

35
2002

进化与生态复杂性

EVOLUTIONARY AND
ECOLOGICAL COMPLEXITY

张知彬 编著

海洋出版社

2002年·北京

图书在版编目(CIP)数据

进化与生态复杂性 / 张知彬编著. — 北京: 海洋出版社, 2002. 4
ISBN 7-5027-5534-9

I. 进… II. 张… III. ① 生物—进化—研究 ② 生态学—研究 IV. Q1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)016528 号

责任编辑 彭 慧

特约编辑 马 浏

责任印制 严国晋

海洋出版社 出版发行

<http://www.chinaoceanpress.com>

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京海洋印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 4.75

字数: 124 千字 印数: 1~1000 册

定价: 18.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

序

近代科学发展史表明,重大的科学发现往往是学科间交叉渗透的结果。在学科越分越细,职业越分越专的当今社会,加强学科之间的交叉与融合愈显得迫切。没有学科间的相互启迪和碰撞,就很难产生创新的思想火花。

复杂性是人类经常面临的问题,解决复杂性是科学家义不容辞的责任。有一类复杂性问题,即复杂系统的结构和功能,仍然没有得到很好的解决。所谓复杂系统,是指由大量单元组成、单元之间存在大量联系、具有进化和自适应能力的一个网络系统,像神经系统、免疫系统、基因系统、生态系统、语言系统、图像系统、经济系统、股票市场等都是典型的复杂系统。复杂性科学就是专门研究复杂系统的复杂性、有序性及功能性的一门科学,它是继控制论、信息论、协同论、耗散结构、混沌理论之后于 20 世纪 90 年代初脱颖而出的一门新兴学科,涉及大学科交叉融合,研究领域十分广泛,包括自动化控制、模式识别、人工智能、互联网、经济安全、生态调控、战略决策等。许多专家预言,复杂性科学是 21 世纪的科学。

中国科学院较早地注意到了复杂性科学的发展。1991 年 1 月,

中国科学院在北京举办了首次“复杂性科学学术讨论会”；之后，又于1994年9月、1997年1月、1998年3月在北京举办三次香山科学会议，专门讨论复杂性科学。1999年8月，国家自然科学基金委员会在北京举办了21世纪核心科学问题论坛，主题是“复杂系统与复杂性科学”。有关复杂性与进化、生态学的研究尚不多见，需引起注意和重视。事实上，现代复杂性科学的许多理论是来源于进化论和生态学思想的。目前，中国科学院已将复杂性研究作为知识创新工程试点的重要创新方向之一。

与物理系统不同，生命系统的演化是从无序到有序、从简单到复杂的，从直观上看，有悖于热力学第二定律。对这一现象的探索是复杂性科学的重要使命之一。本书的作者借鉴复杂性科学的观点、方法和手段，从理论分析的角度，探讨了生物进化和生态学中的复杂性问题，同时从进化论和生态学出发，对复杂性科学的理论和内涵也进行了有意义的思考。在本书中，作者着力讨论和探索是否存在一个比较统一的规律来描述复杂系统及其演化。本书重点探讨了复杂系统的自组织和演化、混沌的边缘或适度非线性、有序与能学特征、竞争与合作、进化稳定性等重要科学问题。虽然本书的某些观点还不成熟，但作者大胆创新、积极探索的精神是值得肯定和提倡的。只有敢于超越现有的观念，才会有突破和创新。本书涉及的学科与知识跨度很大，对生物学、物理学、化学、计算机科学、社会经济学等领域的读者具有很好的参考价值，希望此书能够引起共鸣和探讨。

中国科学院副院长、院士

陈宜珍

2001年2月26日

前 言

对复杂性问题的思考一直是我的一个业余爱好。特别是自从涉及生物多样性研究以来,觉得这一爱好多少和本行有点联系。我对复杂性的兴趣主要是从进入中国科学院动物研究所攻读硕士学位时开始的。当时,总觉得与物理学、化学等相比,现有的生态学对生态系统现象的描述过于具体化,缺乏一个普遍适用的定律或规律,总是就事论事。于是经常琢磨能否借鉴物理学或化学来解决生物学的问题。当时,刘畅、陈晓峰、王强等同学对这一问题也有兴趣,我们经常到理论物理所听一些学术报告。著名科学家钱学森组织了一个系统动力学研讨班,我们还经常去听。刘畅手里有几本书引起了我的注意,我记得有《普里高津与耗散结构》,还有一些非平衡热力学方面的书籍,以后自己又买了尼科利斯和普里高津合著的《探索复杂性》中译本等。当时,耗散结构理论很时髦,什么事都套用耗散结构理论,但解决实际问题(指非热力学系统)的例子并不多。

1993年,中国生态学会召开“全国首届能量生态学学术会议”,王祖望、祖元刚等人组织编写《能量生态学》论文集,在刘炳谦同志鼓励和催促下,我写了一篇文章,题目是“序能与生命结构”,首次谈了

对复杂性的看法。第一个观点是质疑非线性是有序之源,提出适度非线性的观点,这一观点比较接近如今的“混沌的边缘”。第二个观点是提出模板是有序之源,并且是复杂化与进化的基础。目前以圣菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)为主流派的研究与以往研究的一个主要区别就是引入了模板,如 Holland 的遗传算法等,都假定模板可以突变。第三个观点是提出了序能的概念,认为有用能才能更好地描述复杂系统的功能状态。当然,这一想法在机械或热力学系统早就出现过。通过简单的数学推导,明晰了两个概念,既获能与节能可能是生态系统状态的客观指标。后来,对复杂性的认识,基本上是沿着这三条线索做进一步思考的。

1996 年,利用去美国农业部野生动物研究中心 Dale Nolte 博士那里做短期访问的机会,在图书馆里接触到了许多有关复杂性科学研究的书籍,特别是圣菲流派的工作。我惊讶地发现,现在的复杂学家正在使用生态学与进化论的思想研究如何解决复杂性问题,过去可都是生物学家应用物理、化学、数学的理论、方法来解决生命的奥秘呀!例如,用光学显微镜发现了细胞,用隧道扫描电镜看到了双螺旋 DNA 结构……例子很多。这时候,我感觉到,一场新的科学革命真的快要来临了——物理学家、化学家、神经生物学家、免疫学家、生态学家、语言学家、经济学家等都开始一起工作,共同探讨复杂性科学这一未决的科学难题。为尽自己一份责任,我和王祖望、李典谟一起于 1999 年在《生态学报》上发表了一篇题为“生态复杂性研究——综述与展望”的文章,主要介绍了当时复杂性科学的研究进展,尤其是与生态学的关系。在这篇文章中,我们从方法论的角度论述了复杂性科学是有别于系统科学、混沌学的,从而可以成为生态学研究的一个重要手段。

近几年来,国内对复杂性的研究也开始活跃起来,我也断断续续地参加了一些研讨会,如去年国家自然科学基金委员会在北京九华山庄举办的“复杂系统与复杂性科学研讨会”、今年又在北京召开的

“中德复杂性科学研讨会”。与许多学者的交流使我受益匪浅,特别是中国科学院自动化所的戴汝为院士给予我很多的指导和关心。

本书能与读者见面,要感谢上海科学技术出版社的吕芳女士。由于吕芳女士的不断鼓励和敦促,才最终得以完成书稿。吕芳在《生态学报》上看到了“生态复杂性研究——综述与展望”这篇文章,鼓励我在此框架基础之上再扩大一下。其实,我早有此意,一直想写一本小册子,将复杂性科学介绍给读者。过去的几年,虽然收集了不少材料,也写了不少笔记,但只因忙于科研课题,加之杂务缠身,竟然等了三年多未能动笔。这次写作也是匆匆忙忙,希望今后有机会再进一步加工和拓展。本书应该说是在以上两篇文章基础上的发展和深入,特别是又提出狭义进化、广义进化、层、分层优化、竞争与合作、进化稳定性等概念;还从竞争的角度,探讨了“序能”在进化稳定性上的意义;也讨论了生物多样性与生态系统稳定性及功能作用的关系,提出三个稳定性(动力学稳定性、热力学稳定性和进化稳定性)的划分,认为复杂性与稳定性是有密切联系的,在动力学和热力学上,复杂系统是不稳定的,但在进化学上,复杂性是有利于稳定的。围绕主题思路,本书还引证和介绍了数学、物理、化学、生物等领域内涉及复杂性研究的知识和成果,旨在引起不同学科领域读者的兴趣和思考,以促进学科交叉与渗透。由于本书跨度很大,涉及的学科也很多,可能有遗漏或不准确之处,有些观点很不成熟,欢迎读者批评指正。

本书承蒙中国科学院副院长陈宜瑜院士作序,中国科学院动物研究所的张一芳女士绘制部分插图,马洌先生对本书的编辑、出版提供了帮助,本书的出版还得到科技部专项“生物复杂性研究”及国家重点基础研究计划(G2000046802)和国家基金项目(39893360)的部分资助,在此表示衷心感谢!

作 者

2000年12月于北京

目 次

1 绪论	(1)
1.1 复杂性科学的诞生	(1)
1.2 复杂性科学的发展简史	(8)
1.3 复杂性科学的重大命题	(9)
1.4 复杂性科学的哲学定位	(11)
2 复杂性	(13)
2.1 简单与复杂	(13)
2.2 无序与有序	(18)
2.3 随机与混沌	(21)
2.4 平衡结构与耗散结构	(26)
2.5 生命系统	(30)
2.6 适应复杂系统	(37)
3 复杂系统的自组织	(39)
3.1 有序之源	(39)
3.2 贝尔纳花样与化学波	(40)
3.3 L-系统	(41)

进化与生态复杂性

3.4	超循环	(43)
3.5	Kauffman 的自催化网络	(45)
3.6	生命起源、演化与辐射	(46)
3.7	动物的自组织行为	(47)
4	混沌的边缘	(53)
4.1	元胞机	(53)
4.2	$N-K$ 适合度景观模型	(61)
4.3	人工生命系统	(65)
4.4	生物灭绝与临界态	(66)
5	复杂问题的优化	(69)
5.1	NP 问题	(69)
5.2	分层优化	(70)
5.3	Holland 遗传算法	(79)
5.4	神经网络	(80)
6	竞争与合作	(83)
6.1	两物种间的竞争模型	(83)
6.2	竞争与合作模型	(85)
6.3	行为对策的复杂性	(88)
7	复杂系统的能学特征	(93)
7.1	能量转化	(93)
7.2	有用能与序能	(97)
7.3	序能的生物学意义	(102)
8	复杂性与进化稳定性	(109)
8.1	稳定性的概念及划分	(109)
8.2	复杂性与稳定性的关系	(112)
8.3	复杂性与功能性	(116)
8.4	复杂性的进化	(117)
8.5	进化稳定性	(119)

结束语	(125)
参考文献	(127)
Summary	(131)
英文词汇索引.....	(133)

Contents

1	Background	(1)
1.1	Birth of the science of complexity	(1)
1.2	History of the science of complexity	(8)
1.3	Scientific problems of the the science of complexity	(9)
1.4	Philosophy of the the science of complexity	(11)
2	Complexity and complex system	(13)
2.1	Simplicity and complexity	(13)
2.2	Order and disorder	(18)
2.3	Random and chaos	(21)
2.4	Equilibrium and dissipative structure	(26)
2.5	Life system	(30)
2.6	Adaptive complex system	(37)
3	Self-organization of complex system	(39)
3.1	Origin of order	(39)
3.2	Bernard phenomena	(40)

3.3	L-system	(41)
3.4	Supercyclicity	(43)
3.5	Kauffman autocatalytic network	(45)
3.6	Origin of life	(46)
3.7	Self-organization of animal behavior	(47)
4	Edge of chaos	(53)
4.1	Celluar autama	(53)
4.2	N-K landscape model	(61)
4.3	Artificial life	(65)
4.4	Biological extinction and criticality	(66)
5	Optimization of complex problems	(69)
5.1	NP-hard problem	(69)
5.2	Hierarchical optimization	(70)
5.3	Holland genetic algorithm	(79)
5.4	Neural network	(80)
6	Competition and cooperation	(83)
6.1	Model of two competitive species	(83)
6.2	Competitive and cooperative model	(85)
6.3	Complexity of behavioral strategies	(88)
7	Energetic characteristics of complex system	(93)
7.1	Energy transformation	(93)
7.2	Working energy and ordergy	(97)
7.3	Biological meanings of ordergy	(102)
8	Complexity and evolutionary stability	(109)
8.1	Definition and types of stability	(109)
8.2	Relationship between complexity and stability	(112)
8.3	Complexity and function	(116)
8.4	Evolution of complexity	(117)

8.5 Evolutionary stability	(119)
Conclusion	(126)
References	(128)
Summary	(132)
Glossarial index	(133)

1 绪 论

1.1 复杂性科学的诞生

20 世纪的最后的一二十年,人类社会发生了一场巨大的知识和技术革命,而基因工程和计算机技术则是这场革命的弄潮儿。基因的发现,使许多复杂的生命现象得到了科学的解释,而且人类已能够熟练掌握这种技术而再现生命的复杂性。计算机的出现彻底改变了人类的生活方式,它几乎渗透到了我们生活的每一个方面,电脑、手机、互联网……等电子产品使我们的生活更加方便。由于计算机运行速度和内存容量的不断提升,我们解决复杂问题的能力也不断提高。这两项科学技术的出现,使人类社会真正跨入了知识经济的时代。

中国有句古话:“劳心者治人,劳力者治于人”。这句话可以比较恰当地形容新老科学技术革命的特点。卫星的发射,原子弹的爆炸,都是涉及到巨大的能量,属力量密集型的;而基因和芯片所涉及的能量与前者相比是微不足道的,但却包含着大量的信息,属知识密集型

的。可以这么认为,传统科学主要是研究物质间相互作用规律的,而新的知识和技术革命主要是研究物质间的信息连接和流动规律的。信息决定着物质运动的序(order),如电脑控制着卫星的发射和原子弹的起爆,基因控制着胚胎的发育等。

在基因和互联网科学与技术如日中天的今天,是不是说科学已经走到尽头了呢?显然不是。科学史告诉我们,重大科学的突破往往同时又孕育着新的挑战。当年牛顿提出著名的力学三大定律之后,就有人预言,物质运动规律得到彻底揭示,只是一个时间问题。机械的牛顿世界观盛行一时。可是,在量子世界里,如原子、质子、电子、光子的运动规律,牛顿力学遇到了麻烦。于是,又出现了一门新的科学,即量子力学。它的出现,也不亚于基因和芯片对人类产生的影响。根据量子原理,人类制造了原子弹、氢弹、中子弹;也将它用于和平目的,建造核电站,解决困扰人类所需的能源问题。

所以,基因和芯片的出现也只是人类认识自然界复杂而有序现象的第一步。尽管基因解释了许多奥妙无穷的生命现象,如遗传、发育、进化等,但仍然无法回答许多重大的科学命题,如生命的起源,大脑的意识及可持续的生物圈。尽管目前最快的大型计算机运行速度已达几十亿秒级,它对简单图形、图像和语言的识别还不如一个几岁的婴儿。人类目前所制造的机器人的走动还不如一只蟑螂灵活。美国耗巨资兴建的生物圈2号最终还是无法避免二氧化碳过高、氧气严重不足的困境而被迫关闭。这些背后一定还存在着尚待发现的规律,它支配着系统的运转,使其具有处理复杂问题的能力。对这一现象的研究就形成了一门新兴学科——复杂性科学(science of complexity)。

复杂性(complexity)恐怕是目前最容易被人误解的一个词义,归纳起来有以下几种理解。一是由于知识的匮乏或由于认识上的局限,对暂时难以理解或预测的现象定义为“很复杂”。例如早期人类由于缺乏天文知识,对星体运动规律不了解,认为天象很复杂或很神

秘。这些对现代人类来说并不觉得复杂。由于发现了万有引力定律,人类可以很准确地预测星体的轨迹。二是有人认为复杂性就是混沌(chaos)。混沌学是新近发展起来的一门非线性科学。由于组分之间存在较强的非线性相互作用,即使一个非常简单的系统,其动力学行为轨迹也是多变且难以预测的。也就是说,系统的行为对一个很小的扰动非常敏感。对于一个非线性的动力学系统,当组分增加时,也容易出现混沌现象。一般说来,过强的非线性是不利于系统稳定性的。三是认为复杂性是反混沌(anti-chaos)的,它不是非线性的一种属性。混沌通常描述的是简单系统如何出现复杂的行为,反混沌刚好相反,它要探讨的是由大量相互连接和作用的组分组成的复杂系统是如何涌现或突现(emergency)简单而宏观行为的。例如,人脑由亿万个神经细胞组成,人的意识是如何涌现的?生命起源的初期,生命的基本单元——细胞是如何在“原始生命汤”中涌现出来的?由众多蜜蜂参与的六角型的蜂窝是如何建造的?大雁飞行时的队形是如何自组织的?等等。反混沌所关心的问题基本上代表着当前复杂性科学研究的主流。

我认为有三件重要的历史事件在复杂性科学史上占有重要位置。一是“热寂”恐慌。19世纪,熵定律的发现使人出人意料地产生了巨大的恐慌。熵(entrophy)是一种混乱、无序度的度量。根据熵定律,世界上的一切物质和系统的熵值是不断增加的,这样都不可避免地走向死一般的沉寂,这意味着世界末日必将到来。当全世界都陷入悲观而难以自拔时,一些善于思考的科学先知们开始寻找新的答案和出路。虽然我们所观察的系统是逐渐走向混沌和无序的,但我们的周围还有不少物质和系统是向复杂和有序的方向发展的,如雪花的形成,贝尔纳(Bernard)花样的产生,生物界的进化,电脑的升级等等。于是,有序性、复杂性开始引起人们的注意。到20世纪60年代,普里高津(Prigogine)敏锐地注意到自然界的熵值逐渐减少、自发形成有序结构的自组织(self-organization)现象。他于1969

年提出耗散结构理论,后来因此而获得诺贝尔奖。该理论认为,在没有物质和能量交换的封闭系统,其熵值会逐渐增大,有序性得到破坏,无序度逐渐增加;对于有物质和能量交换的开放系统,系统在负熵流的作用下,系统不断地排出熵,使系统的熵值逐渐减少,从而实现从简单到复杂、从无序到有序的自组织转化。耗散结构理论的出现,消除了人类对热寂的担忧,这是人类世界观的一个重要转变,其重要性不亚于从“牛顿观”到“量子观”的飞跃。

计算危机是复杂科学史上另外一个重要的事件。当我们人类拥有每秒亿万次计算能力的电脑时,我们曾幻想世界上最复杂的问题都能迎刃而解。有一个古老而看似简单的数学命题使这一想法成为泡影,它就是著名的“商人旅行难题”(Traveling Salesman Problem, 简称 TSP)。TSP 是说有一个商人要访问 n 个城市,想选择一条最短的路线,且每个城市只访问一次(图 1-1)。显然,这样的路线共有 $n!$ 个。一种简单的算法是使用计算机计算每条线路的长度,然后



图 1-1 TSP 与计算危机

挑出最短的线路。但是,当 n 足够大时, $n!$ 是一个天文数字,即便使用目前最快的计算机,在几十亿光年的时间内也无法找到最短的路线。这种随着问题规模的增加(即复杂性增加),而需要的计算时