

气象界如何看待当前科学界关于 “确定论和随机论”的讨论

——兼论非线性和混沌的研究

刘 式 达

(北京大学地球物理系)

一、引 言

1963年著名气象学家 E. N. Lorenz 发表了题为“确定的非周期流”的文章，内容是从确定的大气运动方程组中算出了非周期的结果。这篇文章当时并没有引起人们的重视，直到 1971 年 Ruelle 将这种非周期流与实践中的湍流现象的发生联系起来，提出了奇怪吸引子 (strange attractor) 和混沌 (chaos) 的概念，Lorenz 的文章才受到重视。之后，很多确定的系统(如微分方程或代数方程)当控制参数变化后，系统的状态都能出现非周期的混乱的现象。更有意思的是，1978 年 Feigenbaum 发现，对于耗散系统(即系统中含有粘性阻尼因子) 这种混沌现象的出现伴随着一个通用无理常数 δ ，它的数值约为 4.6692。这个常数对很多耗散系统都是相同的，故称为 Feigenbaum 常数。由于目前自然界仅发现很少几个无理数 (如 $\pi = 3.1415\cdots, e = 2.7182\cdots$)，因此新的无理数的发现可能预示着科学上重大的突破。目前数学家、物理学家、气象学家、生物学家、化学

家甚至社会科学家都对混沌现象发生极大的兴趣。它已形成一股洪流，正在和分岔 (bifurcation)、突变 (catastrophe)、协同论 (synergetics)、耗散结构学说 (dissipative structure)、分维几何学说 (Fractal) 等迅速溶合在一起，渗透到自然科学的各个领域。由于混沌现象只有在非线性系统中产生，所以凡是研究非线性现象的文章几乎没有不引用 Lorenz 文章的结果。由于 Lorenz 的科学成就，他在 1983 年获瑞典皇家科学院授予的 Crafford 奖。

二、值得深思的一些问题

混沌概念的提出引起广大气象工作者的深思，有哪些新的认识？谢义炳教授提出“今后天气学走向何方？”，Lorenz 提出“长期预告是否可能？”，如何提高认识、更好地揭示复杂的大气运动？下面就一些认识问题谈谈我的粗浅看法。

(一) 确定的系统可以出现混沌的结果
过去“确定论”在我们头脑中占统治地位。一个确定的微分方程，只要给出初始条

件（称为初值问题）就可以有唯一的确定的解。正如拉普拉斯所说：“只要给出初条件，我就可以决定未来的一切”。我们的数值天气预报也是基于这种观点。但是人的认识随着科学的发展不断的深化，统计力学的研究给“确定论”以小小的冲击，它虽然还认为未来是原则上可以预测的，但只是在统计意义上来说的。后来量子力学的研究，得出了“测不准原理”，告诉我们未来的有些量是不能预测的，这就给“确定论”以较大冲击。混沌的发现告诉我们，象大气这样的耗散系统是一个对初条件很敏感的系统，初始条件的微小差别（这是必然存在的！）最终将导致结果的很大差异，甚至变得两种结果毫无关系。换句话说会出现混沌的状态。这是混沌的基本含义。这一发现从整体上冲击了“确定论”，从长期意义上讲，未来是不能预测的。这种“随机论”看法，扩大了我们对事物演变的认识。正象耗散结构的创始人比利时化学家、诺贝尔奖金获得者普利高津所说：“未来并不完全包含在过去之中”。也就是说我们要不断分析事物的变化才能把握事物的演变，这种认识显然是符合“唯物辩证法”的。所谓“长期预报不可能”，恐怕应该从这个意义上理解。这里并不是说未来是不可知的，而只是要不断分析新变化。

我想，混沌的发现从方法、概念、认识上对我们气象工作者都有启发，可以从中吸取有益的东西。认识的深化是无止境的，新的认识必将促进整个气象工作的进展。

（二）耗散系统中新现象的多样性

混沌概念的提出不但给“确定论”以巨大冲击，同时也扩大了我们对事物演化规律的认识。从热力学第二定律知道，一个孤立系统不管其如何变化，最终熵要达到极大，这就是说内部变成均匀无序的状态，这种状态从结构上讲是简单的。对于实际存在的开放耗散系统（即和外界有物质、热量等交换的系统），当系统内部的控制参数变化后常出现无序→有序→混沌的状态演变，也就是说由结

构简单向结构复杂的状态演变。以简单的迭代代数方程

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

为例。当给出 x_0 后就可以算出 x_1, x_2, \dots 其中 μ 为控制参数。计算表明当

$$0 \leq \mu \leq 1 \text{ 时}$$

$x_n \rightarrow 0$ 叫定常解（或不动点）

$$1 \leq \mu \leq 3 \text{ 时}$$

$$x_n \rightarrow 1 - \frac{1}{\mu} \text{ 叫周期 1 解}$$

例如 $\mu = 2$ 时， $x_n \rightarrow 0.5$

$$3 \leq \mu \leq 3.449 \text{ 时}$$

x_n 在两个值上跳动，叫周期 2 解

例如 $\mu = 3.2$ 时， x_n 趋向 $0.513 \rightarrow 0.799$

$$3.449 \leq \mu \leq 3.545 \text{ 时}$$

x_n 在四个值上跳动，叫周期 4 解

例如 $\mu = 3.52$ ， x_n 趋向

$$0.512 \rightarrow 0.879 \rightarrow 0.373 \rightarrow 0.823$$

↑

这样不断周期加倍下去（叫周期倍分岔），直到极限点 $\mu = 3.57$ 时周期变成 ∞ ，因此是非周期解。

这样简单的非线性系统就有多种形态解。一般的非线性耗散系统其运动形态就更多样了，常见的形式有周期解（称为极限环），拟周期解和非周期解（也称奇怪吸引子）。

大气运动形态正是复杂的，长波移动速度时快时慢，时强时弱，走走停停甚至变成阻塞形势。副热带高压维持、北跳和南退，即使是维持也是在作非周期的小摆动。所以要研究几乎无重复性的大气运动，我们必须考虑大气为非线性的开放耗散系统。1963 年 Lorenz 正是利用耗散性找到了由定常状态向周期状态再向湍流状态的过渡，1979 年 Charney 也正是利用大气的耗散性而解释阻塞形势问题。

（三）定性分析和数值试验结合

正因为混沌来自于非线性系统，所以一般求其解析解的表达式是非常困难的，所以

·在上计算机之前须要作定性分析。最常用的定性分析是分析平衡态，即找某些物理量(\cdot)的定常解 $\frac{d(\cdot)}{dt}=0$ ，也就是找它的时间很长以后稳定下来的“归宿”。而对于非线性系统这种平衡态并不是一个，而是多个。状态的演变正是在这多个平衡态之间演变。一个平衡态失去稳定性(从物理上讲这平衡态就观察不到了)而另一平衡态就得到稳定性，这就是所谓分岔。老的平衡态若无法再继续下去，就跳到另一平衡态那里呆住，这就是突变(就象一个小孩原来在滑梯顶上呆住，当别人将其一推，小孩只能滑到下面来一样)。一般由于平衡态的稳定性问题只须解高次代数方程，用分析的或数值的方法都可以求解，这比求原来的非线性系统要容易得多。

有了平衡态和其稳定性的分析，我们在上计算机之前就事先知道控制参数在何值时，系统必将演变到哪种平衡态，这就避免了若不作平衡态定性分析直接去上机计算那种对参数调节的盲目性。

现在普遍有这样一种看法，对耗散系统状态常常由高维的相空间(即状态空间)最终收缩到相对的低维的相空间中去，也就是说系统的宏观行为可以用较少的自由度来描

述，这就给我们定性分析带来了方便。Lorenz 和 Charney 分别只用了三个和六个状态变量来描述有关的大气现象的。

所以气象工作者将定性分析与数值试验结合起来也许是有益的。

三、大气湍流的研究有了新的希望

自 1883 年 Reynold 提出湍流概念以来已经 101 年，由于实验技术及理论的限制，至今湍流研究还很困难，甚至对湍流还没有确切的定义。但是混沌概念的提出告诉我们，象湍流这样的非周期现象可以由确定的系统中产生，这对湍流研究的方法有了新的突破。由于湍流的发生是通过周期倍分岔等途径进行的，且分岔点的参数值和 Feigenbaum 常数有关，所以事先可以预示湍流；这对实验和计算机上模拟湍流都带来方便。

湍流现象不但在流体中有，而且化学、生物、光学、声学甚至固体上都有湍流，所以湍流的研究非常重要，现在很多混沌模型都为湍流发生的实验所证实。

我相信随着湍流和混沌研究的深入，必将促进气象研究工作的进展。

目前气象工作者非常关心非线性和混沌的研究，而且科学界也在讨论之中，我们要密切注意新的动态。