

比] G. 尼科里斯

地球科学中的不可逆现象



地球科学中的不可逆现象 及动力系统分析

[比] C. 尼科里斯
G. 尼科里斯
罗久里
宋永荣
韩渭宾

主编

郭润生 等译
徐叶邦 校



四川大学出版社

地球科学中的不可逆现象 和动态系统分析

[比] C. 尼科里斯 主编
G. 尼科里斯

罗久里 郭润生 等译
宋永燊 徐叶邦
韩渭宾 校

四川大学出版社

1995 年·成都

(川)新登字 014 号

责任编辑:项其祥

封面设计:唐利民

技术设计:项其祥

地球科学中的不可逆现象和
动态系统分析

C. 尼科里斯 G. 尼科里斯 主编

罗久里 郭润生 宋永桑 徐叶邦 等译

韩渭宾 校

四川大学出版社出版发行 (成都市望江路 29 号)

四川省新华书店经销 四川省地矿局测绘队印刷厂印刷

开本 850×1168mm 32 开本 21 印张 4 插页 517 千字

1995 年 6 月第 1 版

1995 年 6 月第 1 次印刷

印数:001—500 册

ISBN 7-5614-1022-O/P·1

定价:30.00 元

中文版序言

向中国科学界公众介绍这本北约高级研讨会论文集是一种极大的荣幸,这次会议致力于探讨非线性动力系统理论及其在地球科学的各种为人们关注的问题中的应用。

地球科学的目的,是研究那些塑造和制约地球及其环境的物理、化学与生物基本过程。从这个意义上来说,地球科学所讨论的是自然界中所遇到的最复杂的系统之一,这是一种受制于大尺度转变、不稳定性及涨落的系统,正是由于这些因素造成了我们周围世界中见到的形形色色的形态,同时也造成了在我们现有知识的基础上对各种事件的进程作出预测面临的种种众所周知的困难。很明显必须有新的概念去描述这些现象。这个集子为了解过去几十年中为迎接这一挑战所设计的种种方法,提供了一条入门之路。

我们很高兴利用这一机会,对中国科学家们在过去年代中对非线性动力学及复杂系统理论所做出的卓越贡献表示敬意,并感谢罗久里博士个人为促进与地球科学有关的不可逆过程及非线性现象研究所作的赞助和不懈的努力。

C. 尼柯里斯, G. 尼柯里斯

1989年11月于布鲁塞尔

英文版序言

1985年7月14—24日在希腊的克里特岛(Crete, Greece)举行了题为“地球科学中的不可逆现象和动力系统分析”的高级研讨会。这次学术活动是由北大西洋公约组织(NATO)、国际索尔维(Solvay)物理和化学研究所及欧洲IBM公司发起,在希腊科学技术部赞助下进行的。应该感谢A. Berger教授,是他首先提出了举行这一研讨会的想法;也要感谢北约科学事务部的L. daCunha博士对该会的关心与合作,还应感谢N. Flytzanis教授,他对这次学术活动的组织工作给予了帮助。

这个集子包括了大部分应邀在这个研讨会上所作的报告,也收入了一些内容与这些报告的主题有直接关系的讨论会的素材。

当我们处理地球科学各分科中遇到的纷繁而复杂的现象时,必然会面临到为数众多的方法和途径。但是,其中的大多数仅对于所讨论的特殊分科具有高度特效性;只有很少一些才具有普适的意义,例如短期天气预报的数值方法及监测地震的手段等等。然而,随着时间的推移人们都见证了一个知识转换的过程,这就使得那些本来局限于一定场所的方法在解决似乎毫不相关的问题中取得了重要的进展。例如,利用碳氧同位素比确定年代的技术几十年前就曾在地质学中引起过革命。或许更出乎预料的是,这反过来又在气候学中激起了重大的反响,使人们可以推算出过去大约 10^6 年中各地质时期的温度或积冰的体积。

这次高级研讨会的主要目的,是敦促地球科学家们意识到另外一种重要的边界学科研究方法,即非线性动力系统理论的存在

及其用途。但是,与同位素确定年代和其它很多类似的例子不同的是,我们的直接目标并非去发展一种新的实验技术,以保证人们能进行更为精确的测量。更确切地说,动力系统理论向人们提供的是洞察物理现象的新方法,它是模型化艺术中具有根本重要性的新概念和新方法的基础,能帮助人们提出种种本来甚至难于表述的问题。动力系统理论的词汇和方法以其巨大的灵活性为特征,可以在形形色色的问题中加以采用,诸如实验室规模的催化反应研究,量子光学、流体动力学不稳定性以及物理学、地质学、大气动力学和气候学中所关注的种种大标尺现象。

我们期望,这个集子将使地球科学研究工作者和高年级大学生熟悉动力系统的概念和方法,成为跃入种种新进展和新观念的起跳点。

C. Nicolis, G. Nicolis
1986年7月于布鲁塞尔

前 言

本书为在欧洲举行的地球科学国际高级研讨会论文汇编,包括动力系统稳定性与分支理论、地球物理流体力学、大气动力学、地质学、地球化学以及低阶模型等内容,涉及到塑造和制约地球及其环境的一切物理、化学与生物的基本过程。这部论文集全面地介绍和阐述了利用非线性动力学及复杂系统理论对地球科学进行探索取得的成就,用崭新的观念描述了形形色色的复杂的地球物理现象,为预测各种地球物理事件的进程提供了借鉴。

本书是一部涉及领域跨度极大、工作量浩繁之译著,由四川大学与四川地震局“地震学中的自组织联合科研组”选题并纳入工作计划,同时邀请成都科技大学等单位专家学者参加。翻译工作由四川大学罗久里教授主持并由成都科技大学郭润生教授与罗久里教授共同负责统稿,译稿完成后由四川地震局韩渭宾研究员进行了审校。本书各部分译文具体分工为:

序言、引论及第一部分:罗久里(四川大学)

第二部分:郭润生、王荣旭(成都科技大学)、李树(成都半导体材料厂)

第三部分:宋永燊、余纯(四川大学)、郭润生(成都科技大学)

第四部分:罗久里、刘冬燕、涂鹏、胡良贵(四川大学);徐叶邦(四川地震局)

第五部分:徐叶邦(四川地震局)

第六部分:罗久里、涂鹏(四川大学)

本书原主编比利时布鲁塞尔自由大学 G. Nicolis 教授及比利时大气空间研究所 C. Nicolis 博士特为中译本作了序言。本书的翻译和出版得到国家地震局的支持,并获得国家地震科学联合基金资助,没有这种支持和资助这部译著是难于完成的。

在本书的翻译和出版过程中,还得到全国地震学界不少专家学者、同志们和朋友们的无私帮助;四川地震局的江在雄老师曾为本书的出版事宜多方联系,四川大学研究生涂鹏、华达银等同志为本书进行了大量的校对工作,在本书出版之际,我们谨对他们的热情支持,对本书的原作者、译者、审校者、编辑者的辛勤工作致以诚挚的谢意。由于时间仓促,对于本书的不足和可能出现的错误,诚恳地希望读者和各界专家批评指正。

出版者

一九九五年二月

引 论

[比利时] 依里亚·普利高津

Ilya Prigogine

Chimie physique

CP 231 Universite Libre de Bruxelles

1050 Bruxelles, Belgique

能在这次讨论动力系统及其在地球物理、大气科学、气候学及地质学中的应用的北约高级研究会上作序论性发言,是一种殊荣。

这个会议的主题正表明,把近年来迸发出的关于动力系统特征的知识,用于探索对了解我们的自然环境有根本重要性的问题,已取得了多么巨大的进步。

这种知识的转换实际上是互惠的。一方面,当用于地球科学、大气科学、生物学及其它领域中种类广泛的课题时,分支理论,奇异吸引子的发现和随机过程的描述中取得的进展已导致了許多深远的后果。可是,反过来几乎不必在这里一提的是,实际上正是大气动力学中不稳定性的研究对近代动力系统研究产生了决定性的影响。对我们大家来说非常幸运的是,洛伦兹(E.N. Lorenz)正在这里参加我们的讨论,他的工作就有着这种决定性的意义。

最使我感到惊讶的是,我们现在已发现了种类多得惊人的可作为动力系统实例的行为特征。为了形象化地表述这种多样性,使用符号动力学的语言可能是很方便的,让我们在相空间中引入

一种分划,因此,一条“轨道”就可用一系列与表示系统状态的点所通过的区域相应的符号来加以表示了。

为了简化起见,假定我们采用了一种两区域分划,并以符号 $\{0,1\}$ 来编码。这样一来任何“轨道”都是由一些0与一些1构成的序列。现在我们可以讨论两种极限情况:以如次序列 $\{0101010101\cdots\}$ 编码的某周期特性;或以型如 $\{01101\ 0001011\cdots\}$ 的序列加以表示的类似随机过程的行为,在该序列中每一阶段符号的“选择”都符合于一柏努利(Bernoulli)过程。这两个例子正相当于福特、依克哈德及韦瓦尔第(Ford, Eckhardt & Vivaldi)对动力过程的分类⁽¹⁾:

——对于算术(A—)积分系统、演化算子足以预测轨道,在任何时刻对应之状态点皆可从设定的初始数据加以计算,达任意精度。这类系统的例子包括一切解析可积系统,如单摆。

——与此相反,柯尔莫戈诺夫(K—)系统的各轨道则表现出如像指数发散之类的复杂特性。其结果,没有一种有限的算法能可靠地计算出相空间点的运动,而比动力学本身更为快捷实用。这类系统包括具有负曲率的表面最短程流,三维空间中的硬球、及平面洛伦兹(Lorentz)气体模型等等。

K—系统比之于A—可积系统重要性的增长,是新的未曾料及到的情况。显然在这里必须有一种新的方法,因为我们还从未处理过一种无限量的信息,相当于相空间中点的定位所需要的无限多位数字的知识。实际上我们已有的知识只相当于一扇有限的窗口,姑且不论它的大小如何。作为一种替换的表述应当宣告,我们具有的知识仅相当于一组格子而不是对各个点的观察。

那么,如何表述经典动力学呢?近年来我们在布鲁塞尔及奥斯汀的研究集体已经大量地卷入了这个问题;在K—流的理论描述方面米斯拉(Misra)、库尔巴格(Courbage)、特拉柏奎(Trapequi)、艾尔史肯斯(Elskens)等人的贡献具有特殊的重要性。简单地说,

我们最近工作的主要结论就是：理想的不可观察的信息之消除导致一种纳入了不可逆性的动力学半群表示法⁽²⁾。

与刘维(Liouville)公式体系对应的常用的群表示法,仅在奇异极限的情况下可重新得到,此时分划格子的大小已变得严格地为零了。这暗含着一种与从经典力学到量子力学过渡的惊人类似性,在那里也仅仅在奇异极限下当普朗克常数 h 趋于零时才能重现经典表示法。

不稳定动力系统理论甚至在像天体动力学这样的作为经典动力学典范的场合也表现出的重要性,正是蓬勃发展的科学革命的特征。威斯托姆(Wisdom)和柏错斯基(Petrosky)⁽³⁾最近关于星状带或星云形成的工作就是一个出色的例证。在这两种情况下一个星体运动的单独预测成为不可能,而必须代之以一种统计描述。量子力学已在微观的层次上引入了概率。现在我们又看到,在似乎是经典科学固有领地的心脏地区也呈现出了随机性及概率性的作用。

参考文献

1 B. Eckhardt, J. Ford and p. Vivaldi, 'Analytically Solvable Dynamical Systems which are not Integrable' *physica* 13D(1984) 339-356.

2 see for instance I. prigogine, *From Being to Becoming*, Freeman, San Francisco 1980.

3 J. Wisdom 'The Origin of the Kirkwood Gap: a Mapping of the Asteroidal Motion near the 3/1 Commensurability', *Astronom. J.*, 87(1982)577-593.

目 录

引 论·····	(1)
----------	-----

第一部分 动力系统、稳定性和分支

非线性系统的分支及随机分析引论·····	(3)
地球物理学中的灾变理论 ·····	(34)

第二部分 地球物理流体力学

水平温度梯度作用下旋转流体的对流性热传递模型:总结·····	(47)
球形系统内的对流 ·····	(59)
“电机”理论 ·····	(82)
非传播孤立子和边缘波·····	(158)
波湍流的通用功率谱:对风波和 $1/f$ 噪声的应用 ·····	(163)
地球物理流体动力学问题中的涨落和耗散现象·····	(170)

第三部分 大气动力学

大气动力学的确定性方面和随机性方面的研究·····	(189)
阻塞转变·····	(214)
大气低频变化的动力学和统计学·····	(232)
行星流状态体制的动力学、统计学和可预测性 ·····	(282)

三维大气波的解析逼近.....	(331)
-----------------	-------

第四部分 气候动力学

气候动力学中的非线性现象.....	(355)
气候的可预测性与动力体系.....	(366)
第四纪气候变化派生的 $\delta^{18}O$ 记录之低阶动力学系统模拟.....	(403)
冰盖动力学与更新世冰期.....	(435)
冰期循环的弛豫振荡模型.....	(459)
全球气候模型中的云-冰-汽反馈	(480)
海冰-海洋相互作用	(506)
海洋环流模型的某些特性.....	(521)
气候变化:从简单的低阶 GCM 获得的结果	(538)
核冬:最近气候模型结果、不确定性及探索需要.....	(547)

第五部分 地质学

地球化学自组织模拟.....	(567)
地质学中的非线性对流问题.....	(589)
反应-渗滤不稳定性	(604)
具有中心点的石圈地貌图样:自由对流现象	(615)

第六部分 结语

低阶模型及其应用.....	(647)
---------------	-------

第一部分 动力系统、 稳定性和分支

非线性系统的分支及随机分析引论

G. Nicolis

Faculté des Sciences

Université Libre de Bruxelles

1050 Bruxelles

Belgique

[摘要] 本文概述了研究有关地球科学中的复杂现象之动力系统*方法。首先,特别着重于不稳定性及分支现象,评述了动力系统理论的基本概念及工具。然后,将理论加以扩充,纳入了内涨落效应及外部随机扰动。最后,对随机噪声与涉及混沌动态特征的复杂行为之间的联系进行了讨论。

1. 引言

探索复杂现象的动力系统方法建立在如次的思想基础上:在采取任何详尽定量描述的尝试之前应先着手于定性的研究,以确定体系演化的总体趋势及潜在可能性之类型。进行该项研究就是分析当控制参量变化时,它们以什么方式影响基本演化方程组之解。这一任务难以完成的重要原因在于,我们所讨论的自然界中的体系一般受到多重约束,并按非线性机制相互作用而演化。这些非

* Dynamic Systems 一词,在本书各章节中将根据具体情况译为“动力系统”或“动态系统”。——译者

线性机制导致的最富戏剧性的后果,是在一定的条件下产生解的多重性,其中的一些解可能代表着以具有非常复杂的时空关系为特征的动态状态体制。如果强行采用数值方法,一般将会漏失这些潜在的可能性,这就是为什么需要定性分析法的根源。

我们将描述该类体系之状态变量 x_i 的变化速率写作如下形式

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, \dots, x_n; \lambda, \mu, \dots); i = 1, \dots, n \quad (1)$$

式中 F_i 表示状态之演化律,而 λ, μ 等则为参变量。下面我们举出一些与地球科学有关的典型范例。

(i) 在全球标尺上的能量衡算模型

在这类模型中,平均温度 T 之演变是当作入射的太阳能与放出的红外能之间的衡算结果来加以研究的:

$$c \frac{dT}{dt} = Q[1 - a(T)] - \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

这里 c 为热容量, Q 为太阳常数, σ 是 stefan 常数, ϵ 是发射率;而 $a(T)$ 则为回照率。由于表面回照率反馈 $a(T)$ 以一种高度非线性形式与温度 T 相关联,从而导致了方程式(2)的多定态解。这类模型在本书 M. Ghil 及 C. Nicolis 论著的章节中将进一步加以讨论。

(ii) 冰球耦合能量衡算

这个例子考虑到了结冰程度对温度的负反馈,以及在某些温度范围内温度 T 对结冰程度 l 的正反馈。其细节将在 C. Nicolis 及 B. Saltyman 论文的章节中讨论,其结论方程为

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= f(T, l) \\ \frac{dl}{dt} &= g(T, l) \end{aligned} \quad (3)$$

导致了自振荡,在气候动态学中有极大的重要性。