

* 学科发展 *

大气科学中非线性与复杂性研究的进展

丑纪范*

(北京气象学院 北京 100081)

摘要 文章从众多自由度系统的特定时空尺度大气现象与观测事实密切结合的角度,对大气科学中非线性与复杂性研究的进展进行了评述,依次讨论了从确定论走向不确定、混沌中的有序和全球变化等,并就该领域存在的问题和发展前景进行了探讨。

关键词 大气科学,非线性,复杂性,混沌

1 引言

非线性与复杂性的数学理论多半是低维动力系统,而大气则具有无穷多的自由度。大气科学中非线性与复杂性研究进展的一个重要标志是这些理论和概念运用于众多自由度的程度。

大气运动变化的复杂性在于其具有各种时空尺度,实际观测资料乃是各种时空尺度变化加上噪音的结果。各种时空尺度又不是相互独立无关的,而是存在复杂非线性相互作用,这就提出了一个问题,我们能不能从中抽出一种尺度单独来研究?

对观测到的大气现象作出解释并提出预测方法是理论研究的中心任务,这又提出了一个问题,能不能用理论植根于观测事实的程度和解释观测事实的程度来考虑大气科学中非线性与复杂性研究的进展和问题?

大气科学中非线性与复杂性研究的工作很多,范围很广,下面仅从众多自由度系统的特定时空尺度大气现象与观测事实密切结合的角度进行评述。

2 从确定论出发走向不确定

大气科学的理论是把天气尺度单独抽出来研究而获得突破的,数值天气预报的成功是重要标志。数值天气预报本来是建立在确定论基础上的。大气科学中非线性与复杂性研究的一个重要成果是揭示了天气尺度的可预测时段不超过2—3周。众所周知,Lorenz(1963)在研究

* 中国科学院院士
收稿日期:1997年3月28日

大气对流的简化模型时揭示了确定论系统的内秉随机性。但那是一个只有三个自由度的系统。近年来将混沌的概念引入全球数值天气预报模式,揭示了初始时刻不可避免的误差增长的规律以及它对季节、地区和初始场的依赖等。

针对数值模拟的实际,把对初值敏感导致的可预报性问题做了推广,提出考虑输入数据对最终结果的影响,以及在数值天气预报模式中可能存在的结构不稳定问题。也探讨了其改进的办法。可惜的是未能在实际业务模式中检验。

在可预报时段内,运用非线性动力学理论可以证明运用多时刻资料有可能超过观测(分析)的误差提高初值的准确性,从而提高数值天气预报的技巧。

对天气尺度的非线性与复杂性的研究似乎集中在可预报性问题上。

3 混沌中的有序

既然大气对初值极其敏感,2—3周后,其状态变得不确定,实际上可能同掷骰子一样成了随机的。那么,超出确定性可预报期限之后,难道就完全杂乱无章了吗?50多年前,早期高空天气图的分析就发现了在固定地理区域内特定天气型的持续和再现。后来提出过指数循环、低频振荡的概念,前苏联有自然天气周期和自然天气季节这样的概念。这些表明2—3周以上的时间尺度的演变并非完全是无序的。如考虑副热带流型,则副热带高压的季节突变和与之相联的季风爆发与中断,也可以概括为特定环流型的维持和转换。对月、季乃至年的时间尺度的大气现象的非线性与复杂性的研究集中在认识持续的天气型,解释其维持的机理,探讨其产生和转换的规律。换言之,对这个时间尺度而言,大气中除了有天气尺度的混沌分量之外,还有行星尺度的稳定分量,大气的复杂性就表现在混沌分量与稳定分量之间的非线性作用上。

3.1 依据非线性动力学概念分析实况资料取得了丰硕成果,提出了一些待解释的问题

如:分析了32个冬季500hPa的11525天资料,揭示了遥相关型,其中EOF3呈双峰分布,利用群分析发现找出了众多的静止型并概括为少数的型,对型之间的转换进行了统计分析揭示了其转换规律,分析了37个冬季700hPa实况资料,客观确定出北大西洋区的四个型,定量研究了四个型的转换概率,提出了用相空间中局地密度最大来定义天气型,揭示出明显的双峰型和非对称转换的特点,用多维相空间的均方“距离”来分型。

3.2 对大气系统长期行为的特征进行了全局分析,取得了系统成果

研究超过确定的可预报时段的大气现象的规律也就意味着研究大气系统的长期行为,即对所有可能的初值的解在时间趋于无穷时的极限情况,就必需对大气动力学方程组进行全局分析。近十多年来在这个方向上进行了系统的工作。

(1)揭示出了大气动力学方程组是H空间一个非常特殊的算子方程等。

(2)仅仅利用了算子的性质,得到了系统渐进状态的一些普遍结论,揭示出了耗散和非线性作用对渐近行为的影响。

(3)提出了对大气动力学方程组进行简化或离散化时应遵循的准则。

(4)揭示了大气系统向外源的非线性适应过程,这是一种自组织过程,表明大气环流是一

个耗散结构。

(5)提出了依据实况观测资料或模式的一个现实构造决定大气系统长期行为的支撑吸引子的少数自由度的理论和方法。

(6)对舍入误差进行了全局分析,从而揭示出任何大气数值模式都是有限个胞的集合上的简单胞映射。吸引子乃是由 K 个周期胞组成的周期解。混沌吸引子则是周期解系列的极限轨道,它的周期为无穷。

(7)对观测误差进行了全局分析,从而揭示出当运用实际观测的量做为初值并对实际观测的量进行预报或模拟时,任何大气数值模式都是有限个胞的集合上的广义胞映射,实质上是离散的 Markov 链。敏感初条件使得动力确定论过程变为概率分布的演变过程,这样一来,初始时刻概率分布的微小变化只导致随后概率分布演变的微小变化,这是与敏感初条件不相同的,这就是提供了一个较好的研究气候问题的数学概念和数学工具。

(8)运用上述理论成果给出了“气候”的数学定义及其可预报性的定量研究方法。指出“气候”这个概念是与特定的时间尺度相联系的,而这个时间尺度又非能任意选定的,而是由气候系统 5 个部分的特性客观地从物理上存在的。

上述这些工作指出了解释观测到的种种大气现象的较为完善的途径和方法。这就是为了解释观测到的某种尺度的现象,应从最普遍的大气动力方程组出发,针对该现象起主要作用的物理过程,略去一切可以略去的过程进行简化,但简化后的系统仍然应该是一个强迫耗散的非线性系统,而该系统中反映外在环境的物理量在现实中变化的时间尺度比起所研究的现象要缓慢得多,可以运用准静态近似。然后显示出这样简化的系统,在一定的外在环境下该系统的一个吸引子的状态的时空有序结构与要解释的那个观测到的大气现象相似。这就揭示出了该现象所以发生的内部动力学原因(简化后保留的主要物理过程)和外部环境条件,这才作出了一个比较成功的解释。

对大气普遍方程组所得来的结论是普遍适应的,但解释不了任何具体现象。具体问题要具体研究。近年来主要研究的现象就是上述的超出确定性可预报期限之后的天气型的持续和再现现象。下面就是对这些研究工作的评述。

3.3 逐步深入地探讨了天气型持续和再现的机理,提出了对这种现象的解释

大气系统超出确定论可预报期限之后,进入的是混沌态,混沌中的有序突出地反映在天气型的持续和转换上,这种现象如何解释?近十年来,有一系列的工作研究这个问题。

3.3.1 用低谱模式定常态的吸引子来解释 1979年 Charney 的开创性的工作——解释阻塞高压的成因是用上述的途径和方法来解释大气现象的第一个工作,虽然本身很不完善,但有着划时代的意义。由于对其把大气处理成一个强迫耗散的非线性系统,用这种系统在特定外参数下的自组织行为来解释大气特征没有重视或充分重视,于是在 Charney 这个工作以后,对阻塞的成因的一些著名的研究仍然在绝热无摩擦的框架里进行,或者在线性框架下进行,使人深感遗憾。我国学者则在 Charney 的工作的启发下对副热带高压突变的机理用低谱模式的多平衡态和出现分叉来进行了研究。

3.3.2 揭示了低谱模式的局限性 设计了一个包括大尺度波动和高度不稳定斜压波的简单模式,发现其积分时间平均的两个天气型与没有斜压波的大尺度方程的定常解相去甚远,如将

斜压波的统计作用参数化才可得接近于时间平均的平衡态,提出在天气型的维持中,时变的斜压波起了重要作用;发现随着自由度的增多,在现实的参数领域内多平衡态消失;发现低谱和中等自由度的模式中存在的多平衡态/天气型(其中天气斜压扰动输送维持了这种天气型),在自由度充分增多后消失了,相空间中只有一个混沌态的吸引子,它随外强迫改变;在低谱模式中引入随机扰动可以出现天气型的持续和转换,但模式算得的型的持续时间和型间转换的期望值与实际资料的结果相去甚远。

3.3.3 提出用“Chaotic Itinerancy”来解释天气型和低频振荡 一个新概念是 $|x(t)|$ 小于某一临界值的局地极小点,认为它可以表征准持续的天气型。由于计算机能力的快速发展,可以利用常微分方程的连续和分叉问题的数值计算软件包对大气环流模式进行分叉点和定常解、周期解和拟周期解的计算,并进一步计算这些解的稳定性,由此获得研究混沌中的有序的方法。还可以比较不同截谱得到的结果的差异。对一个两层准地转模式,采用实际地形,在轴对称的辐射加热下的分叉作了计算,发现了一个很有意义的现象,即 $T_9, T_{11}, T_{13}, T_{15}$ 的结果差异很大,但 T_{15} 以上直到 T_{21} 就无明显差异了。这表明对研究某一现象而言,截谱过低固然得不到正确结果,但到一定程度再增高也就没有意义了。对该模式 T_{15} 的240个自由度的分叉解进行了计算,得到了多个准周期解的特征。当参数越过准周期解的失稳值后,系统进入了混沌态,但混沌尚未充分发展,数值积分表明系统是混沌的,对初值敏感,但在诸准周期解之间跳动,呈现出与天气型持续和再现相似的特征。我们曾经说过“大气的大尺度运动实际上处于一个研究得更少的领域,即从层流到湍流的过渡区域,它既不属于层流,也不是充分发展了的湍流,紊乱和不可预报性已经存在,又尚未充分发展,尚处于早期阶段”。

4 全球变化——一个学科交叉的领域

低频振荡和季节突变的时间尺度虽然超过了确定论的可预报期限,但还是年内的时间尺度。如果对这种时间尺度而言,大气的外在环境变化较为缓慢可以视为给定的话,那么,对年际以上的时间尺度的变化,大气就必须看成是气候系统中的一个子系统,不能单独考虑了。年际变化中最强的信号是ENSO,它涉及大气与表层海洋的耦合,海-气耦合模式的模拟结果表明 $20^{\circ}\text{N}-20^{\circ}\text{S}$ 区域初值差异对结果的影响甚小,即使对降水这样敏感的变量。而中高纬则差异较大,混沌影响显著。10年际尺度的变化涉及到深层海洋的温盐环流,最近的研究表明用海-气耦合模式能产生这种10年际的气候变化。观测资料还显示ENSO循环与地球自转速度的变化有相当好的对应关系,理论研究表明应该考虑固-海-气的耦合,给出了海-气耦合模式的非线性适应证明,提供了研究的可能,提出了年际变化复杂性的一种设想。对年际气候变化中初始场与外参量的非线性作用进行了理论分析。这方面工作的继续深入需要跨学科的研究。

5 问题和前景

如果能够通过直接观测来研究系统的一些重要动力学特性,从而大大缩短非线性科学理论和实际应用的距离,使非线性科学理论真正步入实际应用阶段,这自然是非常吸引人的。于

是有相当多的论文运用单变量的时间序列重构相空间来研究大气吸引子的性质,也有不少论文指出了这种方法的局限性和问题。

众所周知,应用(短的和混有噪音的)单变量时间序列研究非线性系统的混沌行为的前景是暗淡的。从反面的角度回顾一下,有那么多论文甚至专著致力于此,实际上是误入歧途,这是值得总结的。大气科学所面临的是旋转力场和重力场中有外源和内耗的斜压流体运动,它除了有一般强迫耗散非线性系统所具有的共同特征外,还有自己独特的规律性。将数学物理的非线性复杂性概念和方法运用于大气科学并非易事,是要下大气力的。大气科学也并非完全被动地应用数学物理的成就,对特殊矛盾的揭示会反过来丰富对普遍性的认识。事实上,正如Thompson说的“分析高度非线性系统总体的统计性质所用的某些最先进的方法是在大气科学的内容里产生并发展起来的。”下一步在大气科学的内容里,通过大气实际观测资料和描述大气的无穷维的偏微分方程研究,揭示流体分叉的空间不均匀性、空间的混沌是一个可能获得重大突破的问题,这方面的成就必将丰富非线性科学本身。

为什么有的年代大气科学发展比较快,有的年代则不然?众所周知,一是取决于大气探测发展的情况,另一是取决于当时数学物理的成就在大气科学中应用的情况。用数学物理方法定量研究大气现象面临两个困难:一是与非绝热加热和摩擦相联系的相互作用过程的复杂性;二是非线性的纯数学困难。采用绝热无摩擦近似就避开了第一个困难,这种近似对于特征尺度为一天左右的大气大尺度(数百公里以上)运动为对象是合适的,有了电子计算机可以求非线性方程的近似数值解。对第二个困难也已有了办法,绝热无摩擦近似下的天气动力学研究的是斜压流体在柯氏力和重力场中的运动规律。正是天气动力学的基础理论研究取得了成果才导致了短、中期数值天气预报的成功。

数值天气预报的成功是大气科学从定性描述发展到定量计算的重要标志。它天天在接受自然界的检验,证实其效果已达到很高的水平。当前的趋势是向两极发展:一是向中、小尺度的灾害性天气的短时预报发展。另一是向行星环流型的中、长期演变乃至气候预测发展。前者大都与强对流的水汽相变相联系,需要考虑潜热释放的作用,后者的时间尺度远大于能量耗散的时间尺度,其共同特点是必须同时考虑耗散、外源强迫和非线性。这种把外源、耗散和非线性三者同时考虑的大气动力学的特点为:借助于几何直观进行全局分析;主要研究极限解集;定性分析与数值计算相辅相成;借助于概率论的语言对渐近行为作统计描述。所谓气候动力学,实质上是强迫耗散的非线性动力学,或者叫混沌动力学,这种动力学还很不成熟,而在其发展完善之前,是不会有令人满意的气候预测理论和方法的,是不会有比较可靠和准确的气候预测的,因此要加强这方面的研究。这方面的前景如何呢?一方面固然取决于对这个基础理论研究重视和经费支持的程度。另一方面也取决于今后的研究工作与观测事实联系的程度和利用巨型计算机进行大规模计算的程度。