

气候和环境生态系统的动力学问题^{*}

曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

提 要

这是作者在“复杂性科学讨论会”(1991年2月, 北京)和“大气边界层物理和大气化学讨论会”(1991年11月, 北京)上作的报告的提纲, 系统地论述建立“气候和环境生态系统动力学”的各方面问题, 分为10部分, 即(1)为什么要研究气候和环境生态系统的动力学; (2)研究对象、它的复杂性及与其他学科的关系; (3)研究方法和研究课题; (4)建模问题; (5)模式的理性检验; (6)系统的初等性质研究和模式的简化方法; (7)最简化模式的严格分析研究; (8)数值模拟和计算方法研究; (9)资料同化问题; (10)控制和改造自然问题。文中强调必须把描述性的研究上升为具有严格逻辑推理和定量计算的科学, 因此特别注意动力学模式的建立、检验、分析和计算问题, 并指出控制和改造自然的工程乃是复杂巨系统的控制和规划问题。

关键词: 气候; 环境生态; 动力学。

1. 为什么要研究气候和环境生态系统的动力学

在当代, 科学家们投入巨大的力量, 探生命之奥妙, 搜微观细观世界之幽深, 研天体宇宙结构之哲理, 表明今天人类社会的科学技术已经高度发展。然而, 人类的生存和继续发展, 又都与身在其中的气候和环境生态系统息息相关, 而且目前遇到了巨大的自然的挑战, 人们必须研究并回答许多问题, 例如:

- (1) 作年度的气候预测以及工农业产量的年景预测;
- (2) 规划、保护和改善自然环境;
- (3) 重大的或大规模的改造自然工程的可行性及其对自然环境的影响;
- (4) 未来的气候和环境变化趋势预测;
- (5) 地球气候和环境生态系统的历史演化过程;

等等。因此, 世界上亦已开始投入巨大的力量进行研究, 气候和环境生态系统的动力学正在形成。

2. 研究对象、它的复杂性及与其他学科的关系

我们所研究的对象是人类生活于其中的整个宏观自然环境, 包括大气圈、海洋、陆地上一定深度的表层以及生存于其间的动植物群体的自然行为。从广义上说, 气候和生态系统都只是自然环境的一部分(分系统), 然而气候是这整个环境系统中最重要、最活跃的一环, 而生态系统又是最敏感和具有特殊意义的一环, 所以把它们与“环境”并列出来。现在我们就是要把它们作为统一的整体来研究其结构和演变、包括其中各分系统间的相互作用。

1992年3月12日收到。

^{*} 这是作者在“复杂性科学讨论会”(1991年2月, 北京)上作的报告的提纲, 后又在“大气边界层物理和大气化学讨论会”(1991年11月, 北京)上报告过。

地球科学现已分为地质学、地球化学、地理科学、大气科学、海洋科学;并与空间科学、生态学等交叉,它们各自以上述完整统一的一个分系统为研究对象,本身就很复杂;而作为统一的整体,研究其相互作用和整体演变,就更为复杂了。可见,这是复杂的巨系统,是上述各学科的交叉。还有,认识作为物质世界最基础的运动形态的力学、物理、化学等运动形态是认识这样的巨系统的基础,故与数学、物理、化学和技术的不少方面都有密切关系。

应该指出,这巨系统还是开放即非封闭的,它与宇宙空间有物质和能量交换——例如从太阳辐射获得能量又以红外辐射向外输出能量,又与地球深处有物质和能量交换——与地幔和地核没有明显的直接关系,而有时又不能不考虑其相互作用,这些更进一步增加了复杂性。

还需指出,巨复杂系统必定包含有现代科学上所称的复杂性结构和行为。

3. 研究方法和研究课题

气候环境生态系统的空间尺度是全球规模的,要对它进行有效的研究,先决条件有二,即建立全球的有关的观测系统和信息资料的处理、传输分发系统。目前国际有关组织已为此努力,至于对气候和环境生态系统本身的结构和演变过程进行研究,不外乎描述归纳和演绎推理二途,而且必须把描述性的研究上升为具有严格逻辑推理和定量计算的科学。

除观测系统和信息系统的技术研究课题而外,只就动力学研究课题来说,有:

- (1) 模式的建立,有关问题的实验研究以及模式的理性检验;
- (2) 模式的物理数学分析;
- (3) 大规模计算方法研究及数值模拟;
- (4) 信息处理和资料同化问题;
- (5) 控制问题研究。

4. 建模问题

这里所谓动力学(dynamics)是指对系统的动态过程的(数学)理论表达;演变过程(evolution)或发展过程(development)问题则是指该系统状态随时间的变化;而预测问题(prediction)则是指已知初值或过去历史推知以后的状态,或即通过人们已有的知识把具体的演变过程解出来。预测问题在数学上可归结为初值问题或广义初值问题,即

已知系统的状态变量集合 $\{F(\vec{x}, t)\}$ 中之一部分或全体 $\{F_p\}$ 的初值 $\{F_p^{(0)}\} \equiv \{F_p(\vec{x}, 0)\}$ (初值问题)或历史 $\{F_p\}_{t \leq 0}$ (广义初值问题),求解出在 $t > 0$ 时的状态 $\{F(\vec{x}, t)\}$ 。其中 $\vec{x}$ 和 t 分别记空间和时间坐标,而 $\{F\}$ 中除 $\{F_p\}$ 外的部分 $\{F_s\}$ 为非独立状态变量。

所谓建模,无非就是写出描述动力学的方程式来,这就要按物理定律、化学反应规律和生物学过程(物理和化学化了的)写出:

- (1) 各分系统(例如大气、海洋、土壤热、水、物质循环、生态物质循环等)的方程;
- (2) 分系统间(统一系统的内界面)相互作用过程方程;
- (3) 将上述两者耦合起统一系统的完整方程;

(4) 本统一系统的外边界条件方程,即与外界相互作用方程.

各分系统就已相当复杂,它们事实上也是一个复杂的子系统的复合,为使它们的关系更清晰和不遗漏其中的环节起见,在列方程之先,画出逻辑框图(或流程图,关系网图)是十分有帮助的.对于(2),(3)和(4),也是如此.

物理的直观,或人们通过经验已知某种规律,是建模时的重要参数.但当规律并不很明了时,方程越全越少简化越好.此外,为了把已知的物理的和化学的定律推广应用到本系统时,或者推求本系统中某一环节或过程的物理、化学规律时,作实地观测试验或实验室模拟试验往往是必要的.例如方程中含有许多参数(常数)就必须如此定出.

5. 模式的理性检验

模式必须是完备(封闭)的和可解的.由于方程非常多,关系又十分复杂,所建模式是否合乎这个要求?并不是立刻可以回答的.地学各学科不乏其例,过去有些模式并不如此.为此,在建模之后,有必要回答甚至是先回答上述这些问题,即进行一番理性检验,这本身其实也是一大研究课题.

(1) 先进行各分系统的个别理性和实用性检验(这大部分是个分学科的课题);

(2) 对统一的复合系统进行整体性质的检验,验证从整体上说是否服从物理和化学定律,如质量守恒、能量守恒、角动量守恒、熵关系等等;并尽可能由统一的整体性质推出一些分系统的关系,和已知知识比较;

(3) 从数学上证明问题的适定性(可解性),这很难.

6. 系统的初等性质研究和模式的简化方法

模式的物理数学分析乃是对本巨复杂系统进行理论研究的核心部分.这里只谈一些对系统的初等性质的研究方法和模式简化方法.

(1) 特征量和特征参数

由观测或经验或理性考虑可得系统的各个变量 $F_i(\vec{x}, t)$ 的特征量 F_i , 以及其特征空间尺度 L_i 和特征时间尺度 T_i ; 此外通过观测或其他考虑还可以引入一套相应的参考特征量 F_0 , L_0 和 T_0 . 于是可得描写系统结构和行为的一些很基本而又非常重要的(无量纲)特征参数 $f_i = (F_i/F_0)$, $l_i = (L_i/L_0)$ 和 $\tau_i = (T_i/T_0)$. 当然,以 f_i , l_i 和 τ_i 为自变量的任意函数也是特征参数,只要是它有物理意义的话.

(2) 系统的结构和过程的层次和分类

按上述特征参数就可定出结构或层次,例如按 l_i 或 (l_i/l_0) 的大小可以定出某变量 F_i 的空间尺度的相对大小;而按 τ_i 或 (τ_i/τ_0) 的大小可将过程分类为慢过程、快过程,等等,其中 l_0 , τ_0 为某(标准)变量的特征参数.

(3) 摄动法

物理的直观当然是抓住系统的主导变量和过程从而简化模式的最重要方法.然而当经验不足时,用摄动法是非常可靠而且具有优美的数学形式的方法.其实,当将特征量引入方程之后,就得到带有特征参数的无量纲方程,其中一些是小参数,用摄动法就可得到简化的模式,再作逐级近似可计入次要变量和次要过程的影响.

由此得到的方程常可使要预报的变量 $\{F_p\}$ 个数减少,或约束方程的减少或放松,这无论对分析和计算研究都大有好处。或者即使不作简化,对于分析研究和设计计算方案来说同样也都是很有意义的,

(4) 参数化方法

这是简化模式的另一种常用方法。所谓参数化方法就是用一部分变量表示另一部变量,或用已知过程表示尚未认识的过程,而在这些表达式中含有一些常数(参数)。例如用平均场表示脉动场的统计效应,如雷诺应力之类。但是参数化方法必定引入新的假定,它往往是已有经验规律或半理论考虑的推广,这种推广是否成立,是还需要特别检验的。例如,如果平均的尺度过大,则脉动湍流交换系数可以是负的,不同于分子粘性效应。

7. 最简化模式的严格分析研究

为了对系统的主要性质进行研究,利用最简化的(然而确是抓住问题本质的)模式,作严格和尽可能深入详细的数学分析,是十分重要的。也许正是最简化的模式才能应用解析方法进行研究,知其所以然,尽管这类模式是没有实用价值的,即不可能由此得到足够精度的关于实际系统的计算结果。

最早的怪吸引子和混沌模式中的几个恰好是从大气科学和生态模式中提炼出来的,这就是 Lorenz 模式和所谓虫口模式。即使那样极简化的模式,却显示出了前人所未知的非常复杂的现象。但就我们现在要研究的气候和环境生态系统来说,这些模式是过于简单而且只是描写单个分系统的行为,缺乏耦合机制。我们需要建立既简单又能包含有各分系统相互作用的模式,以便作深刻的数学物理解析研究。

8. 数值模拟和计算方法研究

要对如此复杂的真实的巨系统进行定量研究,尤其是按照模式作出预测来,数值模拟似乎是唯一的途径。气候和环境生态系统的数值模拟实际上可以看作是气候数值模拟的拓广,而有关计算方法问题的研究则是计算地球流体力学的外延,且可以借鉴计算数学、计算物理等学科中的成果,而成为后者的一大分支。但由于变量非常之多,过程很复杂,且相互关系并不很清楚,在计算问题中有许多独特的难处,必须发展出有效的方法才可解决。注意力应放在:

- (1) 设计保持原微分方程整体性质和相互作用的计算格式;
- (2) 发展计算具有很多时间尺度的复杂过程的快速分解算法和并行计算法;
- (3) 发展对在空间上具有很不均匀结构的问题的有效算法,例如合适的套网格,自适应网格等;
- (4) 研究“耦合退化”问题(即将各分系统耦合成统一系统来计算时,往往使计算结果的精度有很大降低);
- (5) 研究如何区分物理的混沌现象和计算混沌(零乱)现象,并研究存在物理的混沌现象时预测算法问题。

9. 资料同化问题

现有的以及将来很长时段内,通过观测系统获得的资料,人们只能得到在时空四维

空间中系统的变量的取样集合, 它不是同时的, 不是完全的, 而且精度也是各种各样的. 因此, 利用动力学方法, 再加上其他考虑, 对资料进行同化即插补, 是十分突出和实用的问题. 然而这是一类反问题, 甚至是病态的和不适定的. 它可以化为已知局部解反求初值或边值问题, 即使对象是典型的简单双曲型方程, 它也不是总可以有解的. 因此, 还需研究如何避免不适定, 以及即使在不适应情况补加一些什么条件使之为可解. 与如何避免不适定相似的问题是优化观测系统设计.

10. 控制和改造自然问题

外因可以导致气候和环境生态系统偏离本来的平衡状态和演变过程, 例如太阳辐射、地下热能等的变化, 以及人类活动有意无意地造成对环境的影响等. 对于前者, 人们要求知道其敏感性; 而对于后者, 则要求既要知道敏感性, 同时还有控制问题. 尤其是改造自然工程本身就是控制问题和规划问题. 因此必须研究复杂巨系统的控制或规划问题, 尤其是算法问题. 也许伴随算子的应用是有效的, 问题是必须研究复杂系统的伴随算子的数值生成法, 以及诸如梯度算子的数值生成法等.

Dynamics of Climate – Environment – Ecosystem

Zeng Qingcun

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract

This is an extended abstract of lectures given in the "Scientific Symposium on Complexity" held in Beijing, February 1991, and in the "Symposium on Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry" held in Beijing, November 1991. The lectures aim at the development of systematic theory on dynamics of climate–environment–ecosystem, and are divided into 10 sessions: 1. introduction; 2. the complexity of the object; 3. topics and methods; 4. design of model; 5. the rational (prior) validation of the model; 6. elementary properties of the system and the method of simplification of equations; 7. mathematical analysis of simplified model; 8. numerical method and numerical modelling; 9. problems on data assimilation; and 10. natural engineerings and cybernetics.

Key words: Climate; Environment–ecosystem; Dynamics.