

黄 樨 著

生命能量系统的动力学 基本原理及混沌机制



$$\frac{du_i}{dt} = -A_i u_i^2 + B_i u_i + \sum_{i \neq j}^n (C_{ij} - D_{ij} u_i) u_j - \Phi_i$$

($i, j=1, 2, \dots, n$)

东 北 林 业 大 学 出 版 社

生命能量系统的 动力学基本原理及混沌机制

黄 樾 著

东北林业大学出版社

内 容 提 要

能量是所有生命活动的共有属性。长期以来,人们对能量活动及特性已有深入的了解,可以认为,任何生命活动都是某一种能量活动的外在形式,故能量在被用于描述生命活动过程中可充当各种不同的生命运动物质的一般等价物。本书选择能量作为状态变量,以此将整个生命系统中各组分的活动及相互关系系统一起来,进而描述生命系统的动态行为、内在联系和混沌机制,以期读者能借助于生命系统能量活动的动力学规律,去理解生命系统各种动态过程与行为的内部机制。

本书可作为生命科学、生物数学及有关学科研究者的参考资料。

生命能量系统的 动力学基本原理及混沌机制

Shengming Nengliang Xitong De
Donglixue Jiben Yuanli Ji Hundun Jizhi

黄 樾 著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

东北林业大学印刷厂印刷

开本 850×1 168/32 印张 6 字数 150 千字

1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81008-840-8
N·4 定价:14.00 元

序

能量交换是生命系统赖以生存的基础,生命系统中存在着大量的动力学性质,近年来经过众多学者的研究已是十分明显。因此物理学中的两个基础——动力学性质与能量交换也成为了生命科学中的重要规律。然而生命科学远远比物理学复杂,有更多的有序性,也有更复杂的随机性。《生命能量系统的动力学基本原理与混沌机制》一书以生命科学中的大系统性、能量交换动力学机制和复杂性为基础建立数学模型,应用近代数学方法以及计算机工具开展生命科学的研究,这无疑是一个新颖的、探索性的工作,目前在国内外尚未见到类似的研究。

力学和物理学的发展都是先从物体相互作用动力学开始而进入系统科学的理论,生物学的研究发展也经历着类似的发展过程,所以可以说这是一个自然的发展过程。

作为种群动力学来说,最简单的模型就是 Lotka - Volterra 模型。其建模的思想就是把种群看成是物理学中相互作用的物体,然后按照物理学中相互作用的动力学思想建立种群相互作用的模型。本书作者则把所研究的所有生命实体看成是同在一个系统内的一个元素,把各元素之间的相互作用则看成是系统内部的能量流动,用系统论、能量流的方法建立所研究生命系统能量流的数学模型。无疑,这种作法是符合科学发展规律的,是可行的,而且也是先进的。也许这种方法可以把种群生态、系统生态、能量生态的数学模型统一起来,这样看来其发展前途是乐观的。

本书作者在能量系统建模的基础上又研究了这类模型的非线性动力学性质,这个研究是有益的,计算与理论方法是正确的。

本书涉及面很广,可见作者所掌握的基础知识是十分宽广的。

这里包括种群生态学、数学生态学、系统生态学、能量生态学以及数学、物理学中的一些近代问题及近代方法,足见作者有扎实的理论基础。

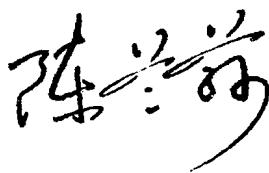
作者的能量动力学模型与经典的 Lotka - Volterra 模型比较,可以看出有许多优越之处。例如 Lotka - Volterra 模型要精确化,还要考虑种群的年龄结构,这样的模型十分复杂,而作者的能量模型就不需要考虑年龄区别。但从另一方面来说,能量模型中的变量是能量,不像 Lotka - Volterra 模型中的变量是种群密度那样容易测量。

总的说来,全文计算和论证是正确的,中心思想是有创见的,所提出的方法和讨论的问题的结论是有意义的,有理论价值,也有应用前景。我们为本书作者黄樛博士取得的成就表示祝贺,并希望他通过坚持不懈的努力,将这个模型的理论研究和推广应用工作继续下去,使这项研究发展成为一门完整、成熟的学科。

中国科学院数学研究所研究员

基础数学 博士导师

《生物数学学报》主编



1997 年 4 月 10 日

前 言

随着生命科学研究的深入,人们已不再满足于用文字模型来表述、讨论、研究和预测生命活动的各种状态和动态行为。事实上,仅仅依靠文字表述的定性研究方式已难以承担探索生命活动动力系统的各种动态行为与复杂现象的重任,而这些动态行为和复杂现象恰恰显示了生命过程丰富的内涵和在更高层次上探索生命本质的广阔领域。然而对于描述一个复杂的生命系统,没有一个有力的数学模型是无法实现的。

能量是任何活动的内在依据,每一生命运动都伴随着相应的能量活动,或者说每一生命运动都是某种类型能量活动的外在形式。因此通过研究生命过程中能量活动的规律便能从一个侧面揭示生命活动中的内在联系和本质,从而为测量、估计、预测、评价和控制生命活动提供准确的依据。

本书的第一部分介绍了生命能量系统的动力学基本原理。在热力学第一定律的基础上,经过严密的数学推导,建立了一个普适的、描述生命系统能量活动规律的动力学模型——生命能量系统,其一般形式可以表达为:

$$\frac{du_i}{dt} = -A_i u_i^2 + B_i u_i + \sum_{j \neq i}^n (C_{ij} - D_{ij} u_i) u_j - \varphi_i, \quad (i \in n, j \in n). \quad (1)$$

式中: u_i 表示对于包含有 n 个组分的能量系统中第 i 个组分的能量; A_i, B_i, C_{ij} 和 D_{ij} 为方程的特征参数,它们由组分 i 的能量容量和能量交换能力所决定; φ_i 为组分 i 的能量消耗率。公式右边第一部分 $(-A_i u_i^2 + B_i u_i)$ 表示组分 i 与系统外环境交换的能流,第二部分 $\sum_{j \neq i}^n (C_{ij} - D_{ij} u_i) u_j$ 代表组分 i 与系统内其它组分交换的能

流,第三部分为组分 i 的能量消耗率 φ_i 。

在一定条件下, (1)式用于解释某些生命活动的动力学过程与经典的 Lotka - Volterra 模型以及 Logistic 模型图再取得较好的相似或吻合,而在另一些条件下,它们之间存在着明显的区别,由此向传统的经验模型提出了挑战。

本书第五章讨论了系统内各组分之间的相互联系,从(1)式推导出了由组分的能量交换关系的组合不同而形成几种不同格局的能量结构。组分之间通过交换能量建立联系,因其特征参数不同则联系的方式可能也不同;组分间各种不同关联形式的组合还可产生多种生命活动形态。本书通过数学分析的方法将其进行分类并赋予其生物学意义的解释。

第六章讨论了能量系统稳定性和能量结构稳定性的生物学意义和条件,指出了数学上的稳定性和生命能量系统的稳定性及其结构稳定性的相同及相异之处,说明了在某些条件下系统应该保持稳定,而在另一些条件下系统则应积极地对系统内外条件的变化做出响应。这些响应保护了生命系统的生存、延续与生长,并对系统关于生存条件变化所做出的调整、恢复、适应和变异等功能性反应原理与形式做出了初步的设想。

生命能量系统是一个有机的统一整体。在受到各种由涨落引起的能量变化时,整个系统将做出什么样的响应,第七章给出了系统对涨落响应的解释。

第八、九、十章是生命能量系统理论在生理生态、种群生态和生态工程的初步应用。第八章中根据能量方程的推导过程,提出了特征参数在理论分析中的几种取值形式,并通过生态因子对植物生理影响的分析说明,有时用理论方法来求取特征参数是不可能的。然而,引入自动控制理论中的一些参数辨识方法来处理实验数据,可以得到特定条件下的特征参数。第九章讨论了如何应用能量模型分析种群生态学中的几种典型形式,并对前人所做的

工作提出了不同的看法。第十章介绍了将能量模型引入生态工程作为评价、预测、研究和决策的依据的设想,提出了变量能量化的概念。

本书第二部分是关于生命能量系统混沌机制的专题讨论。

生命能量系统作为一个非线性系统,混沌是它的重要属性之一,而混沌的发生对生命活动究竟存在什么意义?它只有在什么样的条件下才能发生?它的特征是什么?等等,都是我们感兴趣的事。

在生命科学领域中,混沌现象的研究方式与生命科学本身的研究方式是密切相关的,传统的生命科学研究方式必然地引导着混沌研究主要地依赖于生命系统外部活动的数据和特征。而要更为深刻地揭示混沌的内在机制,强有力的机理型数学模型是必不可少的。生命能量系统的理论为生命系统的混沌研究提供了一种研究手段,同其它机理型模型一样,它揭示了混沌同系统的平庸行为一样是生命系统的属性,不过是表现的形式和条件不同而已。因此在第八章讨论种群生态动力学行为的基础之上,通过调整参数使模型的平庸行为转变为非平庸行为,说明了混沌特性产生于非线性系统内与外界无关的动力学机制。

当代混沌动力学研究为能量模型的混沌研究提供了有力的工具,符号动力学与梅尔尼科夫(Melnikov)方法就是其中两种。符号动力学以其简单和“粗粒化”的优点,抓住了能量系统中混沌发生的本质规律进行分析,而梅尔尼科夫方法则专门研究能量系统在受到扰动后产生混沌的机制。本书简要介绍了如何运用两种方法研究生命能量系统中的混沌并列出了简短的实例。

本研究是一个探索性的工作。限于作者的水平,缺点与疏漏在所难免。由于时间所限,很多有意义的论题在文中仅一笔带过,还有些萌芽状的设想却因涉及更高深的知识而未展开讨论;而有些文中已讨论的问题还可以进一步挖掘,讨论得更深更细,……。

这些都说明今后要做的工作还很多,还有许多知识需要学习和巩固。同时也需要各种见仁见智的建议和批评,集众思,广忠益。恳请有识之士不吝指教。

目 录

第一篇 生命能量系统的动力学基本原理

1 绪论	1
1.1 引语	1
1.2 建立生命科学数学模型是生命科学研究发展的 必然趋势	3
1.3 生命科学动力学模型的现状与简评	4
1.4 生命能量系统的基本概念	9
2 生命能量系统研究的方法论问题	12
2.1 能量方程:描述生命活动的依据	13
2.1.1 数学形式	13
2.1.2 选择状态变量	15
2.1.3 能量模型:高度归纳的动态特性描述	16
2.2 支配原理:达到“随机论”与“决定论”的统一	18
2.3 有序阶段性:自组织结构进化的外在表现形式	21
2.4 对生命活动复杂性的理解	23
3 理论背景	25
3.1 能量及能量系统的一般概念	25
3.1.1 能量	25
3.1.2 能量系统	27
3.2 系统科学与自组织理论	29
3.2.1 耗散结构理论(Theory of Dissipative Structure)	

.....	30
3.2.2 协同学(Synergetics)	31
3.2.3 重正化群(Renormal Group)	32
3.3 生物动力系统与混沌动力系统.....	33
4 基本方程的建立及其生物学涵义的讨论.....	35
4.1 两个基本概念.....	35
4.1.1 能量空间和生命能量系统.....	35
4.1.2 能量生长的阶段性.....	36
4.2 能量生长过程分析.....	37
4.3 问题讨论.....	41
4.3.1 方程的生物学涵义.....	41
4.3.2 能量与几种生物学、生态学模型中状态变量的关系	42
4.3.3 生长阶段性和两个线性抑制因子的生物学诠释	43
4.3.4 能量方程与经典方程的一般比较.....	46
4.4 能量方程的耗散形式.....	46
5 生命能量系统的结构分析.....	49
5.1 一般概念.....	49
5.2 能量系统的静态配置.....	51
5.2.1 非依存型.....	52
5.2.2 依存型.....	52
5.2.3 配置分析.....	53
5.3 奇点——组分之间的关联形式分析.....	57
5.3.1 非依存关系的二元形式.....	57
5.3.2 依存关系的二元形式.....	61
5.3.3 依存关系的三元形式.....	64
6 生命能量系统的稳定性及功能性反应.....	65

6.1	能量系统稳定性的一般分析	66
6.2	能量系统的结构稳定性研究	69
6.3	功能性反应原理及形式	72
6.3.1	功能性反应原理	72
6.3.2	功能性反应形式	75
7	生命能量系统的涨落响应机制	77
7.1	组分 M_i 对系统的影响	78
7.2	系统内其它组分对组分 M_i 的影响	80
7.3	关于能量特征参数变化的影响	84
7.4	能量系统涨落响应综述	85
8	应用实例(1):从植物生理生态的数据分析看能量模型特征参数的测定	88
8.1	特征参数的理论分析	89
8.2	能量生长动态过程的实验数据拟合	91
8.2.1	实验数据的离散性和随机性分析	91
8.2.2	根据实验数据求取特征参数的一般方法	94
8.3	多元能量系统的参数辨识	98
9	应用实例(2):生命能量系统模型在种群生态学研究中的初步应用	104
9.1	概述	104
9.2	两种群能量模型	107
9.2.1	依存型(以捕食关系为例)	107
9.2.2	非依存型	112
9.3	三种群能量模型	115
10	应用实例(3):生态系统工程的理论与方法	120
10.1	研究方法	121
10.2	农业生态系统中的能量关系	126

第二篇 生命能量系统的混沌机制初探

11 有关生命科学的混沌概念评述·····	133
11.1 混沌的基本概念·····	133
11.1.1 确定论系统的内在随机性·····	135
11.1.2 对初值的敏感依赖性·····	135
11.1.3 混沌序·····	135
11.2 混沌的探索创立了新的思维方式·····	137
11.3 混沌对生命科学研究的影响及我们的研究方法·····	139
12 生命能量系统的混沌生态模型·····	142
12.1 概述·····	142
12.2 一维能量模型的复杂行为·····	142
12.3 二维能量模型的复杂行为·····	145
12.3.1 带时滞的捕食模型·····	147
12.3.2 混沌状态的竞争模型·····	150
12.4 三维能量模型的混沌现象·····	151
12.5 结论·····	154
13 生命能量系统中混沌的理论分析方法述要·····	155
13.1 能量模型的符号动力系统·····	156
13.1.1 符号动力系统的基本概念·····	156
13.1.2 一维能量系统的符号分析法简介·····	158
13.2 能量系统的 Melnikov 分析法·····	161
13.2.1 Melnikov 方法的基本概念·····	162
13.2.2 Melnikov 方法对能量系统的分析·····	165
参考文献·····	169
后记·····	174

1 绪 论

1.1 引 语

19 世纪下半叶到 20 世纪初,在物理学界爆发了一场革命,热力学、电磁理论及原子物理学等学科得到突飞猛进的发展,出现了诸如量子力学、相对论、耗散结构理论等这样一些意义深刻、影响巨大的科学理论,这不仅推动了物理学的长足发展,也波及到了其它领域,带动了许多应用学科的发展。它们成功的一个重要因素就是建立了切实可行的数学模型。生命科学领域是与人类活动和生存最密切相关的领域,长期以来,人们对这个领域进行着不懈而又艰难的探索。每当受到其它领域革命的冲击时,人们都试图把这种冲击化为掀起生命科学革命的动力,从 I. 牛顿的机械力学开始一直到 I. 普利高津的耗散结构、H. 哈肯的协同学都在不同程度上推动了生命科学模型的建立,从 G. T. 孟德尔的数量遗传学到如今到处可见的“生物力学”、“量子生物学”等新生的交叉学科,都是这种尝试的见证。

然而生命现象作为一个构造复杂的有机组织的且与环境密切相关的动态行为,其活动规律是无法用一个或几个简单的物理或化学的动态过程来表达的。因此根据各种物理原理、化学原理建立起来的数学模型显示出了很大的局限性,无法实现描述生命活动的目的。纵观生命发展史,横览物种多样性,人们强烈地感受到,对生命这个神秘的概念,既熟悉得妇孺皆知,又让人难于理解:是什么神奇的力量使这千姿百态的芸芸众生出现在世界上? 于是

人们想到了“上帝”(有些书中称之为“造物主”),只有他才如此法力无边。而要透过各种纷繁的表象认清生命的真实面貌,却无异于登天。久而久之,人们在研究生命活动时,权宜地放弃了建立普适型模型的企图,转而就事论事地解释一些局部现象。这些局部现象的研究,应视为在为建立普适型模型所做的前期工作。

“不谋万世者,不足谋一时;不谋全局者,不足谋一域。”人们在做局部研究工作的同时,并未忘记自己的最终使命,这些分散的研究最终必须结合起来,才能构成整个生命活动的全貌,才能最终解释生命的内涵,从而推动各个局部领域的研究。然而近代非线性科学从理论上揭示,生命活动并非各个局部现象的简单加合。怎样重构生命活动?各种现象的组合仍有其极复杂的规律,而这些规律又与其它科学领域内的某些规律相暗合。

20 世纪后半叶,一个新的学术思潮席卷而来,系统科学、控制论、信息论(俗称老三论)及所谓自组织理论(耗散结构、协同学、超循环论、突变论),给人们带来了重新认识世界的感觉;而非线性科学与混沌动力学却揭示了人们所沾沾自喜的那些知识和成就实际是在坐井观天!世界其实是非线性的,恰如在宏观和微观存在着牛顿力学的禁区一样,混沌也界定了线性系统不可逾越的鸿沟。

这个思潮让人们耳目一新!

这个思潮让人们重新思考……

系统,自组织,协同,非线性,这些不正是生命科学的重要特征吗?这些理论中提出了很多重要的概念不又都是建立生命系统模型的重要前提吗?“将复杂系统的自组织过程的理论应用于生物体中,是十分令人感兴趣的……。生物的另一个显著特点是竞争,这在合成、生长以及生命维持过程中都是普遍存在的,这些复杂的生命图像,能否从理论上加以处理,即使是作一些简单化的描述,对于生命科学的发展都是有意义的。”(黄润荣、任光耀,1988)。新的学术思潮向人们展示了一派广阔的发展前景,激励着人们冲出

线性思维的囿闭,去思考,去探索。

“欲穷千里目,更上一层楼。”借助于新学术思潮,人们原来的视野为之改观,看到了生命活动更深刻、更本质的规律,从而能理解、解释和描述那些从前不解、误解甚至望而却步的现象。经历了艰难的攀登,终于踏上光明的坦途,广阔的前景召唤着有志于探索生命奥秘的科技工作者们新的征途上各显神通,竞逐风流。

1.2 建立生命科学数学模型是生命科学研究发展的必然趋势

近代生命科学研究的一个显著特征,就是由定性描述阶段转入定量与实验研究。数学生态学(Mathematical Ecology)就是根据数学的原理和方法来分析和解释生态学中各种现象以及数量资料的学科,它是生态学在发展过程中逐渐与数学相结合,特别是近几十年来,由于电子计算机的广泛应用,促进了各种数学分析方法的广泛应用而形成的。德国生物统计学家 B. S. Goh(1970)说:“生物学由于应用了数学,获得了第二次生命。”

数学的力量在于提供一种能表达思想特别是极其复杂关系符号逻辑的能力,同时又保持了表达式的简明性,从而使数学成为自然科学各分支的基础,而在生物学领域众多的分支学科中,生态学是目前最为广泛地应用数学方法的学科之一。加拿大著名生物学家 E. C. Pielou(1969)说:“生态学本质上是一门数学。”

要想了解复杂生命系统的功能,在生物学中应用模型几乎是必不可少的。不用模型作为综合工具而想调查生命系统中许多组成部分以及它们的反应则是不可能的。一个系统总的反应不一定是个别反应的总和,这就意味着,作为一个系统,不使用整个系统的模型是不能揭示生命系统的特性的。

对复杂生命系统的分析的目的在于建立模型。模型的建立通常有助于某一复杂现象的概念化、数学化,系统化,用于了解一个系统的现状,评价其优劣,预期其未来的发展,以便提出新的假设。一般地讲,模型应该比真实的系统更易于理解或描述得更充分,对于那些处于稳定状态的系统的变化过程,可以用模型来描述;而对于那些失去稳定状态的系统,通过模型的建立,可以提出达到稳定的办法,也就是说一个有效的模型不但可以用于解释系统正在发生什么变化,而且如果有了某些变化,还可以预测将发生什么。

因此在生命科学中日益广泛地使用模型作为了解生命系统性质的工具就不足为奇了,它的应用明显地显示出其有用工具的优越性,这可以概括成以下几点:

- (1) 模型在综述复杂系统方面是一种有用的工具;
- (2) 模型能揭示系统的性质;
- (3) 模型揭示我们知识中的薄弱点,因此使用模型可以确定研究的重点;
- (4) 模型在检验科学假设中十分有用,因为它能模拟生态系统中的反应,并可与观测作比较(S. E. Jorgenson, 1988)。

1.3 生命科学动力学模型的现状与简评

每门科学都离不开数学。当人们认识到生命过程的动态特性时,尤其认识到生命活动的非线性特性时,生物科学的动力学模型才作为一个专门的研究领域引起人们的重视。而生态学却又是运用数学模型最为广泛的学科之一。现在看到,用以描述生命活动动态过程的方法不一而足,主要分为两种类型:一种是以生命活动的外部特征为依据,将其活动的数据加以分析处理而推测其内部机制和发展趋势。这类模型以数理统计为代表,其主要形式有马尔科夫过程(Markov Process)、曲线拟合(Curve Fitting)、回归分析