

前沿与交叉科学

QIANYANYUJIAOCHAKEXUE

张建树 编著

HUNDUNSHENGWUXUE

# 混沌生物学



书馆

陕西科学技术出版社

前沿与交叉科学

# 混沌生物学

张建树 编著

科学技术出版社

前沿与交叉科学

**混沌生物学**

张建树 编著

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街131号)

新华书店经销 西北大学印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 7.375印张 2插页 14万字

1998年10月第1版 1998年10月第1次印刷

印数：1—1000

ISBN 7-5369-1942-5/N·28

定价：13.00元

# 前沿与交叉科学

## 编辑委员会

主 编 湛晔华

副主编 吴寿镛

编 委 (按姓氏笔画排列)

丁步陶 万迪昉 万积庆 方锦清

王连涛 尹小莹 艾南山 任光耀

刘正国 刘蓉晖 苏世学 李后强

杜振杰 陈 忠 陈一诺 邹珊刚

杨顺楷 庞元正 吴寿镛 金志钧

胡 皓 张培兰 郭治安 曾国屏

黄克谅 黄顺基 章 球

# 前 言



混沌打破了各门学科的壁垒，把思考者从相距甚远的领域带到了一起。现代知识由于混沌的发现而呈现全新的格局。混沌正在改变着整个科学建筑的结构。

混沌是非线性动力学系统特有的一种运动形式，而生物体正是这样的高度非线性系统，所以生物系统多方面呈现混沌性态就是很自然的了。

尽管混沌的发现应归功于美国气象学家洛伦兹，但是混沌理论的兴起还应追溯到生物领域率先提出的简单数学模型。混沌理论研究取得一定进展后，生物学成为除物理学之外的最早应用领域，获得了令人瞩目的成就。近年来，生物学中一些令人迷惑不解的现象从混沌理论中找到了答案。尤其是混沌已向公认的某些医学原理挑战，为一些疾病的防治提出了新的机理和方法。

本书从生态学中最简单的虫口模型谈起，深入浅出地介绍了混沌的产生、基本特征以及在生态学、生物化学、分子生物学、流行病学、脑科学、心脏学等与生物学相关的诸多领域国内外研究成果及新进展，侧重点在生物医学方面的应用，可供从事生物、医学、物理、化学及其他有关专业师生或研究工作

者参考。

本书选题策划和撰写过程中得到了西安交通大学系统科学与社会发展研究所所长温星华教授的悉心指导，陕西省社会科学院李万忍研究员对书稿进行了十分仔细地审阅，在此对他们表示由衷地感谢。在本书编撰过程中还得到了西北大学生物系孙连魁教授的热情帮助。西安医科大学第一临床医学院金辉教授提供和查找资料，并对相关部分进行了审阅。谨在此一并表示诚挚的谢意。

由于时间仓促和水平所限，虽经再三推敲，疏漏甚或错误之处恐亦难免。诚恳希望读者指正。

张建树

1998年7月

# 目 录

---

## 第 1 章 从虫口看混沌

- 1.1 混沌——20 世纪科学的第三次革命 ..... ( 1 )
- 1.2 对初始条件的敏感依赖性 ..... ( 5 )
- 1.3 虫口模型的启示 ..... ( 9 )
- 1.4 虫口模型的进一步讨论 ..... (17)

## 第 2 章 混沌的特征

- 2.1 李雅普诺夫指数 ..... (27)
- 2.2 分岔 ..... (36)
- 2.3 混沌吸引子 ..... (47)
- 2.4 分维 ..... (57)

## 第 3 章 生态学中的混沌

- 3.1 种群消长中的混沌 ..... (69)
- 3.2 时滞种群模型中的混沌 ..... (72)

3.3	捕食者-猎物模型中的混沌	(75)
-----	--------------	------

## 第4章 流行病学中的混沌

4.1	流行病学与混沌	(84)
4.2	某些传染病感染率的简单模型	(87)
4.3	流行病的 SEIR 模型	(93)
4.4	谱分析与相空间重构	(97)
4.5	某些流行病的混沌特性	(100)
4.6	流行病系统的李雅普诺夫指数与分维	(105)

## 第5章 脑和可兴奋细胞的混沌

5.1	神经元及其生理基础	(111)
5.2	脑电混沌态	(114)
5.3	可兴奋细胞的混沌	(123)

## 第6章 心脏节律的混沌

6.1	心电图各波的形成及其意义	(135)
6.2	心室纤维性颤动	(141)
6.3	毕勒-路特模型	(145)
6.4	位相转移函数法研究心脏搏动	(147)
6.5	心律变异的新视角	(156)

## 第 7 章 生物化学中的混沌

- 7.1 受迫布鲁塞尔振子的振荡与混沌 ..... (167)
- 7.2 糖酵解中的混沌 ..... (176)
- 7.3 过氧化酶反应中的混沌 ..... (181)

## 第 8 章 DNA 分子的混沌态

- 8.1 DNA 分子的双螺旋结构 ..... (186)
- 8.2 激光诱导 DNA 分子混沌态的唯象模型 ..... (190)
- 8.3 激光诱导 DNA 分子混沌态的量子模型简介 ..... (193)

## 第 9 章 混沌控制及其应用

- 9.1 混沌控制方法简介 ..... (197)
- 9.2 心脏混沌控制 ..... (202)
- 9.3 脑电信号混沌控制 ..... (205)
- 9.4 混沌及其控制的生物学意义 ..... (208)

### 附录 ..... (212)

- I 非线性微分方程的解及其稳定性 ..... (212)
- II 线性稳定性分析 ..... (215)
- III 奇点分类 ..... (218)

### 参考文献 ..... (223)

# 第 1 章

## 从虫口看混沌

---

### 1.1 混沌——20 世纪科学的第三次革命

混沌 (Chaos), 带着古老传说的神秘和当代科学前沿的探索, 正不胫而走, 引起了越来越多的关注。有的学者甚至宣称, 20 世纪的科学只有三件事将被人们记住, 这就是相对论、量子论和混沌论, 把混沌誉为本世纪科学的第三次革命, 正如一位物理学家所说: “相对论排除了绝对空间和时间的牛顿 (I. Newton) 幻觉; 量子论排除了对可控测量过程的牛顿迷梦; 混沌则排除了拉普拉斯 (P. Laplace) 的可预见性的狂想。” 在这三大革命中, 混沌革命不仅适用于大的宇观天体和小的微观粒子, 而且适用于我们看得见、摸得到的世界, 适用于

## 混沌生物学

和人自己同一尺度的对象,因而是一次范围更为广泛的革命。

混沌研究的进展,正在消除对统一的自然界的决定论和概率论两大对立描述体系间的鸿沟,使复杂系统的理论开始建立在“有限性”这更符合客观实际的基础之上。不言而喻,生物系统也正是这样的复杂系统。

混沌是非线性动力系统所特有的一种运动形式,其理论基础可追溯到 19 世纪末创立的定性理论,但真正得到发展是在本世纪 70 年代以后,尤其是 80 年代以后,混沌的研究有如星星之火,渐成燎原之势。

早在 20 世纪初的 1903 年,法国数学家庞加莱(J. H. Poincare)从动力系统和拓扑学的全局思想出发,指出可能存在混沌特性,从而成为世界上最先了解存在混沌可能性的人。1954 年,前苏联概率论大师柯尔莫哥洛夫(A. N. Kolmogorov)在探索概率论起源过程中注意到了哈密顿(Hamilton)函数中微小变化时条件周期运动的保持,该思想为如下结论奠定了基础:不仅耗散系统有混沌,而且保守系统也有混沌。1960 年前后,柯尔莫哥洛夫与阿诺尔德(V. I. Arnold)及莫塞(J. Moser)深入研究了哈密顿系统中运动稳定性,得出了著名的 KAM 定理(以三人名字的首字母命名)。该定理为揭示哈密顿系统中 KAM 环面的破坏以及混沌运动奠定了基础。1963 年,美国气象学家洛伦兹(E. Lorenz)在《大气科学》杂志上发表了“决定性的非周期流”一文,指出在气候不能精确重演与长期天气预报者无能为力之间必然存在着一种联系,这就是非周期性

与不可预见性之间的联系。他还认为一串事件可能有一个临界点,在这一点上,小的变化可以放大为大的变化。这些研究清楚地描述了“对初始条件的敏感依赖性”这一混沌的基本性质。这就是所谓著名的“蝴蝶效应”,它来自洛伦兹一次科学演讲,“一只蝴蝶在巴西扇动翅膀,可能会在得克萨斯引起一场龙卷风。”然而,混沌却意味着这种临界点比比皆是。它们无孔不入,无时不在。在天气这样的系统中,对初始条件的敏感性乃是各种大小尺度的运动互相纠缠所不能逃避的后果。

1975年中国学者李天岩和美国数学家约克(J. Yorke)发表了“周期3蕴含混沌”的著名论文,被认为是混沌的第一次正式表述。Chaos一词也自此正式使用。后来,李天岩和约克的工作在许多方面得到了推广,如有人指出“周期 $\neq 2$ 蕴含混沌”。

混沌学的兴盛,应逆溯到生物学。生物、生态学领域中的问题是复杂的,若用线性方法来解决,只能靠增加变量来应付复杂性。科学家们试图采用新的方法——简单的非线性数学模型来克服困难。那些卓有贡献的代表人物应属澳洲出生的美国天才科学家梅(R. May)。梅在物理、数学方面功底深厚,且青春年华时已小有名气,他本可以在上述领域,轻取一席之地,但当时萌发于生物学领域内的混沌学所独有的洞察力使之着迷而叹服,他毅然放弃了自己的专长,在生物学中另辟蹊径。由于他的天赋,加上他多学科的坚实根底,改行后短短的数年后,他又成为生物、生态、医学领域中混沌理论的重要代表。1976年梅在《自然》杂志上发表了“具有

## 混沌生物学

极复杂的动力学的简单数学模型”一文，它向人们表明了混沌理论的惊人信息：简单的确定论数学模型竟然也可以产生看似随机的行为。

1977年，第一次国际混沌会议在意大利召开，标志着混沌科学的诞生。1978年，美国物理学家费根鲍姆(M. J. Feigenbaum)在《统计物理学杂志》上发表了关于普适性的论文“一类非线性变换的定量的普适性”，轰动了世界。正是普适性的研究使混沌科学确定起自己坚固的地位。

进入80年代，混沌科学又得到进一步发展。1980年，波兰出生的美国数学家曼德尔布罗特(B. B. Mandelbrot)用计算机绘制了第一张以他名字命名的曼德尔布罗特集图像。这是一张五彩缤纷、绚丽无比的混沌图像。此后，又有一些科学家也投入到分形流域的边界研究中，作出了精美绝伦的混沌图像，使混沌图像成为精致的艺术品，拓展了混沌科学的一个重要应用领域。曼德尔布罗特于1982年出版了《大自然的分形几何》，被誉为分形几何的宣言书，使分形迈入科学之林，也为混沌的描述提供了工具。因而分形几何又有“混沌几何学”的美名。

1983年加拿大物理学家葛拉斯(L. Glass)发表了著名论文“计算奇异吸引子的奇异程度”，掀起了计算时间序列的热潮。1986年中国科学家徐京华在世界上第一个提出了三种神经细胞的复合网络，并证明它存在混沌。

到了90年代，混沌科学与其他科学互相渗透。混沌

打破了各门学科的界限。由于它是关于系统整体性质的科学，它把思考者们从相距甚远的各个领域带到了一起。曾经一度科学陷入专业化越来越细的危机。由于混沌，专业化的过程戏剧性的倒过来了。前不久国家将高校开设的专业进行大刀阔斧的调整，拓宽专业面，就足以说明这一点。

混沌研究得以迅速发展，实应归功于计算机技术的日新月异。近十多年来，大容量高速度计算机，特别是计算机绘图技术的应用，是混沌赖以发展的重要基础。借助逼真的电脑模拟和电视技术，人们已能通过屏幕观察到一个系统动态的演进与复杂的混沌效应。惊喜之后，人们开始将许多以往捉摸不定的现象，试图用混沌效应予以解释，所涉及的领域从生物、生态、医学、物理、化学、天文到经济等，甚至将触角伸进了艺术与思想的范畴。而混沌应用方面发展最快的领域还属生物和医学领域。尤其是对混沌控制的研究，使90年代的混沌研究进入了一个新的历史时期。

### 1.2 对初始条件的敏感依赖性

系统的长期行为对初始条件的敏感依赖性混沌运动的本质特征。如前所述，这也就是人们当今常说的所谓“蝴蝶效应”。我们中国人常说“差之毫厘，失之千里”，讲的也是这个道理。在西方，控制论的创立者维纳(N. Wiener)引用过一首民谣对这种情况作了特别生动的描述：

钉子缺，蹄铁卸；  
蹄铁卸，战马蹶；  
战马蹶，骑士绝；  
骑士绝，战事折；  
战士折，国家灭。

马蹄铁上缺了根钉子本是一件微不足道的事，但经过逐级放大后，竟然导致了整个国家的灭亡这种灾难性的后果。蝴蝶效应这个形象的比喻把对初始条件的敏感依赖性这一概念讲得活龙活现，惟妙惟肖，入木三分。

在牛顿的旗帜下前进的科学家们，事实上还挥动着另外一面旗帜，上面写道：只要近似地知道了一个系统的初始条件和理解了自然定律，就可以计算系统的近似行为。这一假定其实存在于科学的哲学核心里，就像一位理论家喜欢对学生们讲的“西方科学的基本思想是，当你试图解释地球表面一张台球桌上的运动时，完全不必考虑另一个星系里某个行星上一片树叶的飘落。极小的影响是可以忽略的。事物的行为方式有一种收敛性，任意小的影响是不会放大成为任意大的效果的。”从经典科学的角度讲，近似和收敛的信念是很有根据的，它确曾起过作用。1910年确定哈雷彗星位置的小误差，只会对预言它1986年的回归产生小小的误差。对于今后几百万年，这一误差也永远是小的。计算机为宇宙导航也遵守同一假定，近似准确的输入导致近似准确的输出。全球天气预报的先驱者们也是这样做的。

众所周知，动力学系统的行为或运动轨道决定于两个因素：一个是系统的运行演化规律，在数学上就是动

力学方程；另一个就是系统现在的状态，数学上称为初始条件。一个确定性系统在给定了运动方程之后，如果满足利普希茨（Lipschitz）条件，则根据“存在唯一性”定理，轨道唯一地取决于初始条件。通过一个初值有且只有一条轨道。这就是系统行为或轨道对初值的依赖性。按照经典力学观点，轨道对初值的依赖是不敏感的。就是说，从两个相邻近的初值引出的两条轨道始终相互接近，彼此在空间偕游并行。设  $f(x_0)$  代表从初值  $x_0$  出发的轨道， $\Delta x$  记初值的一个小改变量，对应的轨道为  $f(x_0 + \Delta x)$ ，那么只要  $\Delta x$  足够小，两条轨道的偏离  $|f(x_0) - f(x_0 + \Delta x)|$  也将足够小。这叫做初值的小改变引起轨道的小偏离。这也是微分学思想的核心，它主导了科学思维达 300 年之久，可以严格证明，一切线性系统对初值的依赖都是不敏感的，某些非线性系统也具有这种特性。长期以来，人们实际上默认一切确定性系统都是不敏感地依赖于初值的。

但是，混沌研究改变了这一观点。处在混沌状态的系统，运动轨道将敏感地依赖于初始条件。从两个极邻近的初值出发的两条轨道，在短时间内似乎差距不大，但在足够长的时间以后，必然呈现出显著的差别来。当然这里所说的时间足够长在不同的系统有所不同，彼此的差别可能很大。从长期行为看，初值的小改变在运动过程中不断被放大，导致轨道发生巨大的偏差，以至在相空间中的距离要多远就有多远（自然不能超出相空间许可的尺度范围）。这就是系统长期行为对初值的敏感依赖性。

## 混沌生物学

我们还是来看看人们誉为混沌之父的洛伦兹 1961 年冬天一个具有历史意义的计算机实验吧。那个时代的计算机，用现代的眼光来看，自然是简陋而笨重的。在他计算机的存储器中，每个数保持 6 位 10 进制，例如 0.506127。输出时为了节约空间，只打印 3 位：0.506。洛伦兹输入的是这些较短的经过四舍五入的数字，他假定这  $1/1000$  的误差不会有什么影响。这是个合理的假定。如果气象卫星能以  $1/1000$  的精确度测定洋面的温度，操作人员就会认为运气不错了。洛伦兹把天气简化为一组决定性方程，用计算机进行数值求解。给出一个特定的起点，天气每一次都应当准确地按同一种方式发展。给出一个稍有不同的起点，天气的发展也应稍有不同。比如说，小小的数值不过相当于一阵小风，自然会自行消失或互相抵消，而不致改变任何重要的大范围的

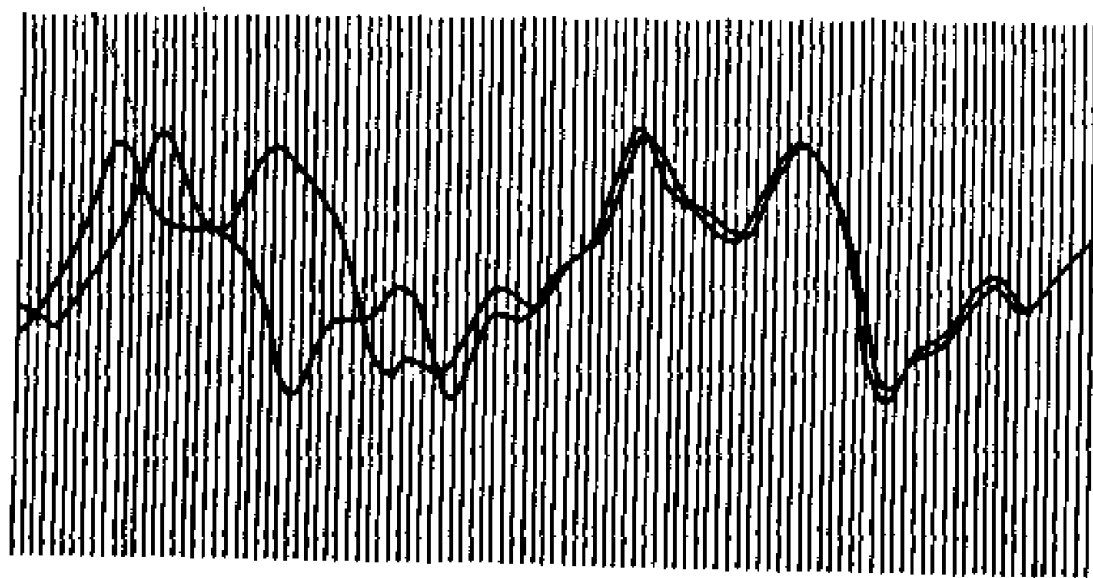


图 1.1 两组天气模式是怎样分道扬镳的  
(此图取自洛伦兹 1961 年的打印结果)