

Mathematics of Life:
Unlocking the Secrets of
Existence

生命之数

用数学解释生命的存在

〔英〕伊恩·斯图尔特 著

杨昔阳 译

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

 商务印书馆
The Commercial Press

2020年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

生命之数：用数学解释生命的存在 / (英) 伊恩·斯图尔特著；杨昔阳译. —北京：商务印书馆，2020

(新科学人文库)

ISBN 978-7-100-17659-0

I. ①生… II. ①伊…②杨… III. ①数学—应用—生物学 IV. ①Q

中国版本图书馆CIP数据核字 (2019) 第145921号

权利保留，侵权必究。

新科学人文库

生命之数：用数学解释生命的存在

[英] 伊恩·斯图尔特 著

杨昔阳 译

商务印书馆出版

(北京王府井大街36号 邮政编码100710)

商务印书馆发行

北京新华印刷有限公司印刷

ISBN 978-7-100-17659-0

2020年1月第1版

开本 880×1230 1/32

2020年1月北京第1次印刷

印张 15

定价：58.00元

Ian Stewart

MATHEMATICS OF LIFE

Unlocking the Secrets of Existence

Copyright©2011 by Ian Stewart

This Edition Arranged With Profile Books Limited

Through Andrew Nurnberg Associates International Limited.

828588

前 言

从远古时代人类在骨头上刻痕来记录月亮的周期，到现在的人们使用大型强子对撞机寻找希格斯玻色子，数学理论和数学实践一直都是齐头并进的。艾萨克·牛顿的微积分打开了通往科学天堂的大门，在过去的三个世纪里，牛顿的后继者们建立了物理学的科学体系，包括热学、光学、声学、流体力学，以及后来的相对论和量子理论。数学思维已经成为物理科学的中心范式。

然而，直到今天，生物学仍然无法像物理学那样利用数学。在生物学中，数学充其量只能算是一个奴仆。它只被用来执行一些例行计算，或者计算统计结果的显著性。它从来没有为生物学提供基础性的观点或见解，也从未启发生物学家创造伟大的理论，或者开展伟大的实验。大多数时候，它仿佛并不存在。

如今，这样的局面正在改变。现代生物学的一些发现揭示了一系列重要的问题，许多问题如果没有数学的介入就不可能得到圆满的解答。如今的生命科学用到了数量庞大的数学概念，而这些应用反过来也刺激着数学家们发明全新的数学，特

别是针对生命过程的数学。数学家和生物学家正在联手解决一些有史以来最为困难的科学问题——包括生命的性质和起源。

生物学将成为 21 世纪数学研究的前沿领域。

从人类基因组计划，到病毒的结构和细胞的构造，再到生命个体的形式和行为，以及它们在整个生态系统中的关联，《生命之数》将向读者展示数学和生物学之间早已存在的丰富多彩的联系。它还将向读者揭示，数学如何为复杂的演化问题提供新的线索。这些问题之所以困难，是因为一些重要的生物演化进程相当缓慢，以至于我们难以察觉，还有一些演化发生于数亿年前，现在只残存一些神秘的蛛丝马迹。

最初，生物学是一门有关动物和植物的科学，然后是有关细胞的科学；现在，它更多的是一门有关复杂分子的科学。为了反映人们对生命之谜的科学思考的变化历程，本书将沿着学科历史的发展脉络，首先介绍日常层面的生物学，然后是颇受生物学家关注的生物微观结构，最后关注“生命的分子”，即 DNA。

本书前三分之一篇幅的主角是生物学，但数学也会在这些章节出现。通过回顾从维多利亚时代至今人们在植物中发现的几何问题，我们将看到生物学如何启发数学家们提出新的数学思想。一旦读者了解了足够多的生物学背景，数学将会成为本书的主角，我们将从原子尺度的生物学入手，再回到我们熟悉的人类尺度，比如草、树、羊、牛、猫、狗……和人。

这里的数学将涉及多个领域，包括概率论、动力学、混沌理论、对称性、网络、力学、弹性理论——甚至是纽结。

所论述的内容都是数学在生物学上的主流应用，包括：协调生命复杂过程的复杂分子的结构和功能；病毒的形状；（今天仍在上演的）导致生命多样性形成的演化博弈；神经系统和大脑的运转；生态系统的动力学。此外，我还将从数学的角度探讨生命的本质和外星生命存在的可能性。

数学和生物学之间的互动是最热门的科学领域之一。它在很短的时间内取得了非常丰硕的成果。只有在未来，人们才能发现数学和生物学的结合能够走多远。但有一件事情我现在就能确定：这一定是一次激动人心的旅程。

伊恩·斯图尔特

2010年9月于考文垂

目 录

前言 i

- 1 数学和生物学 001
- 2 小得不能再小的生物 017
- 3 长长的生物列表 039
- 4 在花儿中寻找斐波那契数 051
- 5 物种起源 075
- 6 修道院的花园 105
- 7 生命的分子 125
- 8 生命之书 153
- 9 分类学家，请饶了那棵树吧 171
- 10 来自四维空间的病毒 191
- 11 隐藏的线网 219
- 12 纽结与折叠 251

- 13 斑点与条纹 273
- 14 蜥蜴的游戏 293
- 15 网络机遇 339
- 16 浮游生物悖论 355
- 17 什么是生命? 377
- 18 地球之外是否还有生命? 399
- 19 第六次革命 439
- 附注 445
- 译名对照表 459
- 图片来源说明 470

1

数学和生物学

生物学过去是一门有关植物和动物的科学。但是，经历了五次伟大的革命后，科学家们对生物学的看法已经发生了很大的转变。

而第六次革命正在上演。

前五次革命指的是：显微镜的发明、地球生物的系统分类法的形成、进化论的提出、基因的发现和 DNA 结构的发现。我们将逐一介绍这些革命，最后再谈谈富有争议的第六次革命。

显微镜

300 年前显微镜的发明可谓生物学的第一次革命。借助显微镜，我们仅凭肉眼便可以发现，即使是那些最微小的生物，也具有令人吃惊的复杂结构。更确切地说，借助这种新的仪器，更加复杂的生物结构进入了我们肉眼的感知范围。

显微镜的发明也使我们意识到，生物个体的内部具有惊

人的复杂性。人们惊异地发现，生物都是由细胞组成的，这些细胞像是一个个小袋子，里面装着各种各样的化学物质，这些化学物质通过袋子外的膜进出细胞。有些生物虽然仅包含一个细胞，但其结构也相当复杂，因为一个细胞就是一个完整的化学系统，这个系统绝不简单。还有很多生物都是由规模庞大的细胞群构成的，例如你的身体大约包含 75 万亿个细胞，每一个细胞都是一台微小的生物机器，有着自己的遗传基因装置，以控制自身的复制或死亡。细胞共有 200 多种类型，包括肌肉细胞、神经细胞、血细胞等。

在显微镜被发明后不久，细胞就被发现了：因为一旦可以将一个有机体放大许多倍，你一定不会错过这些细胞。

分类法

开启第二次生物学革命的是卡尔·林奈 (Carl Linnaeus)，瑞典植物学家、动物学家和医生。1735 年，其史诗般的作品《自然体系》(*Systema Naturae*) 问世了。该书的名字非常长，英文全名为 *The System of Nature Through the Three Kingdoms of Nature, According to Classes, Orders, Genera and Species, with Characters, Differences, Synonyms, Places* (《涵盖自然界三大领域的自然体系，基于纲、目、属、种，以及其特征、差异、相似性和分布的分类》)。出于对自然界的独特兴趣，林奈决心给所有的物种分门别类。该书的第 1 版只列出了 11 页的物种名录；而到了第 13 版，

这个名录增加到了 3000 页。林奈明确表示，他并不试图揭示自然界存在的秩序；他只是试图以一种系统化、结构化的方式，将存在于这个世界上的各个物种进行分类。他将自然物划分为五级：界（Kingdom）、纲（Class）、目（Order）、属（Genus）、种（Species）。他所定义的三个界是指：动物界、植物界和矿物界。他的工作奠定了分类学的基础。

矿物现在已经不再按照林奈设定的体系来分类，人们将他的分类体系在细节上做了修正，以适用于植物界和动物界。虽然最近有些学者提出了几种系统，试图替代林奈的分类体系，但没有一种得到广泛承认。当年林奈意识到了生物分类对科学的重要意义，并把他的想法付诸实践。他偶尔也犯错误，例如，最开始他认为鲸鱼属于鱼类。但在 1758 年第 10 版的《自然体系》中，这一错误得到了纠正，因为一位研究鱼类的朋友向林奈指出：鲸鱼是哺乳动物。

林奈体系中最著名、最有用的贡献是“双名法”（double-barrelled names）的应用，比如智人的学名为 *Homo sapiens*，家猫为 *Felis catus*，¹ 欧乌鸫为 *Turdus merula*，夏栎为 *Quercus robur*。分类的重要作用不在于给出一份清单，或者创造一些佶屈聱牙的拉丁名以显示你的博学，而是在于为所有生物设置逻辑鲜明的分类标准。物种的俗称，比如乌鸫，是无法起到分类效果的，因为“乌鸫”一词过于笼统，人们无法确定它指的是欧乌鸫、灰翅鸫、印度乌鸫、藏鸫、白颈鸫，抑或是在美洲发现的 26 种乌鸫（统称为新世界乌鸫 [New World blackbird]）。但如果采用双名法，*Turdus*

merula 指代的就是欧乌鸫，不可能产生混淆。

进化论

第三次革命酝酿了很长一段时间，直到 1859 年达尔文出版了《物种起源》(*The Origin of Species*)，这场革命才得以爆发。该书最终出了 6 版。如果要评选从古至今最伟大的科学著作，该书一定可以名列其中，并足以和伽利略、哥白尼、牛顿和爱因斯坦的物理学著作相媲美。在《物种起源》中，达尔文提出了一种新观点，用以解释生命多样性的来源。

在达尔文所处的年代，无论是科学家还是农夫，都认为上帝创造了宇宙万物。地球上的每一种生物自然也是上帝单独创造出来的。在这种观点下，物种不能随着时间的推移而改变：一只羊过去是，现在是，将来也永远是一只羊；一只狗过去是，现在是，将来也永远是一只狗。但是当达尔文在环游世界的旅途中积攒了足够多的科学证据之后，他发现神造万物的观点越来越站不住脚。

养鸽爱好者都知道，刻意的育种过程可以培育出不同品种的鸽子。对于奶牛、狗，乃至所有的家养动物，情况也大抵如此。这些改变都需要人工干预，因为动物显然没有改变自己性状的“意愿”：它们只是被动地接受人们有计划的、精心安排的“选择和淘汰”。达尔文意识到，在没有人工干预的情况下，大自然原则上也可以通过资源竞争使动物发生

类似的变化。在环境恶劣的时候，能够存活下来的动物将有更多机会繁育后代，而它们的下一代也将发生一些细微的改变，以便更好地适应环境。

达尔文认为，相比人工干预产生的变化，自然产生的变化要缓和得多，但大自然有的是时间，不断变化的环境可以导致种群中的个别生物逐渐演化出与之前相比明显不同的外形和习性。他把这个过程看作是无数微小变化的累积。他的地质学经验使他敏锐地意识到，地球已经存在亿万年，所以时间不是问题。经过长时间的积累，即使是非常缓慢的变化，最终也会让生物产生翻天覆地的变化。

达尔文把这个过程称为“自然选择”。今天我们称之为“演化”（evolution），*达尔文当时并没有使用“evolution”这个词，尽管他在《物种起源》一书最后使用了“evolved”。世界各地独立地报道了许多支持进化论的发现，这些证据是如此广泛，以至于如果摈弃进化论，这些生物学现象就根本无法解释。今天，几乎所有的生物学家（以及大多数科学家，无论他们从事何种领域的研究）都有充分的理由认为，演化是形成当今物种多样性的主导机制。但是关于演化的过程，可就不是那么容易说清楚的事情了，其中还有许多未解之谜等待人们去探索。

* 由于历史原因，evolution 一词常被翻译为进化，然而更贴切的翻译应该为“演化”。——本书脚注均为译者注

基 因

第四次革命指的是格雷戈尔·孟德尔（Gregor Mendel）发现了基因。孟德尔在 1865 年发表了他的发现，但直到 50 年后，基因学说才被人们广泛认可。

生物体能够被观察到的特征，如颜色、大小、结构（texture）和形状，叫作性状。达尔文不清楚这些性状是如何从亲代传递给子代的，尽管他能通过几种不同的论证方式推断，这些性状的传递必然发生。其实，当他在写《物种起源》时，已经有人在研究这种遗传机制，但他对此并不知情。如果达尔文意识到了这点，情况会有什么转变？我相信，遗传这个概念必然会对他的学说产生重大的影响。

在 1860 年前后的 7 年时间里，奥地利神父格雷戈尔·孟德尔种出了许多豌豆，足有 29,000 株之多，他还统计出了每一代中具备特定性状的豌豆数目。这些豌豆豆粒或黄或青，或表面光滑或具褶皱，孟德尔在这些观察结果中发现了一些奇怪的数学模式，于是他相信每个生物体内必定都存在着某种“因子”，也就是现在所谓的基因，它决定了生物体本身的许多性状；而且这些基因是从上一代遗传得到的，在有性繁殖的物种中，它们成对出现：一个来自“父亲”（植物的雄性器官），另一个来自“母亲”（植物的雌性器官）。不同的基因决定了不同的性状。等位基因（alleles）的随机组合，使同一种生物展现出不同的性状。

孟德尔对基因的物质形态一无所知，他只是从一些数学模式中间接地推断出基因必然存在。这种数学模式就是：连续两代中具有相同性状组合的植物数量的比例。

DNA 的结构

相比前几次革命，第五次革命显得更加直接，因为它和第一次革命一样，是某项实验技术发明的直接产物。这项新技术就是 X 射线衍射，它使生物化学家有可能搞清楚一些关键生物分子的复杂结构。实际上，它的作用类似于显微镜，可以显示出分子中每个原子的位置。

在 20 世纪 50 年代，弗朗西斯·克里克 (Francis Crick) 和詹姆斯·沃森 (James Watson) 开始尝试揭开一类复杂分子的结构之谜。这类复杂分子存在于几乎所有生物体中，那便是脱氧核糖核酸 (deoxyribose nucleic acid)，它的首字母缩写就是无人不知的 DNA。克里克，英国人，专业是物理学；在撰写博士论文的时候，他被如何在高温下测量水的黏度搞得焦头烂额，于是放弃物理学，于 1947 年转而研究生物化学。沃森，美国人，第一学位是动物学；他特别喜欢研究一种能够感染细菌的病毒，即噬菌体；沃森的人生目标是破解基因的物理本质，即其分子结构。

当时，人们已经知道基因位于细胞中一个被称为染色体的区域内，基因的主要成分是蛋白质和 DNA。生物学家的传统观点是，生物体可以繁殖的原因在于基因是一种能够自

我复制的蛋白质。相比之下，DNA被认为是一种“愚蠢的四核苷酸”，没什么太大作用，其唯一用途是作为支架，将蛋白质结合在一起。

然而，已有一些证据开始表明，DNA是构成基因分子形式，于是关键的问题产生了：DNA分子长什么样？组成它的原子是怎样排列的？

沃森最终和克里克合作。在一些重要的X射线衍射实验的基础上，他们对DNA结构做了分析。值得一提的是，完成这些实验的并非他们本人，而是以莫里斯·威尔金斯（Maurice Wilkins）和罗莎琳·富兰克林（Rosalind Franklin）为代表的科学家。沃森和克里克注意到了实验中几个关键的事实，并依靠他们对这些事实的理解，用硬纸或金属制作了一些形如简单分子的DNA部件，拼搭出了著名的DNA双螺旋结构，即DNA是双链分子，好似两条相互缠绕的螺旋状楼梯。每条链携带一系列碱基，分别由四种不同的分子组成，即腺嘌呤（A）、胞嘧啶（C）、鸟嘌呤（G）和胸腺嘧啶（T）。（详见第130页。）它们总是成对出现：一条链上的A总是连接着另一条链上的T，而一条链上的C总是连接着另一条链上的G。

1953年，克里克和沃森在科学杂志《自然》（*Nature*）上发表了他们的发现。文章一开始写道：“我们想要提出一种脱氧核糖核酸的结构。这种结构具有新颖的特点和重要的生物学意义。”在接近结尾处，他们写道：“我们注意到，假定的配对方式（A和T组合，C和G组合）暗示了一种遗传物质可能的复制机制。”²

这句话非常容易理解：用两条碱基序列中的其中一条就足以确定整个 DNA 的序列结构；另一条链的序列可以由第一条链的互补碱基给出，比如把 A 替换成 T，把 C 替换成 G。如果你能把 DNA 的两条链分开，它们中的任何一条都包含足够的“信息”来重建另一条。你所要做的，就是给它们各自配上一条互补的链，然后将其与互补的链结合在一起，这样你就会得到两个完美的复制品。

仅仅基于一些关键的实验结果，以及摆弄模型的尝试，克里克和沃森就推测出了 DNA 的结构，而且经过检验，他们的猜想竟然是正确的。他们提出的复制机制也是如此。但这一结果仅仅是他们的猜测，所以在发表于《自然》的论文中，他们没敢将它清晰地表述出来，以防它在将来被证明是错的。然而，我们无法直接把两条相互缠绕的螺旋链撕扯开，成功的复制还需要一些相当复杂的机制。至于这些机制是什么，恐怕我们一时半会儿也搞不清楚。

一下子，生物学的关注点全部转移到了关键物质的分子结构上，这些关键物质包括 DNA、蛋白质和其他相关分子。一些大学的生物学院甚至解雇了一些植物学家、动物学家和分类学家，或让他们提前退休，因为不管任何人，只要他还在和“完整的生物个体”打交道，那他就显得过时了。在那个时候，“分子”才是科学界未来的宠儿。事实也的确如此。生物学从此焕然一新。正如克里克于发现 DNA 结构的前几天，在剑桥贝尼特街（Benet Street）一家叫鹰的酒吧所吹嘘的：他和沃森发现了“生命的秘密”。

克里克和沃森的科研突破带动了许多重大的科学进展。