

# 环流异常的时空特征与长期数值预报模式设计

黄建平

(北京大学地球物理系)

**提要** 本文着重阐述了环流异常的正压性、驻波性等空间结构特征和环流异常的相似性演变,以及如何将这些特点引入到长期数值预报模式。

## 一、引言

长期数值预报和气候理论涉及大气系统的长期行为,在设计模式之前应该了解模式所应有的特征。长期天气系统是一个强迫耗散的非线性系统,而“耗散系统最终将趋向维数比原始相空间低的极限集合——吸引子,许多自由度在演变过程中成为无关变量,最终剩下支撑起吸引子的少数自由度”<sup>[1]</sup>。如果不考虑系统极其复杂的暂态行为,我们自然可以把这些“无关变量”去掉,从而把高维动力系统简化成低维动力系统。这个解释 H. Haken<sup>[2]</sup>称作随动原理。理论研究表明,在定常外源强迫下,大气系统处在吸引子状态,其统计特征由一个吸引点集给出<sup>[3]</sup>。如果外源的变化相对于月际变化的时间尺度来说是一个慢过程,月平均距平场可视为此吸引点集的均值。但距平场中包含了许多因素的共同影响,使距平场所反映的特征非常复杂,为了消除那些“气候噪音”<sup>[4]</sup>的影响,把有用的信息分离出来,这里我们介绍月平均距平场演变的时空特征,并讨论了在设计模式时如何考虑和描述这些特征。希望这里提出的概念和方法将有助于进一步认识环流异常的形成机制和建立有效的长期数值预报模式。

## 二、环流异常的相当正压性

王绍武<sup>[5]</sup>认为环流异常的正压性的发现是近年来对大气环流长期变化的研究所取得的进展之一,他指出,过去研究大尺度环流异常,往往只限于一个高度。近年已有不少工作对不同高度的大气环流异常进行了比较。结果发现各层之间时常变化很一致,也就是说,环流异常随高度变化不大。如 Edmon(1979)<sup>[6]</sup>分析了 1976—1977 年及 1977—1978 年冬季北半球环流,并与多年平均比较,结果发现无论距平零线还是正负中心,都几乎是垂直的。Quiroz(1979)<sup>[7]</sup>在解释对流层与平流层温度变化的联系时,强调 2 波的发展,他绘制了 1000—10 hPa 自 1979 年 1 月 1 日到 2 月 28 日逐日 1 波与 2 波振幅的时间剖面图,发现从地面到 10 hPa,其振幅变化相当一致。Kirshnamurti 等<sup>[8]</sup>对整个 365 天全球 6 层的 FGGE-IIIb 资料的 5 个变量进行时间序列分析和频率滤波分析,以研究 30—50 天低频振荡的结构,从轴线不随高度而倾斜来看,这些扰动的基本特征是正压的,但振幅却是随高度增加的。Hoskins 等(1981)<sup>[9]</sup>则用一个五层原始方程模式证实了低频扰动具有相当正压的垂直结构。Blackmon 等(1979)<sup>[10]</sup>利用 11 年的资料

分析了位势高度场扰动的垂直结构在地理上的变化,其结果表明:海洋上空的扰动显示出很强的正压结构,其位势高度场上下相当一致,且温度变率很小。但内陆上空,扰动结构具有一定的斜压性。

我们利用北京气象中心分析整理的1956—1983年100、500、700和1000 hPa四层北半球网格点资料,分析了北半球冬季环流异常的垂直结构特征<sup>[11]</sup>。结果表明,EOF第一特征向量在对流层中具有明显的相当正压性结构,并且在环流异常中权重最大,它和半球性的天气异常有明显关系。谐波分析表明大气环流异常的正压性主要和超长波的活动有关。黄建平等人<sup>[12,13]</sup>利用同一组资料,又从能量变化的角度作了进一步分析。结果发现就整个半球平均而言,月平均环流的正压动能是斜压动能的2倍,正压动能约占总动能的66.2%;在中纬度正压动能占总动能的70%以上;在两大洋地区甚至达90%以上。另外,正压动能的方差贡献也要比斜压动能的方差贡献大得多,在季节转换期间尤为明显,两大洋地区甚至大一个量级以上。以上分析都是从不同的侧面说明了大气环流异常具有相当正压的垂直结构,这是值得在设计长期数值预报模式时注意的。

实际上,对流层大气厚度只有10 km左右,而地球半径约有6370 km,相对于行星尺度而言,大气仅仅是一层薄膜。长期数值预报模式似乎不用像短期数值预报那样分那么多层次,尤其是在发展初期。在垂直方向大气的自由度因为受静力平衡和辐射—对流平衡关系的制约而受到限制。我们认为,在定常外源强迫下,大气中可能存在正压气候平衡适应过程,适应过程也即斜压扰动的能量频散过程,适应的终态表现为波的振幅随高度增加而位相随高度不变的相当正压结构。因此,长期数值预报模式采用较少的垂直分层,不仅仅是为了使问题简化,更重要的是还可以滤去一部分“气候噪音”的影响。

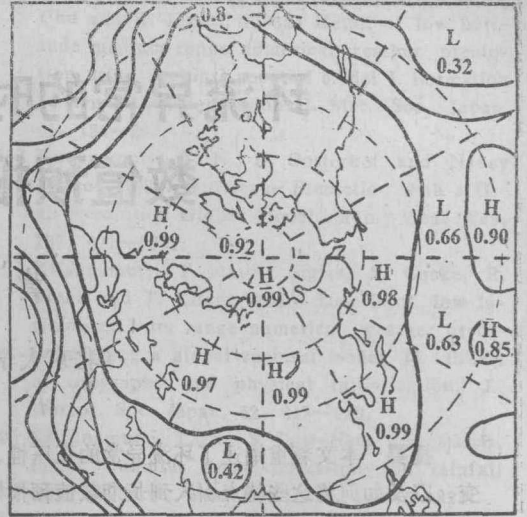


图1 1月500 hPa和700 hPa距平场相关系数分布(等值线间隔0.2)

那么,如何将正压性的特点引入模式呢?图1给出了1月500 hPa和700 hPa距平场相关系数的分布,不难看出,700 hPa和500 hPa距平场有很好的相关,相关系数大于0.8的区域几乎覆盖了30°N以北的全部区域,象苏联北部地区,两大洋地区相关甚至达到了0.98以上,尽管低纬的相关差一些,但也都达到了0.01%的信度。500 hPa和300 hPa, 500 hPa和100 hPa的距平场相关与此类似, 500 hPa和300 hPa距平场相关高值区的范围还要大一些。其它季节的结果也是如此,只是夏季高值区的范围略向北收缩。这说明对流层各高度层上的位势距平可以比较精确地用500 hPa的距平来表示。例如取

$$\begin{aligned} \Phi'_{300} &= b_3 \Phi'_{500} \\ \Phi'_{700} &= b_7 \Phi'_{500} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\Phi'_p$  ( $p=300, 500, 700$ )表示位势距平,  $b_3$ 和 $b_7$ 是由多年资料确定的回归系数,表1给出了 $b_3$ 和 $b_7$ 的纬圈平均值。分析表明,用(1)式计算的300 hPa、700 hPa的距平值和观测值相当接近(图略)。因此,长期数值预报模式在垂直方向离散化时,可将距平部分取为准一层,例如

表 1  $b_3$  和  $b_7$  的纬圈平均值

项目 \ 纬度	20	30	40	50	60	70	80
$b_3$	1.32	1.34	1.40	1.36	1.32	1.29	1.22
$b_7$	0.61	0.65	0.65	0.68	0.70	0.72	0.77

$$\left(\frac{\partial \Phi'}{\partial P}\right)_{500} = \frac{1}{2 \Delta P} (\Phi'_{700} - \Phi'_{300})$$

$$\approx \frac{1}{2 \Delta P} (b_7 - b_3) \Phi'_{500} \quad (2)$$

但气候平均仍采用通常的离散化方法, 如

$$\left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial P}\right)_{500} = \frac{1}{2 \Delta P} (\bar{\Phi}_{700} - \bar{\Phi}_{300}) \quad (3)$$

这样就不仅将环流异常正压性的特点引入了模式, 而且还保留了气候平均场的斜压性结构<sup>[15]</sup>。

将正压性特点引入模式的另一个方案是用两参数来描写大气的垂直分布<sup>[14]</sup>, 即设

$$\Phi_B = \frac{1}{P} \int_0^P \Phi(x, y, P, t) dP$$

$$T_B = \frac{1}{P} \int_0^P T(x, y, P, t) dP \quad (4)$$

这样  $\Phi_B, T_B$  只是  $x, y, t$  的函数, 不再依赖于  $P$ 。

### 三、环流异常的驻波性

长期天气过程形成的物理因子与短期天气过程不同, 它的最基本的能源是下垫面的非绝热加热。而下垫面冷热源的分布与海陆分布有密切关系, 所以形成长期天气过程的是地理位置准稳定的驻波<sup>[5]</sup>。

例如, Walker 的世界三大涛动, 就是典型的驻波, 每个涛动系统包括两个气压变化彼此相反的地区, 这两个地区的气压此起彼伏, 基本上只在本地区变化而不向下游传播。Troup (1965)<sup>[5]</sup> 就指出这一点。Edmon (1980)<sup>[16]</sup> 利用 5 天平均的 500 hPa 高度场证明太平洋到北美的环流变化是驻波造成的遥相关, 而不是距平的传播, 因为相关中心并不移动, 只有加强或减弱。Horel (1980)<sup>[17]</sup>

对 500 hPa 月平均图进行了旋转主分量分析, 得到四种环流异常空间分布特征, 从另一个角度证明大气环流异常的驻波性。Wallace 和 Gutzler (1981)<sup>[18]</sup> 则重新考察了北半球的遥相关结构, 发现了五种遥相关型, 它们的水平结构呈多活动中心的波状结构, 这标志着时间尺度为一个月以上的长期天气变化是一种驻波涛动<sup>[19]</sup>。

正是由于长期天气过程具有显著的驻波性质, 因此只在驻波振荡明显的区域才有较为显著的可预报信息。我们把这些区域称之为信息区, 长期数值预报可以只对可预报性强的信息区作出好的预报, 非信息区的预报则可通过信息区的预报值诊断求出。事实上这种方法在实际业务预报中早已被广泛采用。例如, 北京气象中心中央气象台<sup>[5]</sup> 作 500 hPa 距平预报时, 就是先根据不同的季节划分出一些关键区, 然后利用相关普查或根据韵律, 预报出预报月该关键区的距平符号, 然后根据关键区的符号画出一张初步的环流预报图。长期数值预报似宜采用同样的方法, 并应设法把这些实际预报经验和长期预报理论结合起来。基于上述想法, 黄建平等人<sup>[20]</sup> 提出了一种距平场的宏观描述方法, 该方法主要分两步。

首先利用多年资料确定信息区, 这些区域由  $m$  个信息点组成。图 2 给出了冬季 1 月

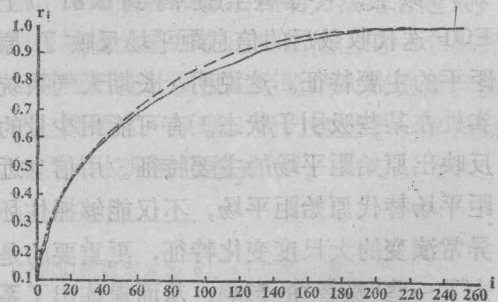


图 2 相关系数 ( $r_i$ ) 随信息点数 ( $i$ ) 增加的演变曲线。实线为冬季 1 月, 虚线为夏季 7 月

和夏季 7 月相关系数随信息点数增加的演变曲线。由图 2 不难看出, 初始时刻相关系数随点数的增加而很快增加; 由几十个信息点构

成的距平场和原距平场已达到很高的相关,平均而言,达到 0.75 的相关只需 72 个点。

第二步,用所选出的  $m$  个信息点的距平值确定出其余非信息点的距平值。先用曲面拟合的方法由信息点的实际距平值给出非信息点的距平估计值,然后再利用 EOF 分布收敛快的特点,逐次分解逼近,直到相邻两次迭代所得结果之差,小于允许误差为止。计算表明一般迭代 2—3 次即可收敛。表 2 给出了 12 个月的计算结果。表中的相关系数是每次迭代后信息近似距平场时间序列和原始距平场时间序列的相关。由表 2 不难看出,

表 2 信息距平场 EOF 逐次逼近结果

月	迭代次数		
	0	1	2
1	0.75	0.8128	0.8129
2	0.75	0.8075	0.8076
3	0.75	0.7956	0.7956
4	0.75	0.7892	0.7891
5	0.75	0.7868	0.7868
6	0.75	0.7795	0.7796
7	0.75	0.7870	0.7876
8	0.75	0.7816	0.7816
9	0.75	0.7905	0.7905
10	0.75	0.7836	0.7837
11	0.75	0.7839	0.7840
12	0.75	0.8005	0.8006

迭代后相关系数多由原来的 0.75 提高到 0.78 以上,冬季甚至提高到 0.81 以上。EOF 迭代收敛后的信息距平场反映了原始距平的主要特征。这说明,长期天气系统确实处在某些吸引子状态。有可能用少量的点反映出原始距平场的主要特征。用信息近似距平场替代原始距平场,不仅能够抓住环流异常演变的大尺度变化特征,更重要的是滤去了一些“噪音”的影响,从而提炼出了系统演变的主要信息。

#### 四、环流异常的相似性演变

季节尺度环流异常时间演变的一个明显特点是其韵律性。早在本世纪三十年代苏联

学者就提出了时间间隔为 3 个月和 5 个月的韵律。Namias (1978)<sup>[21]</sup> 计算了北太平洋各月海温滞后 1—24 个月的相关后发现,滞后相关系数不是随着滞后月数增加而单调下降,而是滞后 9 个月,相关突然明显增加,这说明北太平洋海温除具有持续性的特点外,还明显地具有韵律规律。Marchuk (1977)<sup>[22]</sup> 在研究长期天气过程的分析和预报的数学物理方法时指出,气候是大气与海洋相互作用的结果,有时大气主动,有时海洋主动;有时这个半球主动,有时那个半球主动。这样形成的气候韵律有自己的周期性。Мусаелян(1980)<sup>[23]</sup> 在研究长期数值预报问题时明确指出,夏半年海洋吸收太阳辐射能,将其转换成热量并且“记忆”,也就是把它贮存在海洋深层,冬半年借助热交换的不同过程,海洋把其热量传递给大气。因此特别强调夏季北大西洋上空的云量距平在冬季苏联欧洲领土上气温距平形成中起的作用。

以上几个例子说明海气相互作用的长期过程中存在韵律关系。最近王绍武等(1984, 1986)<sup>[24,5]</sup> 采用类似于 Lorenz(1966, 1973)<sup>[25,26]</sup> 研究动力学可预报性的方法,对环流异常的相似性演变进行了研究。首先从 1951—1975 年逐月北半球 500 hPa 距平图上寻找相似。然后观察每一对相似年其后各月的相关,直到第 18 个月。结果发现两个不同年份的月平均距平场从某个起始月相似时起,相似性会很快变差,但过了约半年左右相似性却又增加。在长期预报中把这种现象称之为相似韵律。如果这种相似韵律现象是普遍存在的,我们就可以利用环流异常历史演变提供的信息,采用统计—动力结合的方法作出较为有效的季节长期预报,黄建平等(1989)<sup>[27]</sup> 利用更长时间的观测资料和较严格的统计方法对此作了进一步研究。

首先计算 1951—1986 年不同年间(36 年中所有可能的两年组合)北半球 500 hPa 距平场的各相似指数\*,并统计出相似指数数值相同的出现频数,然后计算与各级相似指

数对应的下一个月的平均相似指数 (对应的相似指数累加再除以相应的频数), 依此类推直到滞后 11 个月的平均相似指数, 然后以起始月出现的各级相似指数 ( $R_{i,j}$ ) 为横坐标, 以滞后月的平均相似指数 ( $\bar{R}_{i,j}$ ) 为纵坐标, 分别作出滞后 1 个月, 2 个月直至滞后 11 个月

的散布图, 然后用最小二乘法找到一条最能代表图中点散布情况的直线作为总体回归直线, 以回归直线的斜率反映相似性的好坏。斜率越大, 则滞后月的相似性就越好。图 3a 和 3b 分别给出了以 1 和 7 月为起始月回归直线的斜率变化图。容易看出回归直线的斜

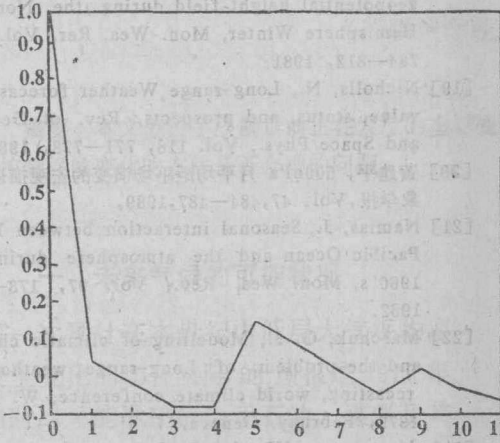


图 3a(左)起始月为 1 月的回归直线的斜率变化

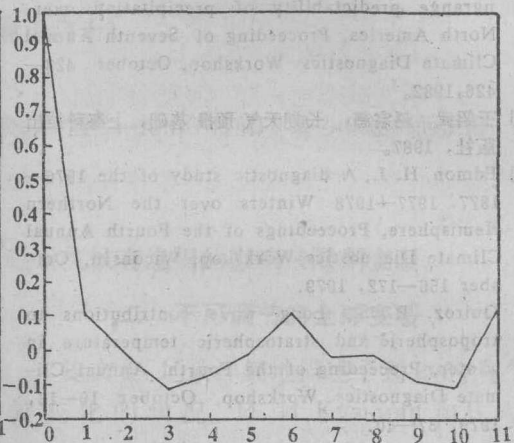


图 3b(右)起始月为 7 月的回归直线的斜率变化

率并非随着滞后月的增加而逐渐减少, 而是滞后 6 个月左右后, 直线的斜率回升, 其后斜率变小, 这说明对不同的起始月, 月平均环流异常演变过程中 6 个月左右的相似韵律是比较普遍的, 利用同样的方法, 我们还分析了北太平洋海温场相似性演变。结果表明海温距平场的相似韵律活动也很明显。另外, 相似海温场的持续性也比较好。

由于相似韵律往往表现为不连续的关系, 所以不能仅从大气或海洋本身来认识其形成过程, 而必须研究它们之间的相互作用。黄建平等人<sup>[29]</sup>利用一个海气耦合模式研究了相似韵律现象形成的动力学机制。结果表明, 相似韵律现象的产生是由于在月平均环流季节变化的强迫下, 海气耦合系统相互作用造成的相似离差扰动的不均匀振荡。上述研究为建立一个新的动力-统计季节长期数值预报模式提供了基础。

由于在相似的初始场和边界条件下, 经过一定时间间隔大气和海洋状态的演变往往也相似。因此, 目前所采用的季节长期预报

方法中, 历史相似法仍是最普遍的方法之一, 如 N. Nicholis (1984)<sup>[29]</sup>, N. E. Davis (1978), Jolliffe (1979), Murray (1973) (1977), Schuurmans (1973), Nap (1981)<sup>[30]</sup>, Gruza 等 (1980), Barneet 等 (1973, 1982)。这些研究都表明历史相似法具有一定的季节预报技巧。但是, 历史相似法把未来看成是过去某段历史的简单重复, 显然不太合理。但如果将相似法和动力法结合起来, 把预报场视为叠加在历史相似上的一个小扰动, 则可将统计预报的经验纳入数值预报模式中。根据这一原理, 我们建立了一个相似-动力季节长期数值模式<sup>[15]</sup>。

$$* \text{相似指数定义为 } R_{i,j} = -C \ln \frac{|\sigma_{i,j}|}{\bar{\sigma}}$$

其中  $C=16/\ln 2$  为放大因子,  $\bar{\sigma}$  为  $\sigma_{i,j}$  的平均值,  $\sigma_{i,j}$  为两个不同年距平场  $x_i$  和  $x_j$  的相似系数

$$\sigma_{i,j} = 1 - r_{i,j} \left( 1 - \frac{E_{i,j}}{S_m} \right)$$

这里  $m$  为网格点数,  $S$  为两年距平场平均方差的平均值,  $E_{i,j}$  为欧氏距离,  $r_{i,j}$  为相关系数。这样定义的相关相似系数既反映了环流异常的形相似, 又反映了值相似, 是表示环流异常相似性的一个综合指数。

## 参 考 文 献

- [1] 郝柏林, 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其它, 物理学进展, Vol. 3, 329—415, 1983.
- [2] H. Haken, 协同学 (徐锡申等译), 183—282, 原子能出版社, 1984.
- [3] 汪守宏, 黄建平, 大尺度大气运动方程组解的一些性质, 中国科学B辑, No. 3, 328—336, 1989.
- [4] Madden, R. A., and D. J. Shea, Potential long-range predictability of precipitation over North America, Proceeding of Seventh Annual Climate Diagnostics Workshop, October 423—426, 1982.
- [5] 王绍武, 赵宗慈, 长期天气预报基础, 上海科技出版社, 1987.
- [6] Edmon, H. J., A diagnostic study of the 1976—1977, 1977—1978 Winters over the Northern Hemisphere, Proceedings of the Fourth Annual Climate Diagnostics Workshop, Wisconsin, October 156—172, 1979.
- [7] Quiroz, R. S., Long-wave contributions to tropospheric and stratospheric temperature in winter, Proceeding of the Fourth Annual Climate Diagnostics Workshop, October 16—18, 1979, 37—40.
- [8] Krihnamurti, T. N. and S. Gaclgil, FGGE 期间全球 30—50 天振荡的结构, 气象科技, 1987, 2, 33—44.
- [9] Hoskins B et al, Long-scale Dynamical Processes in the atmosphere Academic Press, 1983.
- [10] Blackmon, M. I. and J. M. Wallace, Geographical variation in the vertical structure of geopotential height fluctuation, J. Atmo. Sci. Vol 36, 2450—2466, 1979.
- [11] 周琴芳, 黄建平, 北半球冬季月平均距平场垂直结构的初步分析, 气象学报, Vol. 47, 173—179, 1989.
- [12] 黄建平, 北半球月平均环流正压斜压动能的比重及各自特点的动力统计分析, 1987 年长期天气预报会议文集, 57—66, 1987.
- [13] 黄建平, 北半球月平均环流正压动能的年变化, 高原气象, Vol. 7, 264—268, 1988.
- [14] 丑纪范, 长期数值天气预报, 气象出版社, 1986.
- [15] 黄建平, 一个相似-动力季节长期数值预报模式, 待发表.
- [16] Edmon, H. J. Time evolution of teleconnection patterns, Proceedings of the Fifth Annual Climate Diagnostics Workshop, October, 85—992, 1980.
- [17] Horel, J. D., A rotated principal component analysis of the interannual variability of the 500 hPa height field, Proceeding of Fifth Annual Climate Diagnostic Workshop, October, 80—84, 1980.
- [18] Wallace, J. M. et. al, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter, Mon. Wea. Rev. Vol. 109, 784—812, 1981.
- [19] Nicholls, N., Long-range Weather forecasting: value, status, and prospects, Rev. of Geophys and Space Phys., Vol. 118, 771—778, 1980.
- [20] 黄建平, 500hPa 月平均距平场演变的宏观描述, 气象学报, Vol. 47, 484—487, 1989.
- [21] Namias, J., Seasonal interaction between North Pacific Ocean and the atmosphere during the 1960's, Mon. Wea. Rev., Vol. 97, 173—192, 1962.
- [22] Marchuk, G. J., Modelling of climatic change and the problem. of Long-range weather forecasting, world climate conference, W. M. O. 1979, February, Geneva.
- [23] Мусаелян, Ш. А., О Динамико-статистическом Параметризации тепловых памяти океана.
- [24] Wang Shaowu, The rhythm in the atmosphere and ocean in application to Long-range weather forecasting, Advance in Atmosphere Sciences, Vol. 1, 7—18, 1984.
- [25] Lorenz, E. N., J. Atmos. Sci, Vol. 26, 3—12, 1966.
- [26] Lorenz, E. N., Third Conference of Probability and Statistics in Atmosphere Science, 1973.
- [27] 黄建平, 北半球月平均环流异常演变的相似韵律现象, 高原气象, Vol. 9, 88—92, 1989.
- [28] 黄建平, 海气耦合系统相似韵律现象的研究, 中国科学B辑, No. 9, 1001—1008, 1989.
- [29] Nicholis, N., Long-range weather forecasting: recent research, Long-range Forecasting Research Publication Series, No. 3, 1984.
- [30] Nap, J. L., et. al, A verification of monthly weather forecasting in the seventies, Mon. Wea. Rev., 109, 306—312, 1981.