测;

此外,在有关问题的研究和深化方面,也是很需要的。

致谢:在本文撰写过程中,吕月华同志给予了很多帮助,谨表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Brown J. A., Jr., *Reviews of Geophysics*, 25, 312—322, 1987.
- [2] Numerical Weather Prediction Progress Report for 1989, Tech. Document, WMO/TD, NO. 94.
- [3] 刘卓,中国科学院大气物理所博士论文,1991 年。

- [4] Tatsumi, Y., JMA/NPD Tech. Report, 3, 1—71, 1985.
- [5] Mesinger, F., Seventh Conference on NWP, AMS, 1987.
- [6] 曾庆存等, 大气科学, 11, 113—126, 1987.
- [7] 张可苏, 中期数值天气预报研究成果汇编(4), 1—4, 气象出版社, 1991年.
- [8] 陆维松, 中期数值天气预报研究成果汇编(4), 88—99, 气象出版社, 1991年.
- [9] Persson, P. O. G. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 917—934, 1991.
- [10] Wallace, J. M. et al., *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 109, 683—719, 1983.
- [11] Palmer, J. N. et al., U. K. Meteor. Off. Met. 0—13 Branch Memo., 149, 1984.
- [12] Betts, A. K., *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 112, 677—691, 1986.
- [13] Geleyn, J. F. et al., *Beitr. phys. Atmo.*, 55, 4, 1982.
- [14] Guo Xiaorong (郭肖容) et al., *Acta Meteor. Sinica*, 3, 108—118, 1989.
- [15] Tiedke, M. Proceedings of ECMWF Workshop on Connection in Large-Scale Models, Reading, England, Nov. 29—Dec. 1, 1983.
- [16] Cote, J. et al., Proceedings of the 9th Int. Conf. on Numerical Methods in Fluids, Paris. Springer, New York, 1984.
- [17] Stephens, G. L., *Mon. Wea. Rev.*, 112, 826—867, 1984.
- [18] 赵高祥等, 科学通报, 32, 19, 1479, 1987.
- [19] Blondin, C. A., WMO/TD-NO. 200, 4—10, 1987.
- [20] Temperton, C., *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1013—1031, 1988.
- [21] Krishnamurti, T. N. et al., *J. Meteor. Soc. Japan*, 62, 613—649, 1984.
- [22] Ghil, M. S. et al., *Dynamic Meteorology: Data Assimilation Methods*, Springer-Verlag, New York, 139—224, 1981.
- [23] Talagrand, O. et al., *Q. J. R. Meteor. Soc.* 113, 1311—1328, 1987.
- [24] Liao Dongxian (廖洞贤), *Adv. Atmo. Sci.*, 2, 316—324, 1985.
- [25] Staniforth A. et al., *Comp. Math. Applic.*, 16, 1—22, 1988.
- [26] Robert, A., *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 319—324, 1982.
- [27] 曾庆存等, 数值天气预报文集, 气象出版社, 1984年.
- [28] 季仲贞等, 科学通报, 35, 10, 766—768, 1990.
- [29] 曾庆存等, 力学学报, 13, 3, 209—217, 1981.
- [30] 廖洞贤, 应用气象学报, 1, 4, 1990.
- [31] 蒋伯诚等, 计算物理中的谱方法—FFT 及其应用, 6—14, 湖南科学技术出版社, 1989年.
- [32] Chen Jiabin (陈嘉滨) et al., WMO/IUGG, NWP Symposium, 431—440, Tokyo, 4—8 Aug., 1986.
- [33] Smolarkiewicz, P. K., *Mon. Wea. Rev.*, 111, 479—486, 1983.
- [34] Williamson, D. L. and P. J. Rasch, Proceedings of ECMWF Workshop on Techniques for Horizontal Discretization in NWP Models, 2—4, Nov. 1987.
- [35] Lilly, D. K., *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 116, 779—790, 1990.

REVIEW ON THE NUMERICAL WEATHER PREDICTION IN THE PAST DECADE AND ITS PROSPECTS

Liao Dongxian

(National Meteorological Center, SMA, Beijing, 100081)

Abstract

The general development trend of NWP and its progress in operational forecasting, model design, physical processes, data assimilation, related mathematics and so on in the past decade are reviewed. At the same time the existing problems in NWP are pointed out. Finally, its prospects in the near future are envisioned.