

月平均环流的长期数值预报

王 绍 武

(北京大学地球物理系)

提 要

本文对当前月平均环流的长期数值预报状况做了总结,用大气环流模式做月平均500hPa高度预报,相关系数约0.4.对两类集合预报,即蒙特卡罗预报与落后平均预报的优缺点进行了比较.最后讨论了月平均环流预报的可预报性,指出有可能做6—11个月的预报,但预报准确率因受气候噪声影响而有一定限度.

关键词: 长期数值预报;可预报性;集合预报;气候噪声.

月平均环流预报是长期预报的最基本环节.虽然看来不如预报月平均气温及月总降水量来得直接.但是,一方面以大气动力学及热力学为基础的长期数值预报,首先预报的就是平均环流,另一方面多年的经验已经证实月平均环流与月气温、降水距平有很密切的关系.因此,通过预报环流来预报气候异常是完全可能的.况且,更重要的只有这样才能更好地了解气候异常形成的原因与物理机制.所以,目前世界各国均把月平均环流预报做为长期预报的基础,不过目前动力学方法的月平均环流预报还不能取代统计预报,而且将来动力学方法预报的准确率进一步提高以后,如何与统计学结合也是一个重要的课题,这也是当前大多数长期预报工作者,包括不少知名动力学家共同的见解.但是,无论如何,动力学方法的长期数值预报是必然要研究的一个重要课题,离开这方面的工作,我们就不能摆脱完全依靠统计方法的局面;自然用动力学方法做长期数值预报也可以有各种方案.本文只就对国外应用大气环流模式(GCM)通过逐日积分做月平均环流预报的最新成果做一个总结,希望这不仅对我们设计研究动力学模式有参考意义,而且对机制研究及统计分析也有所借鉴.

关于月平均环流的预报,我们想集中讨论三个问题:1. 究竟目前达到什么水平.2. 集合预报的意义.3. 月平均环流预报的可预报性.下面就先从第一个问题谈起.

自从70年代末期开始做月平均环流试验至今大约有十年左右了,应该说直到80年代初期,还有不少人对此持怀疑态度,所做的试验量也较少,一般仅做一个或少数几个例子,目的在于探索月平均环流预报的可能性,究竟预报效果如何还很难说,近三年来,世界上几个著名的大气环流模式,均已进行了大量的月预报试验,如美国气象中心(NMC)的动力学延伸预报模式(DERF)就已做了108个例子,其它如欧洲数值预报中心(ECMWF)、美国普林斯顿流体动力实验室(GFDL)、英国气象局(UKMO)、美国大气研究中心(NCAR)

表 1 500hPa 月(或 15 天)平均环流预报与实况距平相关

模式	集合预报		个例数	预报水平 (相关系数)	作 者	发表年代
	类型	个数				
ECMWF T42,T21			38	0.38(T42) 0.32(T21)	Cubasch 等 ^[1]	1986
GFDL N48 L9	MCF	3	8	0.40 0.59(去掉气候漂移)	Miyakoda 等 ^[2]	1986
UKMO L5	MCF	7	8	0.48(1—15 天) 0.29(16—30 天) 0.34(31—45 天)	Murphy 等 ^[3]	1986
UKMC L5			18	0.53(1—15 天) 0.20(16—30 天) 0.18(31—45 天)	Mansfield ^[4]	1986
NMC DERF	LAF	5	108	0.39	Tracton ^[5]	1987
NCAR CCM, R15	MCF	3	8	0.50	Baumhelfner ^[6]	1987

都发表了实验结果(表 1).据不完全统计,至今世界各国大约共做了 240 个左右的月预报,其中约 200 个是近几年发表的.由于篇幅限制,我们不能一一详细介绍他们的预报结果,仅概括指出以下几点:(1)大部分模式采用实际环流初始场,但海温多用气候平均值.(2)一般只做 30 天积分,然后求 30 天平均环流距平.(3)为了克服气候漂移,有的做了系统误差订正,有的使用模式平均做气候平均,(4)绝大多数只做了冬季预报,(5)预报的月平均环流距平与观测值的相关系数约为 0.4.这主要指 500hPa 月平均距平,有人指出海平面气压或对流层下部气温相关值还要高一些,但所做例子较少,尚无定论.因此,我们可以得到结论,目前动力学方法的长期数值预报还没有达到可以在业务预报中使用的水平.但是,数百个例子的试验证明,绝大多数预报结果与实况为正相关,也有一部分相关系数达到了 0.6.这表明月平均环流的预报是可行的,经过改进,在长期预报的月预报业务中使用的前景是乐观的.

其次,我们谈一谈集合预报问题,大家知道,数值预报是以某个初始场为基础,逐日积分来做预报的.因而初始场具有极端重要的意义.但是初始场又不可避免地带有误差,也就是有某种不确定性,因此数值预报就带有一定随机性.为了克服这个问题,Epstein^[7](1969)首先提出了一种随机动力预报方法,在预报要素场的同时,还预报其概率分布,因此预报量非常大,假如原来模式有 N 个自由度,则为了预报概率分布要 $O(N^2)$ 个预报方程.而且还要对 3 次矩或高次矩做出假设,否则方程系不闭合,因此这个方案很难实现.后来 Leith^[8](1974)提出了另一种随机动力预报方法,即用一个预报集合来计算统计平均,他认为包含 8 个不同初始状态的集合已经可以得到可靠的平均值.由于这个初始状态的集合是在观测初始状态上加上随机扰动得到的,因此,这种方法称为蒙特卡罗预报(Monte Carlo Forecast),简称为 MCF,也有人称做随机扰动预报(Random Perturba-

tion Prediction), 这个方法在 ECMWF 于 1979 年召开的随机动力预报会上进行了讨论, 当时未得到肯定结论. 后来到 80 年代的一些工作已经证明它对提高中期预报时效有明显的作用^[3]. Murphy^[9] (1988) 近来对集合预报问题进行了理论性的探讨, 用 UKMO 5 层模式的 8 个冬季预报例子做了详细的分析, 每个预报取 7 个不同的初始场, 结果发现, 预报时效增加 50%, 例如集合预报第 28 天的水平与个别预报第 19 天的水平相当.

另一种集合预报方法是 Hoffman 与 Kalnay^[10] (1983) 提出来的, 这种方法是用相距 6 小时或 12 小时的不同时刻初始场分别做预报, 然后把预报的相同时刻的结果求平均, 称为落后平均预报 (Lagged Average Forecast), 缩写为 LAF. 具体做法又可分为两种, 即不加权 (aLAF) 或加权 (tLAF), 加权时权重根据预报误差决定, 最近 Dalcher 等^[11] (1988) 的研究表明, 5 天以上, LAF 已经表现出明显的优越性, 预报准确率显著高于个别预报. 但是接近 10 天时 aLAF 与 tLAF 已差别不大. Tracton^[5] (1987) 也指出, 由于目前 GCM 的中期预报能力还比较低, 所以在 10 天以内, 有时集合预报的效果还不如最后一天预报. 但在 10 天之后, LAF 效果明显, Molteni^[12] (1986) 及 Tokioka^[13] (1986) 也采用 LAF 做了月预报试验.

Dalcher 等^[11] (1988) 强调 LAF 有许多优点, 首先, MCF 所用的随机误差的选择是很任意的, 这些扰动在短时间内就会耗散掉, 集合的自由度必然因之减少, 而 LAF 的差是动力学性质的, 因此, 这些扰动可能反映最难预报的那一部分变化, 即预报误差, 所以 LAF 的平均是有效的. 其次 MCF 是把当前观测分析做为集合平均, 但观测分析不一定就是最优的平均, 而 LAF 的集合平均是当前观测分析与预报场的平均, 可以反映观测误差的分布, 根据以前的观测所做的预报, 能够提供不同于当前观测分析的新的信息, 所以 LAF 的平均初始部分可能优于 MCF 的初始状态平均, 因而有更好的预报效果. 当然这只是从原则上进行讨论, 事实上如何还有待于对比实验检验.

不过, 无论如何目前的工作已经证明, 集合预报对 10 天以上到 30 天的预报是有益的, 因此肯定对月平均环流预报有一定作用, 但究竟能对提高月平均环流预报的准确率有多大影响, 还需要进一步研究, MCF 与 LAF 何者较好也要经过对比分析才能得出结论.

第三个问题是月平均环流的可预报性, 这个问题包括两个方面, 即月平均环流预报的时效有无上限, 以及月平均环流预报准确率有无上限. 下面先谈第一个方面.

如上所述, 用气候海温做一个月的平均环流预报已经有了一些成功的例子. 但随着预报时效的增长, 无疑象海温等因子的作用也会逐渐加大, 事实上, 一些预报试验已经证明对第 2 个月的平均环流预报, 海温异常已经成为不可忽视的因素. 特别是热带海温的作用尤其明显. 同时还不要忘记, 海温异常虽然持续性很高, 但也不是一成不变的. 如果说一个月左右海温变化还不很突出的话, 2—3 个月之后海温本身的变化就必须加以考虑了, 所以, 为了做 2 个月或更长时期的预报, 就不能只用定常下垫面强迫的大气环流模式, 而要采用海—气耦合模式. 然而无论哪一种模式, 其最基本的原理, 也仍然是从某一个初始场逐步外推. 因此, 就存在一个初始场能在多长时期内有效的问题, 亦即, 月平均环流的可预报性也是有限的.

von Neumann^[14] (1955) 早就指出, 从预报角度来看大气运动可以分为三类, 第一类运动主要决定于初始条件, 因此可以从初始条件外推. 第二类运动几乎完全与初始条件无关, 因此可以不考虑初始条件做预报. 而最困难的是第三类运动, 即距初始时刻相当远, 初

始条件不可能完全决定最终状态,但初始状态的影响又没有小到可以忽略不计的程度.同时指出合理的途径是先做第一类预报,然后研究第二类预报,最后再做第三类预报.三十多年来数值预报发展的历史完全证实了 von Neumann 的预见,目前短期预报已经有了良好的基础,十天逐日预报已成为 ECMWF 的业务预报,而利用 GCM 对气候的敏感性已进行了广泛的研究.对可能设想的 CO_2 变化,太阳常数变化,极冰、海温变化可能导致的气候异常进行了全面的数值模拟,这些模拟一般只采用理想初始场或甚至均匀初始场,利用模式进行调整,然后积分,求出稳定的平衡状态,显然这属于以上所说的第二类预报的范畴.

现在我们感兴趣的是第三类运动的时间范围, von Neumann 认为是 30—180 天.这个下限与可预报性的研究是接近的,对这个上限又如何理解呢?是不是这就表明长期预报的上限是半年呢?我们想引用 Мусаелян^[15]的结果.他认为 1、2、3 波的初始场临界有效时间——即初始场与热流入量作用相同的时间分别为 162 天、54 天及 27 天,超过了这个临界时间,热流入量的贡献就愈来愈比初始场大,显然就不可能再以初始场做有效的预报了.从理论上讲,0 波的可预报性也许比 1 波还要强一些,因此,可以认为与 von Neumann 给出的第三类运动的预报上限,基本是吻合的.不过这里有一个缺陷,即仅考虑了大气,而海洋的可预报性可能比大气超长波还要大一些.Марчук^[16](1979)对经验影响函数的研究就是一个很好的例证,他发现对苏联欧洲部份及北美的冬季气温来讲,其影响函数可向前追踪 9—11 个月,到达大西洋及太平洋西部的墨西哥湾暖流区及黑潮暖流区.因此,这就意味着,如果在海—气耦合模式中正确估计海洋情况的变化,则有可能在一定条件下做出 3—4 个季度的长期预报.因此,我们认为丑纪范^[1]提出来的月平均预报的上限为 6 个月到 11 个月是有充分根据的.

下面一个问题是长期预报的准确率有没有上限?Алексеев 与 Николаев^[17](1979)曾指出,短期预报是时效问题,长期预报是准确率问题. Madden^[18](1982)与 Shea^[19](1982)提出了气候噪声问题,并利用大量气温、降水资料进行了估算.所谓气候噪声即气温或降水的月平均值或月总量中,受天气变率的影响而产生的不可能预报的部分,一般用信号加噪声与噪声的比值 F 来度量信号与噪声的相对强度.一个气候变量(如月平均气温或月总降水量)信号不为 0 的条件是 $F > 1.0$,当 $F = 1.5$ 时表示信号的大小为噪声的 50%, $F = 2$ 表示信号与噪声大小相等. Madden 与 Shea 得到的 F 值均不大,例如北美冬季降水只有少部地区 $F > 2$,夏季降水则很少达到 2,只有很少地区 $F > 1.5$,大部地区 F 在 1.0—1.5 之间,甚至还有的地区 $F < 1.0$,但月气温的 F 要高一些,不少地区可达 2.0 或 3.0. Груза 与 Шевченко^[20](1988)认为 Madden 与 Shea 对噪声的估计偏高,以至于有时 $F < 1.0$,这是不合理的.原因可能是在外推谱的高频及低频部份时过于粗略.因此,他们用全苏 120 个站的气温计算了 F 值.结果 1 月全苏大部地区 $F > 3.0$,最高达到 5.0 以上.7 月也有大约 80% 的地区达到 2.0,苏联欧洲领土在 3.0 左右.

Алексеев 与 Николаев^[17](1979)认为,如果允许误差为标准差的 0.68 倍,则气温预报准确率的上限为 75—80%.如何比较这两种估计呢?表 2 给出评价预报水平的几个量之间的关系.例如把预报简化为距平符号预报,则只分正、负两类,随机预报的准确率为

1) 见长期预报研究通讯,1988,总第 40 期,21—24 页.

50%, 如果预报准确率为 55%, 这时按美国常用的技巧分

表 2 评价预报水平的量

预报准确率	预报技巧分	解释方差	F
50%	0.0	0%	1.00
55%	0.1	1%	1.01
60%	0.2	4%	1.04
65%	0.3	9%	1.10
70%	0.4	16%	1.19
75%	0.5	25%	1.33
80%	0.6	36%	1.56
85%	0.7	49%	1.96
90%	0.8	64%	2.78
95%	0.9	81%	5.26
100%	1.0	100%	

$$S = \frac{R - C}{N - C} = \frac{55 - 50}{100 - 50} = 0.1$$

式中 R 为预报准确率, C 为气候预报准确率, N = 100. 或按苏联常用的

$$\rho = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = \frac{55 - 45}{55 + 45} = 0.1$$

均为 0.1, N_+ 与 N_- 为预报正确与错误的百分率. 但这时所能解释的方差只有 1%^[21], 如果整个方差中只有 1% 能够预报, 假定有一个完全完善的预报模式, 则信号也占 1%, 而噪声占 99%, $F = 1.01$, 依此类推, 我们可以知道, $F = 1.5$ 大约相当于预报准确率最高可达 80% 左右, 当 $F = 2.0$ 时, 预报准确率的上限为 85%. 因此, 按 Груза 与 Шевченко^[20] (1988) 的估计, 冬季月气温的 F 可达 3.0 以上, 夏季也在 2.0 以上, 这表明冬季月平均气温预报准确率最高能达到 90% 以上, 夏季也要超过 85%, 比 Shea 及 Алексеев 与 Николаев 的估计都要高, 究竟谁的估计最接近实际还很难说, 因为目前的统计预报水平与这个上限还有很大差距. 但是, 我们认为这是一个重要的概念, 说明因受气候噪声的影响, 月平均气候量的预报准确率是有一定限度的.

通过以上分析, 我们可以得到结论, 用 GCM 做月平均环流预报目前虽然还不能用作业务预报, 但已达到一定水平 (相关 0.4), 发展前景是乐观的. 不过目前只能报 1 个月, 也许考虑海温异常之后可以报第 2 个月. 但是现在还很少正式预报试验, 如果发展海—气耦合模式, 也许甚至能做更长时间的预报, 不过月平均值的预报也应该有一个理论的上限, 是否这个上限为 6—11 个月还可以进一步讨论, 而且准确率也有一定限度. 1 年以上的月平均环流长期数值预报, 目前尚未进行过试验, 根据以上讨论, 也许那时应更多地考虑大气以外或甚至气候系统以外的因素, 如太阳活动, 火山活动等.

参 考 文 献

- [1] Cubasch, U., S. Tibaldi, and F. Molteni, 1986, Deterministic extended range forecast experiments using the global ECMWF spectral model, Proceedings of the first WMO workshop of the diagnosis and prediction of monthly and seasonal atmospheric variations over the global, 29 July–2 August 1985, 581–589.
- [2] Miyakoda, K., J. Sirutis, and J. Ploshay, 1986, One-month forecast experiments—without anomaly boundary forcings, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 114, 2363–2401.
- [3] Murphy, J.M., and D.E. Jones, 1986, The use of ensembles of integrations in extended-range forecasts, as reference [1], 576–580.
- [4] Mansfield, D.A., 1986, The skill of dynamical longrange forecasts, including the effect of sea surface temperature anomalies, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 112, 1145–1176.
- [5] Tracton, M.S., 1987, Application of dynamic extended range forecasting (DERF) to the monthly forecast problem, Proceedings of the Twelfth Annual Climate Diagnostics Workshop, 12–16 October 1987, 381–386.
- [6] Baumhefner, D.P., 1987, Experimental 30-day forecasts from several spectral general circulation models, as reference [5], 412–418.
- [7] Epstein, E.S., 1969, Stochastic dynamic prediction, *Tellus*, Vol. 21, 739–759.
- [8] Leith, C.E., 1974, Theoretical skill of Monte Carlo forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 102, 409–418.
- [9] Murphy, J.M., 1988, The impact of ensemble forecasts on predictability, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 114, 463–493.
- [10] Hoffman, R.N., and E. Kalnay, 1983, Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting, *Tellus*, Vol. 35A, 100–118.
- [11] Dalcher, A., E. Kalnay, and R.N. Hoffman, 1988, Medium range lagged average forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 116, 402–416.
- [12] Molteni, F., U. Cubasch, and S. Tibaldi, 1986, Experimental monthly forecasts at ECMWF using the lagged average forecasting technique, as [1], 598–607.
- [13] Tokioka, T., K. Yamazaki, and M. Chiba, 1986, A comparative study of the effect of observed / climate sea surface temperature for dynamical forecast up to two months in the early summer of 1983, as [1], 615–623.
- [14] von Neumann, J., 1955, Some remarks on the problem of forecasting climatic fluctuations, *Dynamics of Climate*, Edited R.L. Pfeffer, Pergamon Press, 9–11.
- [15] Мусаели, Ш. А., 1980, О динамико-статистической параметризации тепловой памяти океана, *Метео и Гидро*, No. 3, 5–14.
- [16] Марчук, Т.И., 1979, Моделирование изменений климата и проблема долгосрочного прогноза погоды, *Метео и Гидро*, No. 7, 25–36.
- [17] Алексеев, Г.Б., Ю.Б. Николаев, 1979, К проблеме предсказуемости в долгосрочных прогнозах погоды, *Метео и Гидро*, No. 5, 16–21.
- [18] Madden, R.A., and D.J. Shea, 1982, Potential longrange predictability of precipitation over the North America, Proceedings of Seventh Annual Climate Diagnostics Workshop, 18–22 October 1982, 423–426.
- [19] Shea, D.J., 1983, Sensitivity studies on the estimates of climate noise and potential long range predictability of January temperature and precipitation over the U.S. and Canada, Proceedings of the Eighth Annual Climate Diagnostics Workshop, 17–21 October 1983, 313–321.
- [20] Груза, Г.В. Н.Н. Шевченко, 1988, Климатический сигнал, климатический шум и предельные возможности долгосрочного прогнозирования, *Метео и Гидро*, No. 6, 5–14.
- [21] Reynolds, G., 1978, Two statistical heresies, *Weather*, Vol. 33, 74–76.