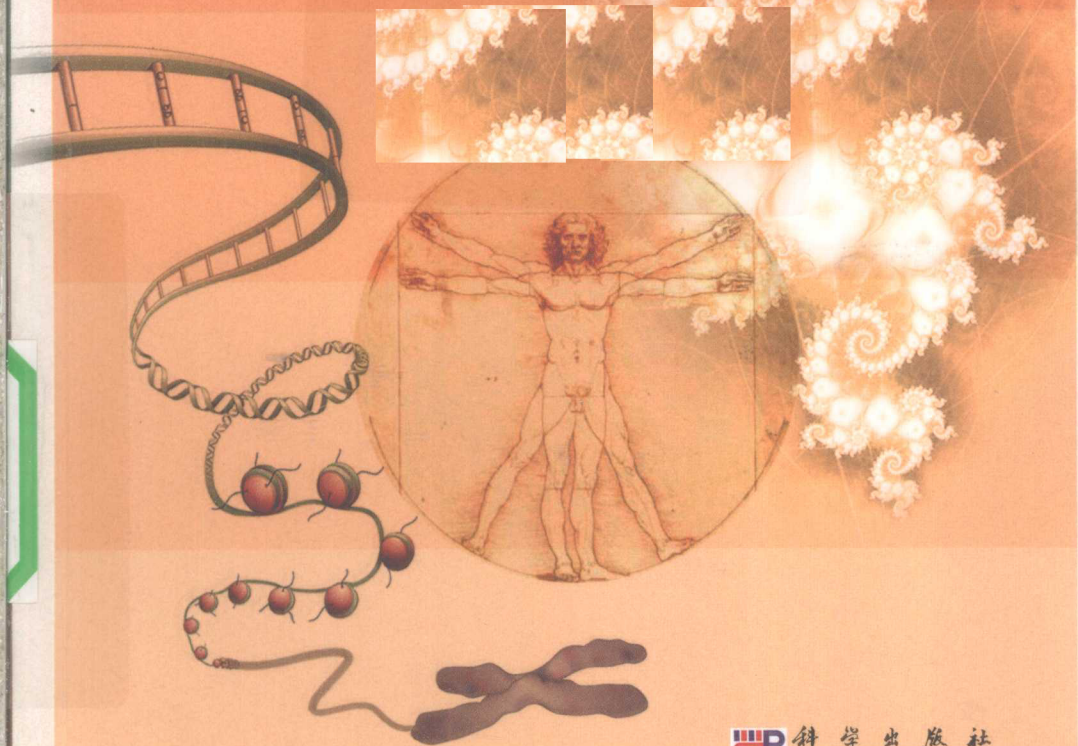


The Music of Life
Biology beyond the Genome

[英] D. 诺布尔/著
张立藩 卢虹冰/译

生命的乐章

——后基因组时代的生物学



生命的乐章
——后基因组时代的生物学

The Music of Life
Biology beyond the Genome

〔英〕D. 诺布尔 著

张喜藩 廖虹冰 译



科学出版社

北京

图字:01-2009-7219 号

内 容 简 介

本书是英国 D. 诺布尔教授于 2006 年出版的一本科普读物 *The Music of Life* 的中译本。原著现已被译成 7 种语言。本书以思辨的题材和运用比喻及讲述故事的手法,对后基因组时代生命科学所面临的重大问题进行了讨论;作者还深入浅出地介绍了系统生物学的基本概念和重要发现,并指出系统-层次理论在揭示生命奥秘中的重要意义。

本书不仅可供有关专业的大学生、研究生和科技人员阅读,也可作为广大科学爱好者和青年学生的一本科普读物。

The Music of Life: Biology beyond the Genome by Denis

Noble © 2006 Oxford University Press.

Originally published in English in 2006. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

图书在版编目(CIP)数据

生命的乐章:后基因组时代的生物学/(英)诺布尔(Noble, D.)
著;张立藩,卢虹冰译. —北京:科学出版社, 2010

书名原文: *The Music of Life: Biology beyond the Genome*

ISBN 978-7-03-028790-8

I. ①生… II. ①诺… ②张… ③卢… III. ①生物学-系统科学-研究 IV. ①Q111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 166241 号

责任编辑:夏 梁 王 静/责任校对:冯 琳

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩 张立藩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 9 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2010 年 9 月第一次印刷 印张:4 3/4

印数:1—5 000 字数:151 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

· 中译本序

《生命的乐章——后基因组时代的生物学》以引人入胜的手法、新奇的比喻和有趣的故事，向广大读者介绍了 21 世纪系统生物学的基本概念和重要发现。该书现已被译成 6 种语言。现在我非常高兴，因为它即将被翻译成世界上最伟大的语言之一——中文。

尤其令我高兴的是，我在书中还介绍了很多中国的文化。因该书是以学生及普通民众为读者对象，介绍现代生物学令人惊奇的发现，故在表达方式上非同一般，我需要采用一些有说服力且令人信服的比喻。当我在寻找恰当的故事和比喻时，这种文化正是我的灵感之所在。

比如说，当我打算解释基因更像是一个“惰性的”数据库，而不是一个“生命的程序”时，很自然会想到其与语言的类比。基因可与中文的汉字进行类比。正如化合物有许多基团，基因也由更小的元素所组成，相同的序列可以在很多个基因中出现。正如汉字那样，基因也可按照无穷无尽的方式进行组合。这个类比很有说服力，因为它们脱离各自的语言时，基因和汉字都将变得毫无意义。一旦离开机体这个背景，基因也就成了一堆毫无意义的符号。我们从不称呼汉字为“自私的”，也没有“自私的”基因。

该书所涉及的中国文化绝不仅限于汉字。当我在解释有关大脑和感知的某些重要哲学概念时，我借用了已在中国盛行 2000 多年的道家和佛教思想。

我甚至还对一个重要的故事进行了改动，即第 2 章开头讲述的中国皇帝和一位贫穷农夫的故事。这是一个关于有 64 个方格的棋盘的故事。通常认为这种游戏起源于印度，而非中国。事实上，在 2000 多年前，中国也还没有这种 64 格的棋盘。因我希望这个故事也能带有中国文化的气息，故将其改编成一个有关中国秦始皇在战场上被贫穷农夫所救的故事。

第四个例子就是在第 10 章所引用的禅宗寓言——“放牛娃”的故

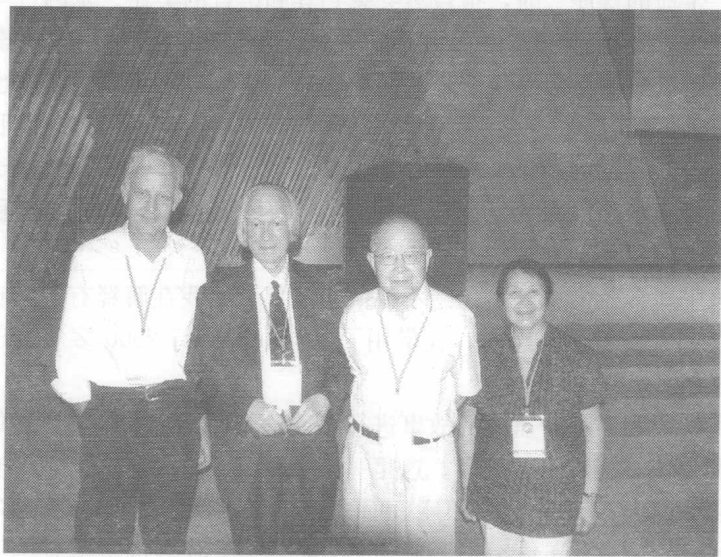
事。我最初是从一个写于 1278 年的 13 世纪日文版本得知这个故事的。这已被认为是最古老的日文版本，但这个故事最早还是用中文写出的，就连那个日文版本也完全是用中国的汉字写的，日本人称之为“汉字”，因为它们最早是在汉代被引入日本的。

因此，该书即将有中译本出版一事，对我而言，意义格外重要。在翻译的过程中，我与译者及他们的顾问之间的交流无比愉快。怎样用合适的方法，将本书的思想传达给中国的读者，绝非易事。他们已经完成了一件了不起的工作。正如我在书中所说，不同的文化背景下，其思维方式也会不同，特别在有关生命的更深层次的哲学思想方面更是如此。

世界各地对该书的反响颇为热烈。我相信，我的中国读者也会如众多英语国家读者那样，将尽情享受这本小书。

Denis Noble

2010 年春于牛津



2009 年 7 月在日本京都参加国际生理科学联合会第 36 届大会(IUPS-2009)期间，译者张立藩（右二）及夫人邓敬兰（右一）与 Denis Noble（左二）及 Peter Hunter（左一）的合影

译者序

本书作者 Denis Noble 现为牛津大学生理学系教授，英国皇家科学院院士。1961 年，他在伦敦大学获哲学博士学位，后一直在牛津大学生理学系工作，其间他也曾前往日本、韩国、新西兰等国进行客座合作研究。Noble 教授的主要贡献是：关于心肌起搏细胞兴奋过程离子通道机制的阐明，建立第一个虚拟心脏，并在后基因组时代大力提倡和推动系统生物学研究。Denis Noble 也是国际生理科学联合会（International Union of Physiological Sciences, IUPS）的现任主席（2009 年 8 月至今）。

Denis 能取得如此成就，除得益于牛津大学、伦敦大学等学府的学术传统和工作环境，以及他的启蒙老师和长期合作的同事外，还与他兴趣广泛、思路开阔，既精于一、又联系生命科学基本的/原始的问题而执着探索有关。本书是一本关于系统生物学的科普著作。作者的学术造诣和渊博知识使本书具有以下特色。首先，音乐的陶冶和修养使他产生灵感将生命过程比作音乐，全书都在引导着读者，怎样从系统的、整体的和进化的观点，感受和理解大自然这一部伟大的乐章——生命。因为“脑与精神”又是这部乐章中最令人神往和难解的篇章之一，故在本书的最后，作者还联系语言、文化、哲学等问题而进行讨论。再者，Denis 也重视东西方文化的比较，对中国的语言和文化很感兴趣，不少灵感即由此而生。例如，他将中文的汉字系统与基因组的组合情况进行类比，指出两者都是具有模块化特征的系统。他还将中文的“生理学”三个字，解释为相当于英语的“life-logic-study”，即生理学是“研究生命的逻辑之学”（a study of the logic of life）；并指出，仅研究系统各个组分的性质，还不可能理解这个逻辑。为了阐述“自我”的本质，他在第 10 章，又通过动人的禅宗寓言介绍了中国佛教与道家的观点。另一位让我敬佩的日本学者汤川秀树，也很重视老庄哲学思想对其学术思

想的启示。¹此外，作者为了阐述其学术思想，在书中多处借用了生动的比喻和富有启示的故事。我认为，这对于培养科学思维中的直觉和抽象，也非常有益。关于直觉思维在科学创新中的重要性还可参阅文献¹。但比喻毕竟只是帮助我们思考的“理解之梯”，科学问题的阐明一定要靠科学的实证性与理性的结合。²最后，本书也生动地介绍了著者所经历的系统生物学发展历程：在 20 世纪 50 年代，当计算机刚刚问世、全世界仅有数台，且生物学家还很少求助于数学的时候，Denis 已开始将离子通道电生理研究与仿真研究结合进行，直到与奥克兰大学的 Peter Hunter 教授等合作建立起第一个虚拟器官；而在后基因组时代，他又反对狭隘的基因决定论观点，倡导系统-层次的学术思想，为不同层次的生命科学研究提出了新的思路。

促使我下决心翻译这本科普著作的动因主要有二：其一是出于对模型与仿真研究在阐明生理学问题重要性的认识和期望。十多年前，在我们的重力生理研究中，年轻同事卢虹冰教授已开始了这方面的工作。为此，我在 2002 年第三次访问牛津大学生理学系时，还曾专门访问 Noble 教授，了解有关进展。这次，虹冰又欣然接受我的邀请，共同完成了本书的翻译工作。其二是出于对宣扬科学思想和科学精神名著的热爱与敬重。2007 年秋，我刚刚读过物理学家薛定谔的名著《生命是什么》，²知道这位量子力学大师早在 20 世纪 40 年代经过缜密的逻辑推理就已提出了遗传密码的概念，并提出了大分子“非周期性固体”作为遗传物质（基因）的模型。此时，恰逢我的学生谢满江自牛津大学生理学系博士后工作归来，他告诉我的第一件事就是：Noble 教授最近出版了名为 *The Music of Life* 的科普著作。我当即设法购得。阅读后才了解到：Denis 的这本著作又是深受薛定谔那本短篇名著的影响而写出的，

I 汤川秀树是第一位获得诺贝尔奖的日本物理学家，也是完全由日本自己培养出来的科学家。其获奖论文在日本完成，并最初发表在国内的刊物上。详见：汤川秀树 著，周林东译，戈革校。《创造力与直觉——一个物理学家对于东西方的考察》。石家庄：河北科学技术出版社，2000。——译者

II 薛定谔 (Erwin Schrödinger) 为奥地利物理学家，诺贝尔物理学奖获得者。20 世纪 40 年代出版 *What is Life* 一书。中译本：〔奥〕埃尔温·薛定谔 著，罗来鸥 罗辽复 译。《生命是什么》。长沙：湖南科学技术出版社，2007。——译者

表达了一位心脏生理学家对当代生命科学所面临挑战的一些思考（见本书的引言）。弘扬科学传承的思想促使我下决心将其译出，献给国内的读者。最初我们只是利用业余时间进行，时断时续；2009年夏，在日本京都出席第36届国际生理科学大会期间，又与Denis相遇，深为进度缓慢而不安。遂而经过半年多的努力，终于完成翻译工作。在自叹知识局限和笔力不足的同时，也感受到终就一件有意义工作之愉悦。

改革开放以来，我国虽已在许多方面取得了举世瞩目的成就，但我深感我们的科技工作距国际先进水平，仍还有一定差距。这涉及多方面的问题，非一朝一夕所能解决。但怎样培养热爱科学事业、奉献、求实、又富有创新精神的科学技术工作者的问题，应始终放在首要的战略位置。希望这本译著能激励我国的青年学子，立志献身于祖国的生命科学事业。21世纪生命科学与信息科学空前发展、相互交叉，正处在取得重大突破和人才辈出时代的新起点。在后基因组的第一个10年期间：测序技术发展很快，价格降低了约14 000倍；对已获得的大量基因数据，需要建立其与表现型信息之间的联系，了解基因组序列差异与人体健康和疾病的关系，以发展个性化的医学（personalized medicine）。在此期间还发现：原先对诸如“基因”和“基因调节”等的一些概念已不能解释所面对的、越加令人困惑不解的一系列复杂性问题，迫切需要在结构生物学、细胞生物学、发育生物学、表观遗传学等开展新一轮的实验探索；而系统-层次的学术思想和系统生物学/计算生物学又必将在其中发挥越来越重要的作用；J. Craig Venter还指出，今日运算速度最快的计算机已经难以完成如此庞大的计算任务。^{III}回想20世纪初，当爱因斯坦和普朗克正在为创立相对论与量子论而书写数学方程式时，生物学则还处于实验观察和直接归纳推理的阶段，例如，巴甫洛夫即以其在消化腺生理领域的实验研究而获得1904年的诺贝尔生理学或医学奖。在21世纪初叶，生物学似乎又在面临着另一个重要的发展机遇，一个有如20世纪初曾使物理学发生重大理论变革的那样一种机遇。希望这本小书也能帮助我们扩大视野，在百忙之中时刻想到“更广阔的画面”，

III EDITORIAL: The human genome at ten. Nature 464, 649-650 (2010); NEWS FEATURES & OPINION. Nature 464, 664-677 (2010)。——译者

为阐明生命乐章之奥秘做出贡献。我国生理学前辈冯德培院士生前曾提出：要学习毛泽东，在生理学事业中也创造自己的“井冈山”。^{IV}我深信：不甘落后的中华儿女，一定会发愤图强、求实创新，使我国的科技工作早日走在世界的前列！

本书的引言、第5、第6、第9、第10章由张立藩译，第1~第4、第7、第8章由卢虹冰译。为了便于阅读，还加了一些“译者注”。在翻译过程中，译者除及时得到著者直接而有益的帮助外，还曾向邵启昌先生（数学史专家）、姚思源教授（首都师范大学音乐学院）、严春友教授（北京师范大学哲学与社会学学院）、徐文明教授（北京师范大学哲学与社会学学院）、药立波教授（第四军医大学）等咨询；在编辑、校对和收集资料等工作中，曾得到马玉玲、刘蓉蓉、张宇丝、张向、黄枫、姚恒璐、杨宁、窦晓峰（第7、第8章初稿）等的协助，当然更离不开我的夫人邓敬兰教授对我的支持与鼓励；此外，还得到第四军医大学航空航天医学系主任常耀明教授的大力支持及本书责任编辑夏梁先生的指导。译者在此一并致谢。译稿由我最后定稿，错误和不当，敬请读者不吝指正。

张立藩

2010年8月1日于第四军医大学

IV. Chen G. In memory of a great physiologist and my mentor Te-Pei FENG. *Acta Physiologica Sinica*, 2007, 59 (6): 716. ——译者

引言

“生命是什么?”对此问题可沿着多种思路去寻求解答。如何从科学的角度进行阐述即是其一。即便如此,答案也会颇不一致,因为现代科学家们对此问题的理解尚有很大差别。再者,鉴于近年生物科学进展很快,每一代科学家都需要重新去思考这一问题。

50 多年以前,人类才首次发现,生物机体的遗传物质是一种被称为 DNA (deoxyribonucleic acid, 脱氧核糖核酸) 的分子。它是由四个被称为碱基的类似化合物所组成的长链分子。生物科学从此进入了一个空前快速发展的时期。现已阐明:

- 人类的基因组,即一个人的全部 DNA,就是一个由 30 亿个碱基对所组成的分子序列,且其碱基对的排列顺序已被确定。

- 我们已经了解这些碱基对组合又是怎样编码产生蛋白质的整个过程。对于每一个蛋白质分子来说,遗传物质犹如其模板,蛋白质的结构序列就被编码于 DNA 中。关于这些密码如何工作的详情,我们也已有一定了解。

- 关于许多蛋白质的序列和结构,我们都已基本搞清楚。

这些进展对我们怎样去理解生命到底有何影响?它的确回答了许多问题,但却又提出了更多的问题。我们所得到的答案也反映了我们所经历的研究历程。在过去的半个多世纪里,我们已将生命系统分解为其最小的组分——一个个基因和分子。正如 Humpty-Dumpty 自墙头跌落那样,它已被粉碎成无数个小碎片。¹这的确是一项十分了不起的成就!

I Humpty-Dumpty 是一首儿歌中的人物。这首儿歌在英语系国家广为流传。在英语俚语中, Humpty-Dumpty 也变成了“又矮又胖的人”之意,常译作“蛋头”或“胖胖蛋”。儿歌的完整版如下: Humpty-Dumpty sat on a wall, Humpty-Dumpty had a great fall; All the King's horses and all the King's men, Couldn't put Humpty together again. 译为: 蛋头坐在墙头上, 蛋头跌了个大跟斗; 国王所有的马, 国王所有的兵, 不能再把蛋头拼凑。——译者

例如，目前我们已能准确定位一种基因突变，它的影响可能在人的中年时期才表现出来，可导致患者发生心源性猝死。尽管对某一特定的患者来说，尚不能准确地知道其发作的原因，但我们已搞清楚这一因果链的几乎所有主要环节。虽然这类成功的例子已越来越多，但其出现频率并不像乐观主义者在人类基因组计划宣布完成时所预期的那样高，目前为健康事业所带来的利益也还不明显。

何以会如此？人们开始关注其原因所在。这里必须要解决如何将小尺度的微观与大尺度的宏观整合在一起的问题。我们的确已经了解了许多有关分子机理的知识。目前所面临的挑战是：如何扩展这些知识，将其用于更大的尺度？如何将这些知识用于了解控制整个生命系统的过程？这不是一个容易解决的问题。当我们从基因进展到其所编码的蛋白质，又进而到这些蛋白质的相互作用时，发现问题已变得非常复杂。然而，我们需要了解这类复杂性以解释分子和基因数据，并在此基础上，以一种新颖而有意义的思路去讨论一些更重大的问题，如“生命是什么？”。

这就是搞清基因组序列后所面临的一项新挑战。我们能将这个已破碎的 Humpty-Dumpty 再度恢复起来吗？这也正是“系统生物学”出现的背景。虽然其历史可溯源于 20 世纪的经典生物学和生理学，系统生物学现已成为当代生物科学中一个崭新而重要的方向和领域。但是，近几十年来，生物学家们更倾向于对生物机体中的单个组分进行非常局限的研究，更关心每个组分都具有什么性质？它们又是如何与其他类似尺度的组分，在短时间内相互作用的？现在，我们应该能够提出更大的、与系统相关的问题。在机体的每一个层次，其不同组分均被牢牢地嵌入在一个整合网络或者系统之中。每一个系统都有其自身的逻辑。^{II}只研究系统各个组分的性质，还不可能理解这个逻辑。

本书是一本关于系统生物学的书，它阐述了系统生物学的理论前提和深刻内涵。它主张，在当今探索生命之奥秘的阶段，我们需要从根本上重新思考一番。

II 此处“逻辑”（logic）一词的含义为“运行规律”（how it works），或者“机理”（mechanism）。可参阅本书第 8 章作者有关“生命的逻辑”的阐述。——译者

分子生物学有自己的思考方式。它注重对各个部分的界定、命名和行为描述,即将每一个整体分解、还原为其组成部分,并对它们一一进行详尽的阐明。生物学家们目前已完全习惯于这种思考方式,且这种方式也已被有兴趣的非专业公众所认可。而我们正准备进入的系统生物学则需要一种完全不同的思维模式。它注重综合而非分解,整合而非还原。它始于我们从还原论者所做工作中学到的知识,但却走得更远。它需要发展一种关于整合的思考方式,其严谨和缜密的程度绝不亚于还原论者的过程,但方向不同,这就是主要的区别。它的意义已超出纯科学的范畴,甚至对哲学也可能有一定影响。

怎样推动这样一个转变?我选择了写一本辩论题材小书的方式。本书拟对许多目前流行的生物学教条进行一番严格的剖析,甚至使其其中的一些彻底翻一个个儿。对于为何要从系统水平进行探索,它提出了理直气壮的辩护。这倒不是由于我对还原论在分子生物学方面已取得的成就无动于衷,恰恰相反,这是因为我很想看到,生物科学能够摘取由于伟大还原论者的努力而已快要到手的果实。

正如第5章所述,我开始从事生理学研究时,也曾是一名十足的还原论者。在我的研究领域,我已知道还原论科学所取得的成功,并且我自己也做了不少这方面的工作。目前在对身体一些器官所进行的仿真研究中,我仍然采用此类量化的方法。这也是近十年来,我又转而强调这两个方面应保持均衡的原因。如果我们都是只盯着眼皮底下的细节,就不会看到更广阔的画面,也不会想出还需要做些什么。系统水平上的成功整合必定是建立在成功的还原基础之上,但仅有还原却是远远不够的。

像所有的辩论者那样,我在书中使用了不少比喻,也讲述了一些故事。其目的在于提高读者的阅读兴趣,而避开一些当代的教条。

1944年,Erwin Schrödinger曾写过一本非常有名的小书(Schrödinger, 1944)。^{III}他在此书中正确地预言遗传编码是一种“非周期性晶体”,即一种没有规律性重复的化学序列。就像那个时代许多科学

III 中译本:[奥]埃尔温·薛定谔 著,罗来鸥 罗辽复 译. 生命是什么. 长沙:湖南科学技术出版社,2007。——译者

家所设想的那样，他也曾设想密码子是在蛋白质分子，而非 DNA 中。虽然他所预言的分子类别与后来的发现不符，但他的许多深刻远见则与其后的发现非常一致。在不到 100 页的书中，他改变了生物学的基本思维模式。

本书的篇幅与其相近。我原本也打算采用同样的书名——“生命是什么？”，但最终还是没有如此胆大妄为。我选择了一个能够反映本书主要比喻的书名，表明从系统-层次的观点（System-level views），不妨将生命比作音乐。如果合适的话，则乐谱在那里？谁是作曲家？在本书中，反复出现的一个中心问题是：“生命的程序究竟在哪里？”法国诺贝尔奖获得者 Jacques Monod 与 François Jacob（Monod and Jacob, 1961; Jacob, 1970）曾将“遗传程序”（le programme génétique）理解为：每一个生活机体的发育指令都蕴藏在其基因中。将基因组通俗地描述为“生命之书”或者一种蓝图，也表达了类似的概念。基因作为始动因素发挥主宰作用的概念也在 Richard Dawkins 写的一本很有影响的书《自私的基因》（Dawkins, 1976）中被进一步强化。

本书的主题思想是：在生物系统中并没有这样的程序，而且也没有一个专门掌管因果关系的特殊层次。第 1 章是本书其余部分的基础。它首先将基因组确定为机体逐代传递的数据库，而并非一个“创造”它们的程序。第二步是将“自私的基因”这个比喻改为“基因若囚犯”。这两个认识上的根本性转变，对于了解本书其余部分非常重要。每当面对诸如“基因程序”、“生命之书”和“自私的基因”这类常见的误解时，我都会抢着声明，即使提出这些概念的科学家也未必都同意他们对概念的那些解释，例如，Richard Dawkins 还写过一些对“程序”概念的精彩评论，但他本人却不是一名基因决定论者。

本书共分 10 章。每章均以不同的音乐问题来比喻生物科学中有关生命的某些问题。我们从第 1 章关于基因组的讨论开始，以第 9 章有关脑的讨论结束。第 10 章则自成一体，为本书的结尾。

致谢

我曾就本书有关问题与下列人士进行过有益的讨论，特在此表示衷心的感谢。他们是：Geoff Bamford, Patrick Bateson, Steven Bergman,

Sydney Brenner, Jonathan Cottrell, Christoph Denoth, Dario Di-Francesco, Yung Earm, David Gavaghan, Peter Hacker, Jonathan Hill, Peter Hunter, Otto Hutter, Roger Kayes, Anthony Kenny, Sung-Hee Kim, Junko Kimura, Peter Kohl, Jean-Jacques Kupiec, Ming Lei, Nicholas Leonard, Jie Liu, Denis Loisel, Latha Menon, Alan Montefiore, Penny Noble, Ray Noble, Susan Noble, Carlos Ojeda, Etienne Roux, Ruth Schachter, Pierre Sonigo, Christine Standing, Richard Vaughan-Jones 和 Michael Yudkin。他们中间的许多人以及牛津大学出版社的读者也曾就各章初稿提出过评论。从他们的反馈意见中我受益匪浅，但我当然要对仍然存在的错误和曲解负责。

我还要感谢我的一些来自东亚的朋友和同事，他们使我了解其文化的一些要义，而用于第 8 和第 10 章的写作。

第 1 章有关硅人故事的初稿，2004 年曾以 “Pourquoi il nous faut une théorie biologique” 为题，用法文在网上发表于 *Vivant*。第 3 章部分内容是基于刊载在 *Physiology News* (2002), 46, 18-20 的一篇文章——“Is the genome the book of life?” 而写成。第 9 章的对话部分是基于发表在 *Physiology News* (2004), 55, 32-33 的一篇文章——“Qualia and private languages”；而随后的故事则曾以 “Biological explanation and intentional behaviour” 为题，首次发表于 *Modelling the Mind* (ed. K. A. Mohyeldin Said *et al.*, Clarendon Press, Oxford, 1990) 一书的 97-112 页。一些哲学背景内容则源于 *Goals, no goals and own goals* 一书 (ed. A. Montefiore and D. Noble, Unwin Hyman, London, 1989) 和 Novartis 基金会关于生物科学基本问题的一些讨论会。

目 录

中译本序

译者序

引言

1 生命的 CD: 基因组	1
硅人	1
DNA 狂热	3
基因决定论的问题	5
基因决定论魅力的由来	10
生命也非一份蛋白质羹	14
对替代性比喻的诠释	16
2 30 000 根音管的管风琴	20
中国皇帝和贫穷的农夫	20
基因组与组合爆炸	24
30 000 根音管的管风琴	27
3 乐谱: 是否已谱写?	29
基因组是“生命之书”吗?	29
法国小餐馆的煎蛋	31
语言的含糊性	32
硅人归来	34
4 乐队指挥: 向下的因果关系	37
基因组是怎样发挥作用的?	37
基因组是一个程序吗?	38
基因表达的调控	40
向下因果关系有多种形式	42
向下因果关系的其他形式	43
生命的程序在哪里?	45

5	节律：心跳和其他节律	48
	生物学计算之始	48
	重建心脏节律：最初的尝试	49
	心脏节律的整合	53
	系统生物学并非伪装的“活力论”	56
	它也不是伪装的还原论	56
	其他生物节律	58
6	交响乐团：身体的器官和系统	64
	Novartis 基金会的争论	64
	自下而上路线的问题	65
	自上而下路线的问题	67
	中间突破！	68
	身体的器官	71
	虚拟心脏	72
7	调式与调性：细胞的和谐	76
	硅人发现了热带岛屿	76
	硅人们的错误	79
	细胞分化的遗传学基础	80
	调式与调性	83
	多细胞的和谐	84
	关于“拉马克主义”的历史注释	85
8	作曲家：进化	87
	汉字的文字系统	87
	基因的模块化	89
	基因-蛋白质网络	91
	失效自动补偿与冗余性	92
	浮士德与魔鬼的交易	94
	生命的逻辑	96
	伟大的作曲家	97
9	歌剧院：脑	99
	我们是怎样看到这个世界的？	100

在 Aziz 餐馆	105
动作与意志：生理学家和哲学家的实验	108
跨层次的解释	111
“自我”不是神经生理学的对象	113
孤立的脑	116
“自我”能被复活吗？	117
10 谢幕：艺术家已离去	120
木星人	120
文化在自我和脑关系观点中的作用	122
自我乃是一种比喻	126
艺术家已离去	128
参考文献	129