化学史

从“机械模仿”到“化学合成”:人工生命的历史谱系探析

张 毅[1] 冀 朋[2] 廖铂华[3]*

([1]福建省社会主义学院研究室 福州 350000; [2]电子科技大学人文社科高等研究院/科技伦理治理研究中心 成都 611731; [3]福建农林大学乡村振兴学院 福州 350000)

摘 要 人工生命是人类探索生命本质与生命规律的重要研究对象,分析其历史谱系可为厘清相关概念与伦理争议提供有益参考。其发展历程可大致分为四个阶段:古希腊至近代利用自动机重现生命行为的“机械模仿”;18世纪至20世纪中叶在实验室中复现细胞新陈代谢的“化学模拟”;20世纪中叶开启的在硅基介质中探寻生命逻辑的“算法模拟”;以及当前借助合成生物学实现“自下而上”从头合成有机体的“化学合成”。随着“软、硬、湿”三种进路的深度融合,人工生命实践真正实现了从“如吾所识(life as we know)”向“如其所能(life as it could be)”的范式转变。

关键词 生命 人工生命 合成 化学合成 合成生物学

From “Mechanical Imitation” to “Chemical Synthesis”: An Exploration of the Historical Genealogy of Artificial Life

Zhang Yi[1], Ji Peng[2], Liao Bohua[3]*

([1] Office of Academic Research, Fujian Institute of Socialism, Fuzhou, 350000; [2] Advanced Institute of Humanities and Social Sciences/Center for Ethics and Governance of Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731; [3] College of Rural Revitalization, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350000)

Abstract Artificial life represents a vital domain for exploring the fundamental nature and governing principles of life, and tracing its historical genealogy offers indispensable reference for clarifying related concepts and resolving ongoing ethical controversies. Its developmental trajectory can be broadly divided into four stages: the “mechanical imitation” stretching from ancient Greece to the early modern period, characterized by the use of automata to replicate life-like behaviors; the “chemical simulation” spanning the eighteenth century to the mid-twentieth century, marked by laboratory attempts to reproduce cellular metabolism; the “algorithmic simulation” inaugurated in the mid-twentieth century, defined by the pursuit of life’s underlying logic within silicon substrates; and the contemporary “chemical synthesis”, in which synthetic biology enables the bottom-up, de novo synthesis of living organisms. As the “soft,” “hard,” and “wet” approaches to artificial life converge in ever deeper integration, the field has achieved a genuine paradigmatic shift—from the study of “life as we know it” to the exploration of “life as it could be”.

Keywords Life, Artificial life, Synthesis, Chemical synthesis, Synthetic biology

“人工生命”一词源于对英文“artificial life”的翻译,也简称为Alife或A-life。现代意义上的“人工生命”最早由美国计算机与理论生物学家克里斯托弗·兰顿(Christopher Langton,1948—)于1987年提出,他将人工生命定义为“由人而不是自然创造的生命(life made by man rather than by nature)”[1]。1998年,兰顿对这个定义进行了修正并将其定义为——“人工生命:对自然生命的研究,其中自然被认为是包含而非排除人类及其制品(artificial life: the study of natural life,

*联系人,廖铂华 E-mail: fafubioethics@foxmail.com

国家重点研发计划项目(2025YFC2608200)和福建省社科基金青年项目(FJ2025C032)资助

2025-12-31收稿,2026-04-23接受

where nature is understood to include rather than to exclude, human beings and their artifacts)"[2]。

在当代,谈及人工生命这一概念时,至少会涉及三个维度:"软"——利用计算机程序模拟或创造类似于生命的行为;"硬"——利用硬件器械研究制造类生命系统;"湿"——在实验室中使用生化材料进行类生命系统创造[3]。随着生成式人工智能(软)、具身智能(硬)以及合成生物学(湿)等前沿科技高速发展,"人造物"与"生命"之间的界限似乎变得愈加模糊,围绕"人工智能是否能够拥有意识[4]""人工创造的类生命体是否享有道德地位[5]""人类是否有权扮演造物主[6]"等问题,学界提出了大量截然不同的观点,由此引发的伦理和社会争议也日趋激烈。在此背景下,通过对人工生命从古至今演变历史的全面梳理,有助于理解人类是如何在不同维度上重塑"生命"与"非生命"之间的"界限",进而为当今不同类型人工生命的规范与治理提供具有历史深度的参考与启示。

当前国内关于人工生命历史的研究极为有限,相关研究仅在针对某一类型人工生命的哲学讨论中偶有提及,包括人工生命思想的历史渊源[7]、计算机程序模拟生命的起源与发展[8]、合成生物学的科学技术史回顾[9]等。鉴于此,本文尝试在统一的历史框架下,针对人工生命的发展历程进行深入研究。通过考证,本文认为人工生命的历史谱系可以大致分为"机械模仿""化学模拟""算法模拟"以及"化学合成"四个主要阶段。

1 自动机中的机械模仿

虽然现代人工生命定义的提出不过大约三十余载,但历史上关于人工生命的实践自古希腊罗马时期就已经开始并延续至今[10]。将人工生命的历史追溯到古希腊罗马时期似乎是奇怪的,但如果从兰顿修正后的人工生命定义出发,我们会发现那些人工设计制造并且展现出类生命行为的物理仿生机械就是人类对人工生命实践的最早尝试。

自古以来,人类就渴望能够创造出模仿和再现生命运动现象的精巧机械,"自动机(automata)"一词就是被用来描述内部包含能够产生运动和模拟生命机制的机械形式机器[11]。"自动机"一词早在古希腊诗人荷马(Homer,约公元前 9 世纪—前 8 世纪)撰写的《伊利亚特》和《奥德赛》中就已经被频繁使用,包括:"自动三脚架(automatic tripod)""自适应风箱(adaptive bellows)""赫菲斯托斯制造的女机器人(the female robots of Hephaestus)",以及"费阿克斯人的自动船(ship of Phaeacians)"等[12]。

希腊化时期,关于自动机的研究得到了进一步发展。公元前 4 世纪中叶,古希腊毕达哥拉斯主义者阿基塔斯(Archytas,公元前 428—前 347)设计并制造出了历史上第一个自动推进的飞行装置,这是一种由蒸汽喷射推动的鸟形模型(又称为"阿基塔斯的鸽子")[13]。公元前 2 世纪左右,拜占庭的费隆(Philo,公元前 280—前 220)著有《机械原理手册》(*Mechanike Syntaxis*)和《气体力学》(*Pneumatics*),他在这些著作中提及了一些与人形机械有关的内容[14]。罗马帝国时期,希罗(Hero,公元 10—70)是这一时期自动机研究的典型代表,他在著作中描述了人形机械的设计与制造,并举例说明了自动机是如何在无人工干预的情况下自动运行的原理[15]。

随着罗马帝国灭亡,自动机研究在西方陷入停滞。但在东方,古希腊罗马时期的著作不断被翻译为阿拉伯文,自动机研究在阿拉伯世界继续发展。公元 10 世纪左右的著名伊斯兰学者伊斯梅尔·加扎利(Ismail al-Jazari,1136—1206)是其中的典型代表,通过巧妙利用液压、杠杆、滑轮等机械,他设计并制造出了许多全新的、各部分可以自主移动的机械装置,同时他撰写了《精巧机械装置的知识之书》(*Kitáb fí ma' rifat al-hiyal al-handasiyya*),书当中详细描绘了各种自动机的运行和工作原理[16]。

直到 15 世纪前后,随着文艺复兴与宗教改革运动的兴起,费隆和希罗等人的著作由阿拉伯文被翻译为拉丁文而再次被西方世界所知,关于自动机和人形机械的研究也在西方得到复兴。达芬奇的机器人(Leonardo's robot)是由列奥纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci,1452—1519)于 1495 年前后设计并建造的一个人形机器人,整个机器人由一系列滑轮和缆绳进行操作,能够做出诸如站立和坐下等类似于人类的动作[17]。到了 18 世纪,法国著名发明家雅卡尔·德·沃康松(Jacques de Vaucanson,1709—1782)基于机械学、生理学、解剖学相结合的方法,设计出了著名的人形机器人"长笛手(the flute player)""管乐演奏者(the pipe player)"以及更为复杂的可模拟真实鸭子进

食、消化和排便过程的“会消化的鸭子(the digesting duck)”[18]。

对于自动机和人形机械的持续研究,深刻影响了近代早期关于生命本质的认识。通过对生物外形、运动和局部功能的模仿,在一定程度上促成了近代“机械论”生命观的形成。然而,随着解剖学、生理学以及早期化学研究的推进,学者们逐渐意识到,生命并不只是外部运动形式的重复,更涉及物质代谢、生长发育、自我维持以及组织再生等一系列内在过程,而这些过程并不能通过齿轮、杠杆、发条等机械装置进行还原[19]。

换言之,自动机所实现的主要是对生命“外在表象”的模仿,而不是对生命“内在机制”的复现。在这一意义上,机械模仿虽然开启了人工生命最早的实践形态,但同时也暴露出了其局限与不足。它能够说明生命如何运动,却难以回答生命何以生成、何以维持,以及生命特有的秩序如何在物质层面得以建立。这种对生命“由外向内、由表入里”的探索诉求,使得人工生命实践开始从对生命运动形式的关注,转向对生命物质组成的研究,机械问题由此转化为化学问题。

2 实验室中的化学模拟

18 世纪末至 19 世纪初,以法国化学家安东尼·拉瓦锡(Antoine Lavoisier,1743—1794)掀起的“化学革命”为标志,近代化学的突飞猛进为人类认识和理解生命提供了新的方法论指南,同时也开启了人工生命实践的新篇章。化学作为一门研究物质组成、结构、性质及其变化规律的科学,天然契合了探索生命内部物质组成与转化的研究需要。实验室中的化学模拟,即利用无机或有机的非生命化学物质,借助化学反应、渗透、自组装等物理化学过程,在结构形态与微观运动上复现、模仿与验证自然活细胞的生命现象,逐渐成为这一时期人工生命实践的新范式[20]。

1828 年,德国化学家弗里德里希·维勒(Friedrich Wöhler,1800—1882)发现将氯化铵和氰酸银两种无机化合物进行反应后能够生成尿素——一种之前只在动物尿液中才存在的有机化合物[21]。尿素的人工合成预示了自然生命现象或物质可以在化学实验室中进行复现。1864 年,德国化学家莫里茨·特劳贝(Moritz Traube,1826—1894)观察到放入单宁酸中的明胶(主要成分为蛋白质)表面会形成一层膜,这层膜能够阻止明胶在单宁酸溶液中的扩散并保证水分子的自由进出。特劳贝敏锐地意识到明胶的这一性质与活细胞中半透膜的性质相似,于是利用明胶制作出了一套半渗透系统来模仿活细胞的新陈代谢,特劳贝称这套系统为“人工细胞生成(artificial cellular formation)”[22]。他还设计了一套“无机人工细胞”——利用氯化铜和亚铁氰化铜制成的半透膜系统,该膜可渗透水但不能渗透铜离子、亚铁氰化物、蔗糖等其他溶质[23]。特劳贝所谓的“细胞”显然与生物学意义上的细胞不同,但这可能是历史上首次利用无机物质合成活细胞的一个尝试。在完成半透膜系统的构建之后,特劳贝认为他的无机细胞是生命力量(living force)在生物和化学领域普遍存在的证据,这也对当时流行的活力论生命观造成了一定冲击。

1892 年,德国动物学家约翰·贝兹利(Johann Bütschli,1848—1920)描述了利用橄榄油和钾盐的混合物制作出的一个类似于阿米巴原虫(amoeba)的人工细胞模型[24]。贝兹利创造的人工细胞模型实质是一个水油混合的液滴(droplet)系统,但由于其逼真的性质使其成为当时人们研究人工细胞的一个典范。首先,液滴能够四处流动产生了类似于阿米巴原虫伪足的运动效果;其次,较小的液滴相遇后能够聚合,这也与阿米巴原虫的二分裂生殖有相似之处;最后,该液滴系统还具有类似于真实生命的生长死亡周期(在液滴形成的早期阶段能够快速移动并能够吞噬环境中的其他颗粒,约 30 分钟后该液滴系统则变为静止的结晶)[25]。贝兹利的人工细胞模型引发了人们对细胞内结构和物质的研究兴趣,这一模型也为进一步研究生命的复杂性提供了一个有力的实验工具,推动了细胞生物学和生命起源研究的发展。

1904 年,墨西哥生物学家阿方索·埃雷拉(Alfonso Herrera,1868—1943)创立了一门名为原生质发生学(plasmogeny)的实验科学,“plasma”意为细胞中的原生质胞浆,“-geny”是希腊语后缀,意思为“发生”或“发展”,埃雷拉将原生质发生学定义为研究细胞起源的实验科学[26]。埃雷拉一生都对生命起源问题十分感兴趣,从创立原生质发生学开始到其最终逝世的四十多年时间里,他尝试使用多种不同材料进行研究和探索。早期他主要利用橄榄油、氢氧化钠水溶液和汽油的混合物等进一步改良了贝兹利的实验,制造出了更为精巧的人工细胞模型[27]。1942 年,他以

甲醛、氯化铵和硫氰酸盐为材料,制造出了著名的“埃雷拉的硫化物(Herrera’s sulphobes)”,在显微镜下“埃雷拉的硫化物”能够展现出许多类似于细胞中原生质的结构和活动[28]。“埃雷拉的硫化物”是如此逼真,以至于当时的显微镜学家一度将其认定为活物,并按照当时的生物分类学标准对其进行了分类[29]。

依照现在的标准来看,当时的科学家们在化学实验室中的工作是粗糙而原始的,其依然延续了 18 世纪之前对生命特征和属性进行模仿的做法。但与之前仅限于对生命宏观机械运动进行模仿的自动机不同,科学家们在实验室中利用化学方法完成了对天然活细胞新陈代谢的部分模拟。尽管各类人工细胞模型与真实活细胞之间仍然存在巨大差异,但利用非生命物质来模拟生命的做法不仅启发了人们对生命本质的探索,也为后来更深入的人工生命实践奠定了基础。

到了 20 世纪中叶,伴随着两项巨大科学技术突破——计算机的发明与 DNA 双螺旋结构的发现,人们逐渐认识到,生命的本质不仅关涉物质组成,更关涉隐藏在这些生物大分子中的“信息”。这深刻改变了生命科学的轨迹,也为一种全新介质的人工生命实践奠定了认识论基础。

3 计算机中的算法模拟

1945 年,人类历史上第一台通用电子计算机“ENIAC”诞生。正如分子水平的发现揭示了生命的遗传与演化是由离散的化学碱基(A、T、C、G)按照特定规则进行排列和表达。早期的计算机科学家开始设想:既然自然生命本质上依赖于化学分子的编码与传递,那么是否可以在计算机的“硅基介质”中,用算法来抽象和模拟这种基于微观化学规则的生命过程? 在这种“生命即信息”的思想启发下,人工生命实践的信息科学范式就此诞生。

“人工生命”的现代定义虽然由兰顿提出,但利用计算机去模拟生命的想法最早可以追溯到美籍匈牙利计算机科学家约翰·冯·诺伊曼(John von Neumann,1903—1957)。诺伊曼于 1948 年提交了名为《自动机的一般逻辑理论》(*The General and Logical Theory of Automata*)的会议论文[30],该论文是后来计算机人工生命实践中极其重要的一个算法程序——“细胞自动机(cellular automata)”的思想来源。他设想存在这样一台能够完全复制自身的机器,机器由构建器、复制器、控制器以及指令组成,这样的机器漂浮在一个充满该机器零部件的池塘当中,通过给定一个关于该机器自我描述的指令,该机器就能通过池塘中的零部件来复制自己,而子代机器只要从亲代那里复制一份关于自身的描述,这样后代机器就能够一直繁殖下去[31]。到了 1952 年,诺伊曼在此基础上正式提出了细胞自动机的设想——一个在二维平面上具备演化功能的自动机程序雏形,它是由若干个排列在网格结构之上的、能够根据规则变化自身状态值的“细胞”组成,而每一个“细胞”所要遵循的规则往往又与周围相邻“细胞”自身的状态值有关[32]。

受到诺伊曼的启发,英国数学家约翰·康威(John Conway,1937—2020)从 1968 年开始利用计算机测试不同规则下的细胞自动机变化,并于 20 世纪 70 年代将其编制成一款名为“生命游戏(game of life)”的程序[33]。通过改变程序的初始参数设置,就能够在屏幕上产生不同图案,甚至只要初始参数设置得当,在屏幕中就能够显现出近似于生物群体的生存繁殖规律[34]。到了 20 世纪 80 年代,英国科学家史蒂芬·沃尔夫勒姆(Stephen Wolfram,1959—)通过对细胞自动机程序的研究,发现其可以呈现出以下四种状态:(1)细胞自动机最终呈现均质状态;(2)细胞自动机呈现周期性变化;(3)细胞自动机呈现混乱的非周期性变化;(4)细胞自动机呈现出没有明显周期性变化但又同时具备局域化和持续性的复杂模式,并且其中某些模式还展现出类似于真实生命才会有的繁殖子代、复制自身和不断传播的特性[35]。

其中,第四种细胞自动机引起了兰顿的研究兴趣,他认为其状态既不同于(2)的规律性变化也不同于(3)的完全混乱,处于一种介于秩序与混乱之间的中间状态,兰顿将这种状态称为“混沌边缘(edge of chaos)”[36]。他认为生命是以复杂性和信息动态过程为特征的,而生命起源的那种信息过程一定是在混沌边缘的状态下诞生的[37],因为这种状态同时避免了一成不变(规律的周期性变化)与完全失控(混乱的非周期性变化),生命因此有了无限可能。既然计算机可以创造混沌边缘的条件,而生命又是在混沌边缘的状态下诞生的,那么当然就有可能从计算机中创造生命。

计算机算力的提升,进一步促进了计算机人

工生命实践的发展。1990年,美国生态学家托马斯·雷(Thomas Ray,1954—)开发了名为“Tierra”的程序,该程序能够模拟生态系统中物种的突变、繁衍和竞争[38]。到了21世纪初,密歇根州立大学的研究团队开发了更为复杂的“Avida”软件平台,科学家们利用该平台首次在计算机中直观证明了复杂的生物学特征是如何通过达尔文式演化在“数字生命”中涌现的,该成果发表在《自然》杂志上[39]。2012年,斯坦福大学研究团队实现了人类历史上首次对一个完整活细胞(蕈状支原体,*Mycoplasma genitalium*)全生命周期的计算机模拟,该模型不仅能准确重现各种已有的实验数据(如细胞生长速度、物质组成比例等),还能预测许多在实验室中极难观察到的微观生理现象,该成果发表在《细胞》杂志上[40]。

进入2020年以后,以大语言模型(large language models,LLM)为基础的生成式人工智能(generative artificial intelligence,GenAI)开始出现,为计算机人工生命实践带来了颠覆性改变。一方面,AIGC展现出了类生命的“涌现(emergence)”能力。当模型参数量突破一定阈值后,其不仅能进行复杂的逻辑推理,还能自发呈现出早期设计、训练阶段从未出现过的新能力,这种“能力涌现”在复杂系统理论框架下被认为与生命系统的自组织过程具有相似性[41]。另一方面,在人工智能技术的加持下,“虚拟细胞(virtual cell)”开始出现。“虚拟细胞”是一套基于真实生物细胞运行机制和实验数据的规则模型,借助GenAI的算力优势,对实验测得的高通量组学数据进行分析、整合,进而直接构建包含大量真实生物学数据的虚拟细胞算法程序,其能够逼真模拟分子、细胞乃至于组织层面不同状态下的生物学行为[42]。2023年5月,清华大学张学工团队创造出了名为“scFoundation”的虚拟细胞模型,其基于5000万个细胞基因表达数据训练而成,拥有1亿参数,在药物研发领域展现出了卓越应用潜能[43]。

4 生物学中的化学合成

尽管计算机中的算法模拟在重现生命信息逻辑方面展现出了惊人的技术优势,但硅基世界中的“数字生命”终究受限于虚拟电磁空间,缺乏真实的物质实体与物理化学代谢过程。人类要想创造出真正意义上的“人工生命”,就不能仅停留在信息世界的抽象模拟上,必须回到现实物质世界,将抽象的算法程序转化为有形的生化反应。同样在20世纪50年代,就在第一台通用电子计算机诞生后不久,生命科学也迎来了自己的“分子生物学革命”,实验室中的“湿”人工生命同样发生了深刻变革。

早在19世纪,经德国科学家马蒂亚斯·施莱登(Matthias Schleiden,1804—1881)等的努力,现代细胞学说逐步建立和完善;20世纪初亨特·摩尔根(Hunt Morgan,1866—1945)和他的学生在遗传实验的基础上发现了染色体并且提出了“基因”的概念。到20世纪中叶DNA双螺旋结构被发现后,从分子层面认识生命真正成为可能,人们很自然地想到是否可以从分子层面研究乃至于合成绝大多数生命的基本组成单位——细胞。

前苏联化学家亚历山大·奥巴林(Alexander Oparin,1894—1980)因提出著名的“原始汤(primordial soup)”假说而被广为人知。该假说认为原始地球中的碳元素和原始大气中的氢元素发生反应后生成碳氢化合物,它们进一步与氧和氨结合产生羟基和氨基衍生物,这些分子在海洋表面积累,变成凝胶状物质并且尺寸不断增大,最终形成了凝聚体(coacervate,该词最早是指胶体颗粒的聚集,后被奥巴林用来指代自己的人工细胞模型)[44]。奥巴林在20世纪50至60年代间,成功将腺嘌呤类物质的合成反应、辅酶的氧化还原反应以及维生素C的氧化反应等发生在有机体内部的生理生化反应封装进了凝聚体中[45]。尽管他开展这些研究工作的主要目的是探究原始细胞以及生命起源的形成过程,但他的这种研究方法同当代合成生物学在细胞内设计和构建信号代谢通路的方法论已经十分类似。

1953年,在DNA双螺旋结构被发现的同一年,美国化学家斯坦利·米勒(Stanley Miller,1930—2007)通过模拟原始地球中的大气成分,将氨、甲烷、氢气与沸水一起在密封的玻璃容器中混合,然后将整个混合物暴露在放电的环境中,经过1周左右的电击,在混合物中检测到了包括天冬氨酸、丙氨酸和甘氨酸在内的组成人体蛋白质所必须的氨基酸[46]。米勒的实验激发了学者们利用化学合成方法来研究生命起源与物质组成的热情,他们先后以不同方法合成了嘌呤、核苷酸以及聚核苷酸等生物大分子,美国化学家梅尔文·卡尔文(Melvin Calvin,1911—1997)将研究地球历

史早期有机化合物逐步复杂化的过程称为“化学演化”[47]。

1965 年 9 月 17 日,中国科学院生物化学研究所、中国科学院有机化学研究所、北京大学协作完成了结晶牛胰岛素的人工全合成[48]。这是人类历史上首次采用纯化学方法合成出与天然蛋白质分子结构相同,并具有完整生物活性的蛋白质。这一原创性工作,彻底打破了“生命物质只能由生命体自身合成”的传统观念。

1972 年,美国生物化学家西德尼·福克斯(Sidney Fox,1912—1998)发现,通过将氨基酸的混合物加热后可以形成类蛋白物(proteinoid)的多肽链,之后这些肽链会在几分钟内相互作用并自组装成更大的大分子结构,福克斯将其称为“微球(microsphere)”[49]。福克斯的微球比奥巴林的凝聚体更稳定,并且展现出更多也更为复杂的类生命特征。诸如物质在微球内外的双向渗透、部分裂解、渗透变化导致的收缩或膨胀、对 pH 的敏感性(取决于氨基酸的组成)、多聚物的选择性渗透、运动、出芽、增殖生长以及微球之间连接的形成等[45]。

1981 年,中国科学家完成了酵母丙氨酸转移核糖核酸的人工全合成,这同样是在国际上首次通过非生物学途径全合成的一个具有完全生物活性的完整核酸分子[50]。1990 年前后,意大利化学家皮埃尔·路易斯(Pier Luisi,1938~2025)团队利用脂质体(liposomes)和胶束(micelles)构建半透膜囊泡[51],将其作为原始人工细胞的“边界”,成功在这些封闭的囊泡内部包裹了能够进行核酸或多肽合成的酶类与底物,使得生化反应得以在微观的化学隔室中独立进行。由于更接近真实细胞膜的磷脂双分子层结构,其能够呈现出生长、分裂以及跨膜物质交换等动态特征。

20 世纪 90 年代之后,信息科学与生命科学开始呈现融合发展趋势,“软”人工生命与“湿”人工生命开始产生交集。在 1995 年举办的第三届欧洲人工生命会议上,与会学者们提出“人工生命的学科发展与未来生存同生物学领域的人才息息相关”[52]。到了 21 世纪初,合成生物学(synthetic biology)的出现使得人类已经不满足于利用各种介质对自然生命进行模仿,合成生物学的终极目标或需求就是实现人工生命的从头合成(de novo synthesis),即“自下而上(bottom-up approach)”利用设计与合成出的基础生物元件来正向组装构建人工生命[53]。

2002 年 7 月,美国科学家杰罗尼莫·塞罗(Jeronimo Cello,1959—)和他的研究团队合成了脊髓灰质炎病毒的基因组,并且通过实验证明了合成的基因组具有侵染小鼠致其脊髓麻痹后死亡的能力[54]。2003 年美国微生物学家汉弥尔顿·史密斯(Hamilton Smith,1931—2025)等通过化学合成的方式合成了 φX174 噬菌体的基因组[55]。2010 年 5 月,美国生物学家克雷格·文特尔(Craig Venter,1946—)宣布,他和研究团队经过数十年的努力,成功通过化学合成的方式完成了蕈状支原体基因组的人工全合成,并将其植入到蕈状支原体的近亲山羊支原体(*Mycoplasma capricolum*)的细胞质中,人类历史上第一个合成细胞(synthetic cell)——JCVl-syn1.0(又名辛西娅,意译“人造儿”)就此诞生[56]。2011 年来自中国、美国、英国、新加坡和澳大利亚的研究人员共同发起了酵母基因组合成计划(Sc2.0),2023 年末酿酒酵母(Saccharomyces cerevisiae)的 16 条染色体全部实现人工合成,Sc2.0 计划取得圆满成功[57]。

更进一步地,科学家还尝试利用非生命元件(如化学合成的脂质、高分子聚合物、核酸、蛋白质等),从头设计与组装出能够模拟自然活细胞功能与结构的分隔化(compartmentalized)类细胞结构——即人工细胞或原细胞(protocell)[58]。2014 年,意大利科学家团队利用化学合成的脂质体构建出了能够感知环境信号并与大肠杆菌进行胞间信号通讯的脂质囊泡[59]。2018 年,哈尔滨工业大学韩晓军团队构建出了能够自组装的叶绿体基粒(grana-like cisternae stacks),成功模拟了天然细胞器的结构与部分功能[60]。2021 年,湖南大学刘巧玲课题组将人工配体与受体固定到脂质囊泡表面,通过调控人工配受体之间的相互作用,实现了人工细胞之间的信息传递交流[61]。2025 年,中国科学院化学研究所乔燕团队成功构建出了包含亚结构的人工细胞,通过引入类细胞器和人工组织,丰富了人工细胞的结构层次,实现了不同亚区室之间的化学信号处理与传递[62]。

与此同时,GenAI 的出现同样深刻改变了“湿”人工生命的实践范式,科学家们尝试将 GenAI 与合成生物学结合起来,利用“硅基程序算法”指导实验室中的“碳基化学合成”。类似于 ProtGPT2、ProGen、ESM-2 等蛋白质大语言模型开始出现,这些模型通过将自然界中数百万种蛋白

质的氨基酸序列作为“语言”进行深度学习,进而能够设计出大量结构折叠正常、自然界中从未出现过的全新蛋白质分子[63]。这种 GenAI 赋能下的合成实践在近年来取得了突破性进展:ProtGPT2 利用约 5000 万条未注释蛋白质序列完成训练后,能够快速生成与天然蛋白质在“演化距离”上相距较远、但仍遵循天然蛋白质统计规律的全新复杂拓扑结构[64];ProGen 模型在深度学习了 2.8 亿个蛋白序列的基础上,成功设计出了具有生物活性的人工溶菌酶,经人类微调后其催化效率与自然界演化数亿年的天然溶菌酶相当[65];ESM-2 则将模型参数突破性地扩展至了 1500 亿,使得模型能够直接从单条氨基酸序列中推断出原子尺度的蛋白质三维结构,大幅拓展了人类对蛋白质空间结构的认知[66]。从病毒基因组,到原核生物支原体基因组,再到真核生物酿酒酵母基因组,又到结构与功能更复杂的人工细胞,人类合成“生命”的形式、等级和能力不断提升。在化学科学和人工智能技术的加持下,人工生命实践呈现出“遗传物质正交化”“分子结构镜像化”“代谢通路杂合化”的发展趋势:第一种是尝试突破自然界中心法则的局限,通过合成异源核酸(XNA)与非天然氨基酸的方式,构建出全新的“正交生命(orthogonal life)”[67];第二种是尝试进行手性分子对映体的人工合成,创造出与自然生命手性完全相反、不受自然界大多数酶类作用的“镜像生命(mirror life)”[68];第三种是尝试将人工合成的金属酶或非天然化学催化体系引入活体细胞,构建出能够执行非天然化学反应、突破碳基代谢束缚的“杂合生命(hybrid life)”[69]。相信未来在化学和人工智能技术的助力下,自然生命的奥秘必将在人工生命的“合成”中被不断破译,人类对生命本身的理解也将在这一过程中得到进一步拓展甚至重塑。

5 结语

纵观人工生命实践的历史谱系,可以发现这是一条由表及里、由形入质、不断深化的实践进路。从古希腊罗马时期利用机械装置重现生命行为的“机械模仿”,到近代化学革命后在实验室中复现细胞新陈代谢的“化学模拟”;从 20 世纪中叶借助硅基介质推演生命规律的“算法模拟”,再到当代合成生物学尝试从头合成有机体的“化学合成”。人工生命的研究与实践经历了从对自然生命的被动描摹到主动创造的根本性变革。曾经泾渭分明的“软”“硬”“湿”三种进路之间的藩篱正在被消解,碳基生命逻辑与硅基计算逻辑、有机体与机械的边界也逐渐被打破。

以大语言模型为代表的 GenAI 赋予了算法程序类生命的“涌现”特征与逻辑“智能”;而合成生物学则在化学和人工智能技术的加持下,实现了从基因组全合成到人工细胞构建的“工程化”突破。当“硅基算法”开始直接指导“碳基合成”,人工生命实践将向着更加复杂、智能和工程化的方向发展。在这种科学技术的深度会聚之下,人工生命的形态必将超越经典生物学和人类传统认知意义上的生命范畴。在此意义上,人类能够真正实现以兰顿为代表的人工生命先驱所预言的——人工生命通过对地球上“如吾所识(life as we know)”生命的考察,进而创造出“如其所能(life as it could be)”的全新生命[70]。

然而,当真正迈入这种“如其所能”的全新阶段,面对“人造物”与“自然生命”之间本体论界限的彻底消解,人类在欣喜的同时应当更加审慎行事。在拥有“造物主”权力的同时,必然要求要有与之相配的敬畏与智慧。通过对人类数千年来人工生命实践历史的回顾,不仅有助于我们在当前这个“技术重塑生命”的十字路口保持清醒,更有助于为建立具有前瞻性的人工生命治理框架提供理论支点。只有站在历史的坐标之上审视未来,我们才能更好地驾驭这股科技伟力,确保其成为推动人类文明跃升的向上阶梯,而非沦为反噬人类自身的潘多拉魔盒。

参 考 文 献

[1] Langton C. Artificial Life: Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems. Los Alamos: Addison-Wesley, 1989: 1~48.

[2] Aguilar W, Santamarã A G, Froese T, et al. Front. Robot. AI, 2014, 1: 1~15.

[3] Matthen M, Stephens C. Philosophy of Biology. Amsterdam: Elsevier, 2007: 585~603.

[4] 尤洋,刘奇. 理论月刊,2024(7): 15~23.

[5] Witkowski O, Schwitzgebel E. Artif. Life, 2024, 30(2): 193~215.

[6] Carter L, Mankad A. Hobman E. V. Porter N. B. Transgenic Res., 2021, 30(2): 155~167.

[7] 游俊,任晓明. 河北师范大学学报(哲学社会科学版), 2003, 26(5): 50~54.

[8] 李建会. 山东科技大学学报(社会科学版),2006 (3): 1~6.

[9] 张炳照,赖旺生,刘陈立. 中国科学:生命科学, 2015, 45(10): 909~914.
[10] Riskin J. Genesis Redux; Essays in the History and Philosophy of Artificial Life. Chicago: University of Chicago Press, 2007: 85~95.
[11] 徐戈. 新美术, 2019, 40(12): 120~122.
[12] Paipetis S A. The Homeric Automata and Their Implementation. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008: 77~84.
[13] Dalamagkidis K, Valavanis K P, Piegl L A. On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System: Issues, Challenges, Operational Restrictions, Certification, and Recommendation. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012: 11~42.
[14] Ambrosetti N. Cultural Roots of Technology: An Interdisciplinary Study of Automated Systems from the Antiquity to the Renaissance, Doctoral Dissertation of Università Degli Studi Di Milano, 2011.
[15] Cormack L B, Walton S A, Schuster J A. Mathematical Practitioners and the Transformation of Natural Knowledge in Early Modern Europe. Cham: Springer, 2017: 149~165.
[16] Herath D, St-Onge D. Foundations of Robotics: A Multidisciplinary Approach with Python and ROS. Singapore: Springer, 2022: 3~41.
[17] Moran M E. J. Endourol., 2006, 20(12): 986~990.
[18] 王彦雨. 自然辩证法通讯, 2019, 41(10): 114~126.
[19] Grene M. Mechanization of the Heart: Harvey and Descartes. Suffolk: Boydell & Brewer, 2001: 197~224.
[20] Peretó J. J. Mol. Evol., 2016, 83(5): 176~183.
[21] Kauffman G B, Chooljian S H. The Chemical Educator, 2001, 6(2): 121~133.
[22] Liu D. Hist. Stud. Nat. Sci., 2019, 49(5): 504~555.
[23] Ling G N. In Search of the Physical Basis of Life. Boston: Springer, 1984: 3~14.
[24] Hanczyc M. Life, 2014, 4(4): 1038~1049.
[25] Armstrong R, Hanczyc M. Artif. Life, 2013, 19(3): 331~346.
[26] Cleaves H J, Lazcano A, Ledesma Mateos I, et al. Herrera's "Plasmogenia" and Other Collected Works: Early Writings on the Experimental Study of the Origin of Life. New York: Springer, 2014: 177~209.
[27] Negr N A, Alfonso L. J. Biol. Phys., 1995, 20(1): 11~15.
[28] Herrera A L. Science, 1942: 96(2479): 14.
[29] Fox S W. The Origins of Prebiological Systems and of Their Molecular Matrices. New York: Academic Press, 1965: 347~357.
[30] Jeffress L A. Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium. Oxford: Wiley, 1951: 1~41.
[31] 李建会. 生命科学哲学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006: 133.
[32] 邬舒雯,熊明. 逻辑学研究,2022, 15(1): 46~63.
[33] Izhikevich E M, Conway J H, Seth A. Scholarpedia, 2015, 10(6): 1816.
[34] 郭娟,吴迪,赵宪明. 计算机仿真,2007, 24(10): 285~289.
[35] 李建会. 自然辩证法研究,2001(7): 1~5.
[36] Gutowitz H, Langton C. Mean field theory of the Edge of Chaos. Heidelberg: Springer, 1995: 52~64.
[37] 李建会. 生命科学哲学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006: 149.
[38] Langton C, Taylor C, Doyne F, et al. Artificial Life II: Proceedings of the Workshop on Artificial Life. Los Alamos: Addison-Wesley, 1990: 371.
[39] Lenski R E, Ofria C, Pennock R T, et al. Nature, 2003, 423(6936): 139~144.
[40] Karr J R, Sanghvi J C, Macklin D N, et al. Cell, 2012, 150(2): 389~401.
[41] Gao C, Lan X, Li N, et al. Humanit. Soc. Sci. Commun., 2024, 11(1): 1259.
[42] Bunne C, Roohani Y, Rosen Y, et al. Cell, 2024, 187(25): 7045~7063.
[43] Hao M, Gong J, Zeng X, et al. Nat. Methods, 2024, 21(8): 1481~1491.
[44] Lazcano A. Cold Spring Harbor Perspect. Biol., 2010, 2(11): a002089.
[45] Rasmussen S, Bedau M A, Chen L, et al. Protocells: Bridging Nonliving and Living Matter. Cambridge: The MIT Press, 2008: 2~17.
[46] Mcnichol J B. Mol. Biol. Educ., 2008, 36(4): 255~261.
[47] 胡文耕. 哲学研究,1982(5): 53~61.
[48] 熊卫民. 生命科学,2015, 27(6): 692~708.
[49] Fox S W, Dose K. Molecular Evolution and the Origin of Life. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1972.
[50] 王贵海,熊卫民. 科学文化评论,2007(6): 90~104.
[51] Luisi P L, Varela F J. Orig. Life Evol. Biosph., 1989, 19(6): 633~643.
[52] Husbands P, Harvey I. Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life. Cambridge: MIT Press, 1997: 28~35.
[53] Singh V, Show P L. Biomanufacturing for Sustainable Production of Biomolecules. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 17~44.
[54] Cello J, Paul A V, Wimmer E. Science, 2002, 297(5583): 1016~1018.
[55] Smith H O, Hutchison C R, Pfannkoch C, et al. PNAS., 2003, 100(26): 15440~15445.
[56] Gibson D G, Glass J I, Lartigue C, et al. Science, 2010, 329(5987): 52~56.
[57] Zhao Y, Coelho C, Hughes A L, et al. Cell, 2023, 186(24): 5220~5236.
[58] Xu C, Hu S, Chen X. Mater. Today, 2016, 19(9): 516~532.

(下转第 864 页)

~222.
[12] Chen M, Guan J. Chem. Eng. J., 2024, 500: 157080.
[13] Cao X, Wang T, Jiao L. Adv. Fiber Mater., 2021, 3(4): 210~228.
[14] Bhatti A L, Tahira A, Gradone A, et al. Electrochim. Acta, 2021, 398: 139338.
[15] Saddeler S, Hagemann U, Bendt G, et al. ChemCatChem, 2024, 16(6): e202301327.
[16] Koppisetti H V, Ganguli S, Ghosh S, et al. Chem. Asian J., 2021, 16(8): 988~998.
[17] Li Y, Li F M, Meng X Y, et al. ACS Catal., 2018, 8(3): 1913~1920.
[18] Lu Y, Fan D, Chen Z, et al. Sci. Bull., 2020, 65(6): 460~466.
[19] Haase F T, Ortega E, Saddeler S, et al. Energy Environ. Sci., 2024, 17(5): 2046~2058.
[20] Ren Y, Li X, Sun X, et al. Chem. Commun., 2025, 61(96): 19080~19083.
[21] Li C, Ye B, Ouyang B, et al. Adv. Mater., 2025, 37(28): 2501381.
[22] Li H, Wang S, Du Y, et al. ACS Catal., 2026, 16(3): 2761~2776.
[23] Zhang J, Yan Z. J. Fuel Chem. Technol., 2023, 51(5): 571~579.
[24] 杜瑞成, 王小玉, 李燕. 化学通报(中英文), 2024, 87(5):598~604.
[25] He Q, Han L, Tao K. Chem. Commun., 2024, 60(9): 1116~1119.
[26] 徐洋. 可调层状双氢氧化物自支撑钴铁催化剂促进碱性电解水析氢机理研究. 浙江大学博士学位论文,2025.
[27] 樊晓晔, 梁海欧, 白杰. 化学通报(中英文), 2025, 88(2):212~218.

(上接第 890 页)

[59] Lentini R, Santero S P, Chizzolini F, et al. Nat. Commun., 2014, 5(1): 4012.
[60] Li Q, Han X. Adv. Mater., 2018, 30(25): 1707482.
[61] Yang Q, Guo Z, Liu H, et al. J. Am. Chem. Soc., 2021, 143(1): 232~240.
[62] Ji Y, Lin Y, Qiao Y. Nat. Chem., 2025, 17(7): 986~996.
[63] Guo F, Guan R, Li Y, et al. Natl. Sci. Rev., 2025, 12(4): nwaf028.
[64] Ferruz N, Schmidt S, Höcker B. Nat. Commun., 2022, 13(1): 4348.
[65] Madani A, Krause B, Greene E R, et al. Nat. Biotechnol., 2023, 41(8): 1099~1106.
[66] Lin Z, Akin H, Rao R, et al. Science. 2023, 379(6637): 1123~1130.
[67] Zhao H, Zeng A. Synthetic Biology — Metabolic Engineering. Cham: Springer, 2018: 301~315.
[68] Wang Z, Xu W, Liu L, et al. Nat. Chem., 2016, 8(7): 698~704.
[69] Baltieri M, Iizuka H, Witkowski O, et al. WIREs Cogn. Sci., 2023, 14(6): e1662.
[70] Shanken E A. Leonardo, 1998, 31(5): 383~388.