

气候模式与气候模拟

曹 鸿 兴

(气象科学研究院)

提 要

本文扼要地叙述了气候模式与模拟的定义、内容和发展概况。介绍了不同类型模式,如能量平衡模式、辐射对流模式、大气环流模式和随机模式等的主要特征。最后举了两个实例,即用大气环流模式作由二氧化碳增加而造成大气增温的数值试验以及用机制模式研究气候变化及可预报性,以此来阐明当今气候模拟的两个主要方向。

所谓模式(或称构模、建模)是指把研究对象构成一个数学模型,这个模型可以是决定论的,也可以是随机论的或模糊集论的。通常模式一词的含意要比模拟(Simulation)要宽些。气候模拟是指对真实大气的数值模拟,常指用特定模式所作的计算结果。本文就气候模式和气候模拟的基本问题和进展作一扼要的综述^[1,2,3]。

一、动力气候的发展

1930年T. Bergeron首先创导进行动力气候的研究。40年代苏联的E. H. Блинова作了气候数值预报的开拓性研究,其模式曾一度在苏联水文气象中心的长期预报业务中使用过,后因预报准确率不高而中止。真正的动力气候研究则应从60年代算起,这时大气动力学理论尤其是大尺度环流理论有了重大进展,数值天气预报已从试验性研究走向业务化,千万次计算机已投入实际使用,因此一些研究工作者,如美国的地球物理流体动力学实验室(GFDL)的学者们,把大气环流数值试验的思想和方法运用到气候研究上,设计了九层半球大气环流模式(GCM),并于1965年发表了北半球气候

的数值试验结果。1969年苏联的Будыко和美国的Sellers差不多在同时发表了大体类同的一维能量平衡模式,计算出的气候要素随纬度的分布与实测值吻合得很好。并且就地球气候对太阳常数的敏感性作了试验,论证了现在气候处于一种脆弱的平衡中,自然因素不大的变化或人为因素的扰动都有可能破坏现在气候,导致向冰期气候转化,这一结论引起了人们的广泛注意。70年代是动力气候研究的春天,各种类型的模式,如随机模式、辐射-对流模式、非平衡热力学模式、大气环流模式等,雨后春笋般地出现。可以说,气候模式与气候模拟的奠基性工作在70年代已完成。

70年代末期,我国学者也研究了二维能量平衡模式,以及运用经过简化的三层全球大气环流模式作海平面气压的气候平均场模拟。

80年代,在运用大气环流模式方面,则致力于设计更为精细完善的模式,使用亿次巨型计算机,力图把气候变化模拟出来。在对简单气候模式的数学分析方面,运用了迄今为止几乎所有新提出的数学物理工具,如突变论、耗散结构理论、协同论、微分方程

分支理论、随机微分方程理论等，这就构成了动力气候内容与动力气象的相当大的差别，后者至今仍然局限于动力学和热力学范围内，而前者可以说是决定论与随机论的混合体。

1986年5月12—23日在意大利西西里岛举行了“气候和气候变化的物理模式与模拟”讲习班，邀请了24位西方有名的学者作了演讲。为了对气候模拟的现状有一个综观性了解，把讲习班内容的主要方面列举如下：

1. 气候与气候系统、全球大气模式；
2. 气候的物理过程，如辐射传递、海洋过程与陆地过程、反馈过程；
3. 参数化，如积云与凝结参数化，边界层参数化；
4. 海冰的热力与动力模式；
5. 能量平衡模式；
6. 纬向平均气候模式的设计与使用；
7. 大气时间平均态的模式；
8. 海气耦合模式；
9. 气候观测与诊断；
10. 气候模式的有效性；
11. 源于卫星与地面资料的由GCM导出的水文序列；
12. 古气候模式；
13. 气候模式中的有限差分方法和谱方法。

二、气候模式的分类

现在已有繁简程度不一的多种气候模式，但从大的方面来划分有两种：

1. 机制模式

主要用来描述气候系统中的某种物理或化学过程，如能量平衡模式中当反照率取

$$\alpha_p = a - bT$$

时反映了极冰-温度-反照率的正反馈过程。

式中 a 、 b 为经验常数， T 为温度， α_p 为行星反照率。

一些简单气候模式差不多都属于机制模式。

2. 模拟模式

主要是指大气环流模式。它考虑了大气，有时还包括海洋的三维模式，因此能以显式模拟天气尺度以上的大气过程，力图包含全部重要的物理过程。目前的大型 GCM，

是在亿次巨型计算机上作模拟计算的。

在机制模式中，首先提出并占有重要地位的是能量平衡模式 (EBM)，它的最基本形式是一维模式，即温度是纬度的函数，以计算出地球气候的基本事实，即温度呈准纬向分布，赤道热，南北极冷。EBM 的优点不仅在于它简单，能由模式方程的解析解了解气候系统的基本性状，而且还在于可以用其研究参数化技术和敏感性估计方法。

辐射对流模式 (RCM) 是一维的，根据辐射加热与垂直热通量之间的平衡算出大气的垂直温度结构。在研究 CO_2 浓度和气溶胶含量增加所造成的气候影响，研究核战争对气候系统的冲击造成的全球性剧烈降温 (即核冬天) 等方面都应用了 RCM。

在纬度和高度组成的网格点上表示大气，就构成了二维纬向平均动力模式或统计-动力模式，能模拟出纬向平均的风场和温度场。这类模式可以视为一种简化而节省计算时间的大气环流模式。用这类模式已完成大量的敏感性试验，所得结果可以用来导引 GCM 所要完成的试验。

80年代，人们越来越多地研究耦合模式，如大气-海洋耦合模式、冰原-大气耦合模式、陆气耦合模式。这些研究的是气候系统中不同子系统间的耦合作用。耦合模式数值计算的困难之一是不同子系统的运动时间尺度差异很大，需要大量的计算机时间来达到平衡状态。如大气的热弛豫时间小于一年，而海洋的则是几百年的量级。

一种形象的分类法是所谓气候模式的金字塔。金字塔的三条边代表模式的三个基本要素。即辐射、地面过程和动力学。垂直方向表示模式的复杂程度，越到塔的顶部表示复杂程度越大，到金字塔顶，模式已有了足够的分辨率，所有因素都被正确而合理地考虑到模式里去了，这时得到了一个逼真的气候模式。在金字塔的底部是最简单的气候模式，它仅仅考虑一个主要的过程，如能

量平衡模式只考虑了地面过程。金字塔底部被认为是空心的，因为在金字塔的各边之间基本上没有相互作用。沿着金字塔越往上，各主要过程之间的相互作用越大（图1）。

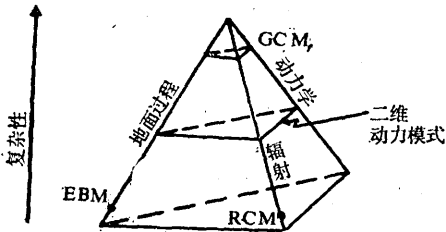


图1 建立气候模式的金字塔

EBM: 能量平衡模式; RCM: 对流辐射模式;
GCM: 大气环流模式

将气候系统分解为快变的“天气”系统（主要由大气组成）和慢变的“气候”系统（由海洋、冰雪圈、陆地等组成）；视天气变量为随机激发因子，而气候变量为激发的响应积分器。这样就可构造一个由随机微分方程描述的随机气候模式，通常是在动力气候方程上加进一个随机强迫项，通过求解郎之万方程或福克-普朗克方程来了解气候变化的机理。

70年代，耗散结构理论与协同学先后问世。相应地在气候理论的研究中提出了以熵平衡方程为基础的模式。假定气候系统是热力学稳定态，服从最小熵交换原则，定义一个熵泛函，使之极小化就可算出全球气候状况，诸如云、地面温度和能量通量等的分布，其结果与观测值相当符合。

另一类熵气候模式是在能量平衡方程中除辐射项 $f(T)$ 外同时考虑能流项 $\text{div} J$ ，即

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = f(T) + \text{div} J$$

式中 T 为温度， t 为时间， c 为热容量， J 为能流，进一步可导出由熵交换项和熵产生项

组成的熵平衡方程。运用这一方程可研究诸如冰盖对气候变化的影响、冰期-间冰期振荡等问题。

三、两个实例

1. W. M. Washington 和 G. A. Meehl(1983)^[4]用NCAR九层谱模式作 CO_2 增加二倍和四倍时大气响应状况的数值试验。在固定云量的 $2 \times \text{CO}_2$ 试验中，地表气温增加了 1.3°C ，变化云量时也增加了 1.3°C 。而 $4 \times \text{CO}_2$ 试验中，固定云量下地面气温增加 2.7°C ，变化云量时增加 3.4°C 。 CO_2 浓度的倍增，不仅影响模式大气的温度，且使降水量也普遍增长。

2. 对 B. Saltman(1981)^[5]提出的大气-海洋-海冰系统的简单气候模式进行数学分析，研究它的自激振荡和可预报性^[6]。出发方程是一个包含反馈的决定论方程

$$\frac{d\eta'}{dt} = \phi_1 \theta' - \phi_2 \eta'$$

$$\frac{d\theta'}{dt} = -\psi_1 \eta' + \psi_2 \theta' - \psi_3 \eta'^2 \theta'$$

η 表示海冰扩展范围（用 $\sin \varphi$ 表示， φ 为纬度）， θ 是平均海温， η' 和 θ' 是对平衡态的偏差值，系数 $\phi_1, \phi_2, \psi_1, \psi_2, \psi_3$ 均为正值。由于这类方程相当简单，可用常微分方程理论进行求解，以研究解的性质和系统的行为。有时在动力方程上加进随机噪声项，进行随机-动力分析。这类模式在加深对气候系统的认识方面所起的作用不应低估。但显然不能把制作气候预报的希望寄托于这类模式上。

上述两个实例说明了目前气候模式与模拟的两个不同的主要途径，即数值的和解析

的,应该说两者各有千秋,互为补充。

气候系统的五个组分分别为:大气,是气体;海洋,是液体;陆地,是固体;冰雪圈,是易随季节变化的固体态;生物圈,是非物理体系。因此它们间的相互作用是极为复杂的,气候系统具有很大的不确定性。在建立模式时要更多地考虑这些不确定性,研究方法需与研究对象匹配,理所当然地应同时从决定论动力学和随机论方程进行。目前气候模式已能相当满意地模拟出气候平均场,但对气候变化的模拟尚处在试验阶段。人们期待随着更高速的巨型计算机的使用,更合理的气候物理机制的考虑和更有效的数学方法的运用,气候模式和气候模拟的研究在不远的将来取得突破性进展。

参考文献

- (1) Монин, А. С., 1982, Введение В Теорию Климата, Гидрометеонадат, Ленинград, pp245.
- (2) Berger, A. L. and C. Nicolis (Editors), *New perspectives in Climate Modelling*, Elsevier, Amsterdam, pp403, 84.
- (3) Manabe, S. (Editor), 1986, *Climate Dynamics*, *Advances in Geophysics*, Vol. 28, Academic Press, New York.
- (4) Wadlington., W. M. and G. A. Meehl, *General circulation model experiments on the climatic effects due to a doubling and quadrupling of CO₂ concentration*, *JGR*, Vol. 88, No. C11, 6600—6810, 1985.
- (5) Saltzman B. 1981, *Structural stochastic stability of a simple auto-oscillatory climatic feedback system*, *J. Atmo.Sci.* Vol. 38, 494—503.
- (6) Nicolis, C. 1984, *Self-oscillations and predictability in climate dynamics, periodic forcing and phase locking*, *Tellus, Series A*, 217—227.

Climate Model and Climate simulation

Cao Hongxing

(Academy of Meteorological Science)

The definition, synopsis and development of climate model and simulation is summarized in this paper. The basic feature of several types of model, such as energy equilibrium model, radiative-convective model, general circulation model (GCM), random model and so on, are described. Two examples, i. e. the experiment of atmospheric warming due to increasing CO₂ by using GCM and the study on climatic change and predictability with the mechanism model, is given in order to explain two major approaches of the climate simulation at present.