

年周期气候态对气候模式的修正*

周江兴 丁一汇

(国家气候中心, 北京, 100081)

摘 要

文中从两个独立的假定导出了距平模式, 即: 假定年周期气候态为控制实际气候系统演化方程组的解或假定反映年周期气候态的基态量远大于反映气候扰动态的扰动量。第一个假定放宽了导出距平模式的条件, 而在第二个假定下距平模式在一定的近似程度下是成立的。另外笔者注意到: 距平模式通过引入实际观测到的年周期态, 相当于在非距平模中引入了年周期气候态的修正项。

关键词: 年周期态, 气候模式的修正, 距平模式。

1 引 言

在数值预报中, 如何利用历史观测资料是非常重要的问题。因为, 在丰富的历史观测资料中, 既包含气候系统的状态演变信息, 也包含控制气候系统演变的动力学信息; 而这些信息对于改进数值模式是极为有用的。早在 1958 年顾震潮^[1]就注意到这个问题的重要性和可能性。此后, 丑纪范^[2]、Marchuk^[3]、邱崇践等^[4]和郇吉东等^[5]学者在这个方面做了深入细致的工作。

与前面的考虑不同, 巢纪平等^[6~9]为了避免不容易预报好的气候场, 发展了距平滤波模式。此后, 杨修群等^[10]研制了原始方程距平模式。距平模式的基本方法是用实际观测的气候态代替模式本身的气候态, 这一做法看起来有些随意, 但深入地研究会注意到其中确实包含某些重要的合理成份, 这一点可以从巢纪平等^[11]研制的距平滤波模式在国内外进行的多个月季环流预报个例中取得的成功得到印证。众所周知, 就目前现状而言, 人们对在气候模拟中起关键作用的一些重要物理过程(如: 辐射过程、积云对流过程、边界层湍流过程等等)的了解并不十分清楚; 因而, 气候模式模拟的年周期态及扰动态都将出现误差。距平模式用实际观测气候态代替模式本身的气候态, 仅模拟扰动量的变化。这一做法主要的优点在于: 扰动量的预报建立在一个正确

的气候背景场基础之上; 而气候背景场获得是否正确对扰动量预报的影响可能是很大的(这一点在后面将进一步分析)。尽管如此, 以上的推断是建立在距平模式的理论基础是可靠的前提下得出的, 而距平模式的理论基础是否可靠还是值得认真探讨的一个重要问题。在过去的工作中^[7~10], 距平模式的导出依赖于这样一个假定, 即: 实际观测到的年周期气候态为其所使用的基本方程的解; 这个假定似乎过于苛刻, 而且没有必要。这个假定可以用一个比较宽松的假定来取代, 即实际观测的年周期气候态是控制实际气候运动方程的解; 而通常使用的模式仅仅是控制实际气候运动方程体系的一个子集。不仅如此, 还可从另一个完全独立假定导出距平模式, 即: 假定反映年周期气候态的物理量远大于反映扰动态的物理量。另外, 笔者还注意到: 距平模式与非距平模式的差别仅仅在于, 距平模式通过引入实际观测得到的年周期气候态, 在非距平模式中自然地引入了年周期气候态对非距平模式的修正项, 由此使非距平模式在一定程度上得到改进; 换句话说, 距平模式是一种改进的非距平模式。在这种解释下, 巢纪平等^[9]工作所取得的成功是可以理解的。

本文作者曾对国内许多站点 45 a 的逐日温度资料作谱分析。经过大量的分析发现, 这些资料的谱结构, 都具有这样一些极为明显的特征:

(1) 这些谱均由清晰的点谱和连续谱构成;

* 初稿时间: 2001 年 6 月 6 日; 修改稿时间: 2001 年 9 月 6 日。

(2) 点谱的强度比连续谱的强度要强得多;

(3) 对应于点谱的是年周期及其谐波分量,而对应于连续谱的是小扰动分量。

从分析观测资料的这些谱结构得知,年周期态和扰动态具有不同的内在特征,不应该同等地看待,而应该把它们分离开来处理;很显然,年周期态在气候态中起着主导的支配作用,应该优先考虑。

2 气候态的分解

一般来说描述气候态的变量 A 可以分解为两部分:基本的年周期部分 A^0 和小扰动部分 A' ,即

$$A(t, x) = A^0(t, x) + A'(t, x) \quad (1)$$

$$A^0(t + T, x) = A^0(t, x) \quad (2)$$

其中 T 为年周期常数, x 为空间坐标, t 为时间变量。

资料分析表明:

(1) 通常情况下,以下关系成立

$$|A^0| \gg |A'| \quad (3)$$

为了形象地说明这一点,这里给出了北京地区逐日温度(图 1)及其距平(图 2)和逐日温度年变化(图 3)图。

(2) A^0 对应于极强的点谱, A' 对应于弱的连续谱。

为了形象地说明这一点,给出了由北京地区 45 a 的逐日温度观测资料得到的谱图(图 4)。

图 4 中最高峰对应于年周期的基波,次高峰对应于半年周期的谐波。

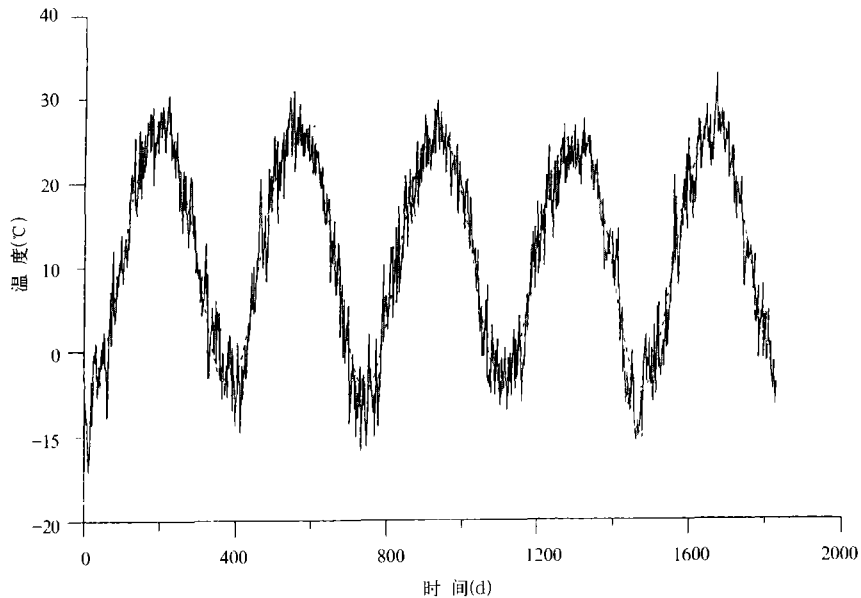


图 1 北京地区 1951~1995 年逐日温度变化曲线

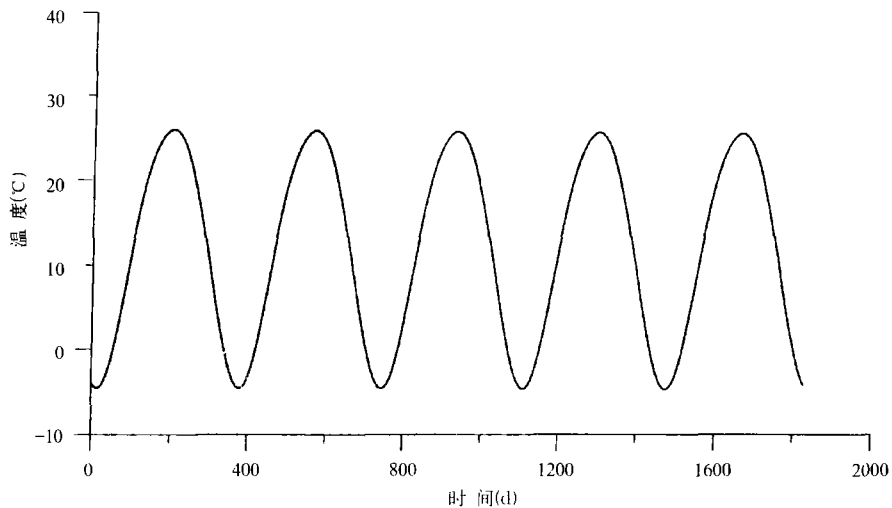


图 2 北京地区温度的年变化曲线

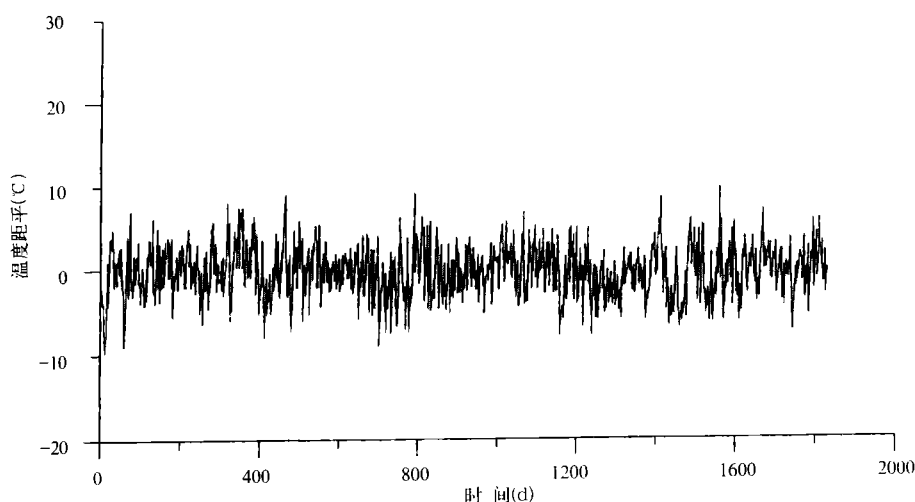
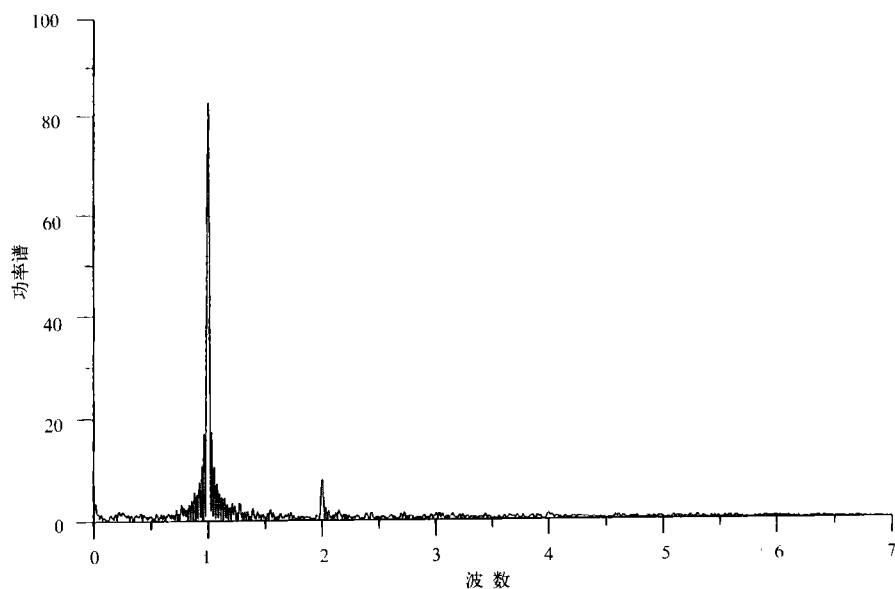


图3 北京地区 1951~1955 年逐日温度距平曲线

图4 北京地区温度的连续功率谱曲线
(波长 $k=1$ 时对应于 1 年周期)

从资料分析的结果(1)和(2)可以作出这样一个推断:

在把太阳辐射年周期强迫作为唯一的外强迫源时,控制实际气候演变的方程组,存在一个零级近似的年周期解,这个零级近似年周期解作为基态是不稳定的;实际观测到的偏离年周期态的小扰动是由于这个基态不稳定所激发出来的。进而可以得出:

对年周期态模拟正确与否将对扰动态的模拟产生十分重要的影响。

这一推断与 Charney 在 1955 年一篇很有影响的工作^[11]中作做出的判断相似。Frederiksen^[12~14]

以及 Simmons^[15]工作表明,低频振荡、遥相关以及阻塞高压与基本气候态的不稳定存在着密切的联系,它们与基本气候态的某些特定的不稳定模态相对应。这些工作也说明基本气候态对行星尺度对大尺度扰动的发展有着重要的影响。基于这样一种判断,本文试图利用实际观测资料来修正气候模式,使其模拟的年周期态与实际观测到的年周期态尽可能一致。

3 气候模式及其误差分析

假定控制实际气候系统演变的谱方程具有如下

形式:

$$\frac{du_i}{dt} = F_i(u, \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (4)$$

$$F_i(u, \alpha, t + T) = F_i(u, \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

其中: $u = (u_1, u_2, \dots)$ 为气候状态变量的谱分量, α 为外参数。

假定实际使用的 N 维气候谱模式为

$$\frac{du_i}{dt} = f_i(U, \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

其中: $U = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ 。

从无穷维系统(4)到有限维系统(6)必然导致误差的出现。这种误差包括两方面,由物理及动力过程的简化带来的误差和谱截断误差。为了分析这种误差,把方程组(4)写成另一个表达形式:

$$\begin{cases} \frac{du_i}{dt} = f_i(U, \alpha, t) + R_i(u, \alpha, t) \\ \frac{du_j}{dt} = F_j(u, \alpha, t) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$(j = N + 1, N + 2, \dots)$$

$$\text{式中 } R_i(u, \alpha, t) = F_i(u, \alpha, t) - f_i(U, \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

为了表述上的方便,把方程组(7)中的第一式单独列出

$$\frac{du_i}{dt} = f_i(U, \alpha, t) + R_i(u, \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

从式(6)与(9)的比较中可以看出,实际使用的 N 维气候模式(6)产生的误差是由 R_i 引起的;如果能近似地估计出 R_i 的值,那么,气候模式将得到一定的改进。

4 修正气候模式的导出

可以把 u_i 分解为基本的年周期变化部分 u_i^0 和小扰动部分 u_i' , 即

$$u_i = u_i^0 + u_i' \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

其中 u_i^0 为年周期函数。

假定通常情况下,以下关系是满足的,即

$$|u_i^0| \gg |u_i'| \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (11)$$

为了求出 R_i 的近似值,将式(10)代入式(8),并

作泰勒级数展开得

$$R_i = R_i^0 + \sum_{j=1}^{\infty} a_{ij} u_j' + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} a_{ijk} u_j' u_k' + \dots \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

式中 $R_i^0 = R_i(u^0, \alpha, t)$, $u^0 = (u_1^0, u_2^0, \dots)$; 泰勒级数的系数为 u^0 的函数。

在式(12)中,略去带撇号的量,则得到 R_i 的零级近似值 R_i^0 , 即

$$R_i \simeq R_i^0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

现在来考虑如何求出 R_i^0 的近似值。为此,先将 f_i 作为泰勒级数展开,得

$$f_i = f_i^0 + \sum_{j=1}^N b_{ij} u_j' + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N b_{ijk} u_j' u_k' + \dots \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

式中 $f_i^0 = f_i(U^0, \alpha, t)$, $U^0 = (u_1^0, u_2^0, \dots, u_N^0)$ 。

将式(10),(12)及式(14)代入式(9),经过整理得

$$\frac{du_i^0}{dt} - f_i^0 - R_i^0 = - \frac{du_i}{dt} + \sum_{j=1}^N b_{ij} u_j' + \sum_{j=1}^{\infty} a_{ij} u_j' + \dots \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

在式(15)中,略去带撇号的量,则得到具有零级精度的近似关系

$$\frac{du_i^0}{dt} - f_i^0 - R_i^0 \simeq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (16)$$

$$\text{于是有 } R_i^0 \simeq \frac{du_i^0}{dt} - f_i^0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

再考虑到式(13),则有

$$R_i \simeq R_i^0 \simeq \frac{du_i^0}{dt} - f_i^0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (18)$$

$$\text{令 } \tilde{R}_i \equiv \frac{du_i^0}{dt} - f_i^0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (19)$$

由于 u_i^0 可以从实际观测资料中求出 a_i^0 , 因而将 a_i^0 代入式(19)便可求出 $\tilde{R}_i$, 这样便可得到考虑年周期气候态影响的修正气候模式:

$$\frac{du_i^0}{dt} = f_i^0(U, \alpha, t) + \tilde{R}_i(\alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (20)$$

5 修正气候模式的另一种导出方法

在上节中尽管用级数展开方法导出了修正气候模式,但其基本的意义不是十分明确;这一节将从另一个角度来导出修正气候模式,这种导出方法,其意

义十分明确。

首先假定控制实际气候系统演变的谱方程(4)具有一个年周期解 u_i^0 , 然而, 这个年周期解是不稳定的, 因此, 在实际大气中所观测到的是年周期解 u_i^0 上叠加一个小扰动量 u_i' 所构成的解 u_i , 即

$$u_i = u_i^0 + u_i' \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (21)$$

式中 u_i^0 为年周期函数。故 u_i^0 满足方程(4), 即

$$\frac{du_i^0}{dt} = F_i(u^0, \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (22)$$

将式(21)代入方程组(7)中, 并考虑到式(22), 于是可以得到基态 u_i^0 和小扰 u_i' 所满足的方程。

基态 u_i^0 的方程为

$$\frac{du_i^0}{dt} = f_i^0 + R_i^0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (23)$$

$$\frac{du_j^0}{dt} = F_j^0 \quad (j = N+1, N+2, \dots) \quad (24)$$

式中

$$\begin{cases} f_i^0 = f_i(U^0, \alpha, t) & (i = 1, 2, \dots, N) \\ R_i^0 = R_i(u^0, \alpha, t) & (i = 1, 2, \dots, N) \\ F_j^0 = F_j(u^0, \alpha, t) & (j = N+1, N+2, \dots) \end{cases} \quad (25)$$

小扰量 u' 满足的方程

$$\frac{du_i'}{dt} = f_i'(U^0, U', \alpha, t) + R_i'(u^0, u', \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (26)$$

$$\frac{du_j'}{dt} = F_j'(u^0, u', \alpha, t) \quad (j = N+1, N+2, \dots) \quad (27)$$

式中

$$\begin{cases} f_i'(U^0, U', \alpha, t) = f_i - f_i^0 & (i = 1, 2, \dots, N) \\ R_i'(u^0, u', \alpha, t) = R_i - R_i^0 & (i = 1, 2, \dots, N) \\ F_j'(u^0, u', \alpha, t) = F_j - F_j^0 & (j = N+1, N+2, \dots) \end{cases} \quad (28)$$

为了讨论的方便, 将式(23)及(26)单独列出

$$\begin{cases} \frac{du_i^0}{dt} = f_i^0(U^0, \alpha, t) + R_i^0(u^0, \alpha, t) \\ \frac{du_i'}{dt} = f_i'(U^0, U', \alpha, t) + R_i'(u^0, u', \alpha, t) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (29)$$

由于从实际的观测资料中可以求出 u_i^0 ($i = 1, 2, \dots, N$) 的近似值 $\hat{u}_i^0$, 因此, 将 $\hat{u}_i^0$ 代替 u_i^0 代入式(29)的第一式可得:

$$\frac{d\hat{u}_i^0}{dt} \simeq f_i^0(\hat{U}^0, \alpha, t) + R_i^0(\hat{u}^0, \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (30)$$

故有

$$R_i^0 \simeq \frac{d\hat{u}_i^0}{dt} - f_i^0(\hat{U}^0, \alpha, t) \equiv \tilde{R}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (31)$$

于是有

$$\frac{du_i^0}{dt} \simeq f_i^0(U^0, \alpha, t) + \tilde{R}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (32)$$

故可得基态 u_i^0 所满足的修正方程

$$\frac{du_i^0}{dt} = f_i^0(U^0, \alpha, t) + \tilde{R}_i(\alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (33)$$

由于从实际观测资料中不可能得到未来时间内的 R_i' 的近似估计值, 故对 R_i' 不作修正, 而保留原来的形式, 即

$$\frac{du_i'}{dt} = f_i'(U^0, U', \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (34)$$

把式(33)及(34)合起来可得修正的气候模式

$$\frac{du_i}{dt} = f_i(U, \alpha, t) + \tilde{R}_i(\alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (35)$$

显然, 方程(35)与方程(20)是完全相同的, 也就是说用两种不同的假定可以导出相同的结果。

现在, 将式(35)写成另一种与之完全等价的形式, 这种形式把 U^0 和 U' 满足的方程分别列出, 即

$$\begin{cases} \frac{du_i^0}{dt} = f_i^0(U^0, \alpha, t) + \tilde{R}_i(\alpha, t) \\ \frac{du_i'}{dt} = f_i'(U^0, U', \alpha, t) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (36)$$

由式(31)可知 $\hat{u}_i^0$ 是方程(36)的第一个方程解, 而 $\hat{u}_i^0$ 是从实际观测资料中求出的, 因而, 对于方程(36)而言, 只有第二个方程是要求解的, 所以, 把它单独列出, 并按照文献[6~9]的习惯将其称之为方程(35)的距平方程:

$$\frac{du_i'}{dt} = f_i'(\hat{U}^0, U', \alpha, t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (37)$$

方程(35), (36)及(37)是3个等价方程。在实际使用时一般取式(35)或(37)这两种形式中的一种, 式(36)在作理论解释时是很有用的。

6 讨 论

在巢纪平、杨修群等的工作中, 导出距平模式时

所用的基本假定为:实际观测到的年周期气候态,为其使用的非距平气候模式的解,这种假定过于苛刻。本文的工作在于说明在更宽松的假定下,同样能导出距平气候模式;且这种距平气候模式等价于在非距平气候模式中引入年周态修正项。文中采用的一个假定为:实际观测到的年周期气候态为控制实际气候系统方程体系的一个解(并不需要假定为所使用的气候模式的解);另一个假定为:反映年周期气候态的基态量远大于反映气候扰动的扰动量,在这一假定下,可以把实际观测到的年周期气候作为控制实际气候系统方程体系的零级近似解。在此,应该注意到,尽管本文放宽了导出距平气候模式的假定,但是这种放宽的假定也同样存在缺陷。因为气候态本身也处在不断地变化之中,特别是在气候转形阶段这些假定将出现问题,也就是说这些假定只有一个相对稳定的气候时期内是近似成立的。另一个

值得注意的问题是,在低纬度地区,年周期变化并不很强,因而,本文中采用的假定可能会出现一些问题。对于这个问题应该如何处理有待于进一步研究。

最后想指出的是:如何正确地模拟出较真实的基本气候态,是一个值得深入探讨的问题。因为,从 Frederiken^[12-14]以及 Simmons^[15]等人的研究结果看来,低频振荡、遥相关以及阻塞高压等与基本气候态的不稳存在着密切的联系。不同的基本气候态的稳定性是不同的,因而它们所激发出来的低频振荡、遥相关以及阻塞高压等的结构、强度及演化特征将会出现差异;换句话说,不同的基本气候态下,活跃的行星尺度及大尺度扰动是不同的。而低频振荡、遥相关以及阻塞高压等系统在中、短期气候中起着非常重要的作用。

参考文献

- 1 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
- 2 丑纪范.天气数值预报中使用过去资料的问题.中国科学,1974,(6)635~644
- 3 Marchuk G L. Methods of Numerical Mathematics. 2nd, Spring. Verlag, New York Inc, 1981. 510pp
- 4 邱崇践,丑纪范.改进数值天气预报一个新途径.中国科学 B 辑,1987,(8):903~910
- 5 郜吉东,丑纪范.数值天气预报中的两类反问题及一种数值解法——理想试验.气象学报,1994,5(2):129~137
- 6 Group of long-range numerical weather forecasting. On the physical basis of a model of long-range numerical weather forecasting. Scientia Sinica, 1977,20:377~390
- 7 Group of long-range numerical weather forecasting. A filtering method for long-range numerical weather forecasting. Scientia Sinica, 1979,22:661~674
- 8 Chao Jiping, Guo Yufu, Xin Runan. A theory and method of long-range numerical weather forecasts. J Meteor Soc Jap, 1982,60:282~291
- 9 巢纪平,增加全.海-气耦合距平滤波模式的月、季数值预报.气象学报,1986,44(4):417~424
- 10 杨修群,黄士松.全球大气多层原始方程距平谱模式的研制.气象学报,1995,53(1):19~29
- 11 Charney J G. Numerical methods in dynamical meteorology. Proceedings of National Academy of Sciences of U S A, 1995,798~802
- 12 Frederiksen J S. A unified three-dimensional instability theory of the onset of blocking and cyclogenesis. J Atmos Sci, 1982,39:969~987
- 13 Frederiksen J S. A unified three-dimensional instability theory of the onset of blocking and cyclogenesis, II Teleconnection patterns. J Atmos Sci, 1983,40:2593~2609
- 14 Frederiksen J S, Frederiksen C S. Monsoon disturbances, intraseasonal oscillations, teleconnection patterns, blocking and storm tracks of the global atmosphere during January 1979: linear theory. J Atmos Sci, 1992,50:1349~1372
- 15 Simmons A J, Wallace J M, Branstator G W. Barotropic Wave propagation and instability and atmospheric teleconnection patterns. J Atmos Sci, 1983,40:1363~1392

CORRECTION OF THE ANNUAL PERIODIC STATE TO CLIMATE MODEL

Zhou Jiangxin Ding Yihui

(*National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*)

Abstract

An anomaly model is derived under the two independent presuppositions that are the annual climate is the solution to the equations controlling the climate system evolvement and the basic quantity of annual climate is much Larger than the perturbation quantity of the annual climate disturbance. The first presupposition relieves the conditions of the anomaly model and in the second presupposition the anomaly model is approximately existent. In addition, we find that the observational annual climate used in the anomaly model corresponds to the modification of the annual climate used in the non-anomaly model.

Key words: Annual periodic state, Correction for climate model, Anomaly model.