

## 世界经济论坛：加速生物制造革命

中国科学院上海营养与健康研究所  
上海生命科学信息中心  
上海市生物工程学会  
2022年9月

# 世界经济论坛：加速生物制造革命

**编者按：**合成生物学领域的快速发展使 DNA 合成和测序等生物工程操作的成本显著降低，增加了部署可持续、可扩展和创新生物制造解决方案的机会，与制造业的相关性也越来越强。世界经济论坛(WEF)召开了系列研讨会，并于 2022 年 2 月发布《加速生物制造革命》(Accelerating the Biomanufacturing Revolution) 白皮书，探讨了生物制造领域随着技术进步的发展趋势，旨在确定加速生物制造业可持续发展和未来创新所需的关键合作及相关措施。

## 1. 生物制造：促进创新、实现可持续发展目标并增强生物安全

生物一直是地球上最强大的制造力量之一。每个生物体都能编码详细的指令，这些指令可以实现原子级精度的自组装，并具有自我复制和扩展的自然能力。几十亿年来，虽然生物学一直是塑造世界最有形的自然力量，但直到上个世纪，人们才对遗传密码——生命的潜在“编程语言”有所了解。

### 1.1 什么是生物制造？

生命科学的最新进展带来了不同垂直市场的增长，目前有许多应用在使用，还有更多的程序正在开发中（表 1）。生物制造广义上是指利用生物系统改造产品或服务的价值链的组成部分。这种定义可以应用于生产的很多方面：例如，在农业中，传统的生物制造是通过植物将阳光、土壤和水转化为营养食品。在生物技术领域，生物制造最常见的认知是通过液体细胞培养罐中的发酵过程进行药物生产（例如胰岛素和疫苗原料），类似于啤酒厂的设施。液体发酵是当今大多数现代生物制造中最常见的方法。目前，已经在开发利用固态发酵生产更复杂的生物组织，例如用于培养人体移植用的合成器官和实验室生长的肉制品等。

表 1 跨行业的生物制造

	10 年期间的新兴应用
人类健康	— 实现快速应对大流行的核酸疫苗开发技术 — 干细胞来源的可移植器官
农业&食品技术	— 大规模生产低成本养殖肉类原料，用于取代动物源性替代品

	— 优化作物微生物群，提高生长指标
消费品&服务	— 通过肠道和皮肤微生物治疗进行定制化的个人护理和营养服务
化学品&材料	— 为塑料和动物衍生材料提供创新的可持续替代品的高性能生物聚合物
可持续性	— 大气中二氧化碳的生物分离 — 污染废水的生物修复

## 1.2 发展趋势

在人类基因组计划 27 亿美元的总预算中，测序和组装的成本估计在 5-10 亿美元。过去的 20 年里，DNA 测序和合成技术取得了重大进展，使得今天同等工作的成本不到 1000 美元。美国国家人类基因组研究所绘制了每个人类基因组随时间变化的成本，结果显示与摩尔定律一致。这样的结果表明，生物学和计算机在成本、可编程性和可扩展方面日益相似（图 1）。计算原理和生物学之间的这种交叉在合成生物学中得到体现。

此外，新的合成生物学初创公司出现的频率越来越高。2021 年前三个季度，合成生物学初创公司积累了有史以来最高的 150 亿美元的风险投资，并成为生物经济领域的先驱，它们正在利用自动化和高级分析等越来越先进的技术和制造解决方案来优化开发并实现新的应用。

Ginkgo Bioworks 等公司的目标是建立规模经济，以便系统地降低工程成本，并将这一趋势描述为“Knight’s Law”（图 1），这与半导体行业的摩尔定律类似。正如摩尔定律先于计算机革命，Knight’s Law 是生物制造革命即将到来的信号。

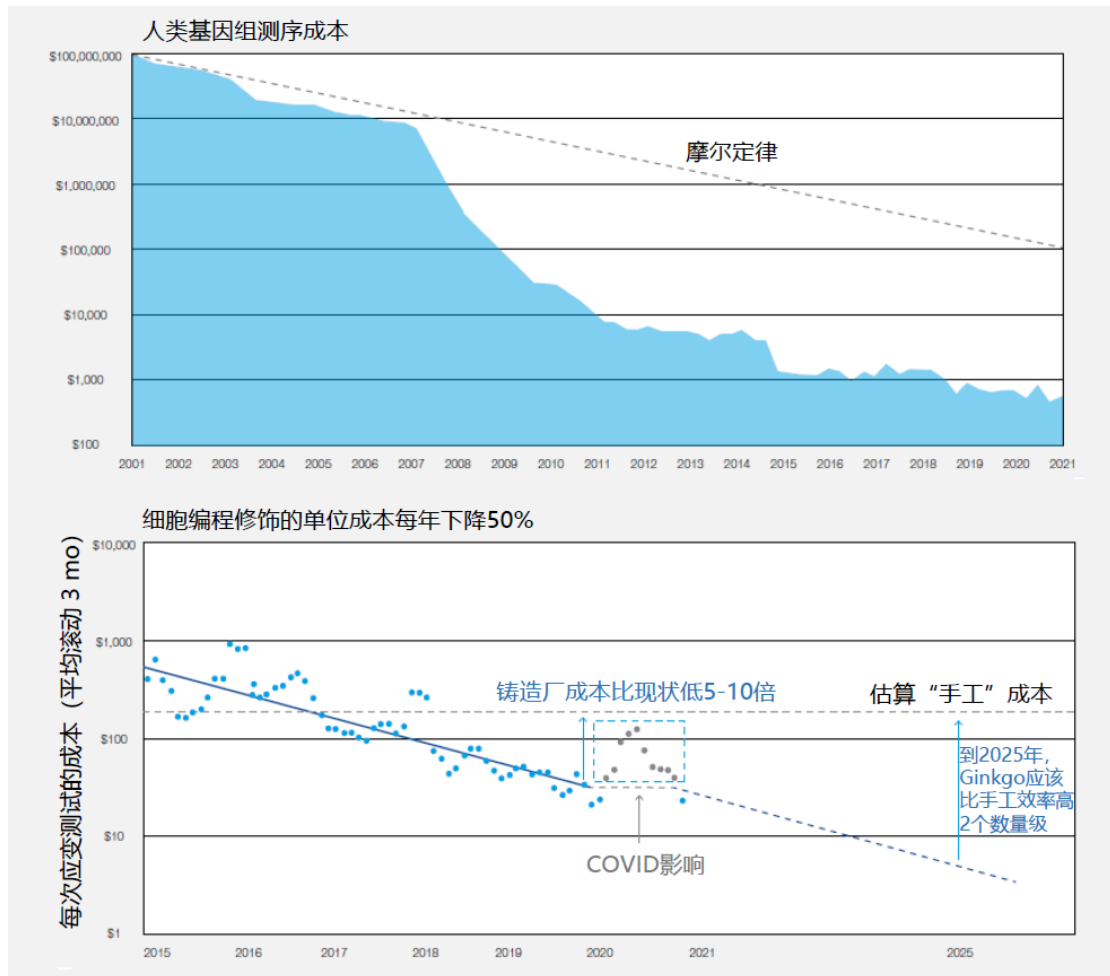


图 1 成本趋势（2021 年）

### 1.3 生物制造的前景

根据麦肯锡全球研究院的数据，10-15 年后的生物经济，每年可以创造 4 万亿美元的价值，多个领域都有潜在增长。

#### (1) 促进创新

由于成本问题，传统生物制造技术受高成本/低产量商品（如药品）或低成本/高产量的化学品市场（如生物乙醇）的限制。生物制造能力的提高正在逐渐改变新细分市场的价值主张，这些细分市场涵盖了更广泛的经济实体的投入。事实上，全球经济中预计将有多达 60% 的实体投入可能来自生物制造业。此外，生物制造降低商品销售成本的同时可以加速产品创新/性能，从而重新确定成本目标。个人护理、营养、食品与材料都已经看到了更高效生产方式的创新，以及崭新的、增强的价值链的发展。近年来，阿迪达斯、香奈儿和泰森食品等主要消费品牌都在布局新生物制造开发应用的计划。

## **(2) 解决可持续性目标**

新的应用有望在未来 10-20 年内解决一些重大的环境挑战，例如，正在开发的生物解决方案可用于处理废水中的有害污染物（生物修复），以及从大气中捕获温室气体（生物沉降），为微塑料和气候变化造成的环境危机创造解决方案。养殖肉类和适应气候变化影响的系统改良作物有望彻底改变当前的农业系统。

## **(3) 加强生物安保**

在全球化经济中，对人类安全的生物威胁不再受限于国界，地方性疾病会迅速转变为全球大流行，例如，SARS-CoV-2。

要防范下一次重大疫情，就需要采取整合的全球做法和投资，从而增强各地的应对能力。要确保所有国家和社区的安全，包括最脆弱的人群，就要有弹性的全球应对措施。这需要培养训练有素的劳动力并建立基础设施。生物制造能力正在成为生物安保的一个基本要素，并将继续在未来的流行病中发挥重要作用，使人们能够获得相应的治疗。

## **1.4 加速生物制造革命**

认识到这些机遇，世界经济论坛（WEF）聚集了来自企业、政府、学术界和社会界的领导人，以确定生物制造可能影响可持续性、经济和/或新型创新产品开发的新兴机遇。随着该行业的新一波发展，确定未来加速生物制造业包容性、可持续性和创新所需的两个关键战略：

- 扩大合作伙伴关系，用于支持更快的原型设计以及向可持续和有影响力创新的过渡。
- 采用与科学、技术、工程和数学（STEM）劳动力发展的相似的最佳实践，培养技能型劳动力，支持继续教育和提高技能。

## **2. 加速商业生物制造的战略伙伴关系和投资**

### **2.1 产品开发的伙伴关系**

战略伙伴关系可以显著加快生物制造方法的开发和利用。一些平台公司（例如 Ginkgo Bioworks、Zymergen 和 Amyris）为跨行业共同应用的开发提供了新的机遇。与这些公司建立平台合作并在其基础上进行工程设计，为新的开发工作提供了显著的规模和成本优势。此外，建立在特定技术领域丰富经验基础上的、以

应用为中心的生物制造初创公司（例如，Impossible Foods、Bolt Threads、Perfect Day 和 Modern Meadow）可以帮助直接发展实现产品成功的最重要的关键性能指标（KPI）。

### （1）细胞开发工具包

平台公司在能够服务多种应用的特定技术生态系统中利用规模经济。计算中的大多数软件应用程序都基于通用平台工具包的开发，并且软件与应用程序本身是解耦的。随着基本生物单元操作越来越标准化，平台公司正在面向更广泛的生物经济。例如，Ginkgo Bioworks 正在开发细胞编程平台，目标是使生物学更易于工程化。其平台汇集了微生物所需的工具、基础设施和相关人员，并与缺乏大规模生物工程能力且以产品为导向的公司合作，开发新产品。Ginkgo Bioworks 还推出了一种生物等效软件开发工具包，用于在 iOS 和 Android 系统上开发应用程序，例如，通过推出细胞开发工具包（CDK），降低开发新生物制造应用程序的障碍。细胞开发工具包包含设计生物制造概念所需的要素：用于优化接受 DNA 文库的工程细胞、设计和打印新 DNA 集的工具、构建和培养工程化生物体的专用设备，以及表征和验证生物过程性能的自动化设施、专业知识和基础设施等。

与生物制造领域的新参与者开始生产材料以测试新应用所需的主要资金、时间和人力投资相比，这些平台为这些从事生物制造的公司提供了显著节约成本的方式。这对技术先驱来说尤其具有吸引力，可以使其在没有重大资本投资的情况下测试和扩展其技术和想法。与此同时，大公司正在利用这类工具探索新的生物制造解决方案，而无需再开发新的实验室空间和团队。除了节省成本外，CDK 预计还将开发时间从几年缩短到了几个月。

### （2）可持续产品性能

目前，上游生物制造的进展速度（例如，分子的生物生产或发酵）与将产品推向市场所需的应用测试和产品开发速度并不匹配。虽然合成生物学技术开发者们不一定适合指导下游的纯化、分离和终端制造产品的工艺，但他们通常会为一类分子的生产带来技术经验。与成熟产品公司形成的战略伙伴关系可为技术人员提供重要机遇，能够获得关于成功部署核心上游关键绩效指标的必要反馈，同时为传统制造商提供快速利用生物制造战略的机会。

2020 年，Lululemon 和 Genomatica 宣布合作开发可持续的生物尼龙。在全

球范围内，尼龙是来自石化衍生物己内酰胺、每年价值 100 亿美元的产业。两家公司合作，在微生物中发酵植物糖，用于可持续的生产己内酰胺，创造消除 6000 万吨氧化亚氮的机会。氧化亚氮是一种通常由石化生产产生的有害温室气体。除了显著减少温室气体，生产生物尼龙所需的水和能源也明显更少，展示出其更具竞争性的可持续性优势。即使没有增强的材料性能，生物尼龙生产过程的可持续性也会成为其“性能”指标之一。

### **(3) 制造技术合作伙伴关系**

随着生物制造应用成本的持续下降，更多行业具有利用可持续和创新材料的商业可行性。药品通常生产规模较小（<1000 升储罐），这些产品高利润率，生产成本也较高。生物乙醇等大宗化学品已经能够实现大规模（>200 千升储罐）经济效益，而制造成本在这种大规模的批量中被分摊掉。许多潜在的生物制造应用难以平衡小产量生产导致的高成本，直到建立起足以支持规模化生产的市场生物科学的进步提高了这些生物转化的效率，生物制造成本将继续下降。与产品公司的合作有助于加快某些应用的市场应用，但与制造技术合作伙伴的合作也可以产生有效的协同效应。

例如，将合成生物学突破与现有制造工艺相结合的伙伴关系对于加速产品开发和测试至关重要。产品开发和测试是生物材料等应用推向市场所必需的。Modern Meadow 是基于蛋白质设计和工程制造可持续性能材料的初创公司，其重点技术主要是开发由工程蛋白和生物聚合物组成的专有应用平台 Bio-Alloy。与传统皮革相比，Bio-Alloy 技术减少了 60%-85%的温室气体排放。2022 年，Modern Meadow 与意大利纺织与材料供应商 Limonta 建立合资企业 BioFabbrica，进一步加快新一波高性能生物材料的部署和利用。通过结合 Modern Meadow 的 Bio-Alloy 应用平台与 Limonta 在先进材料制造工艺方面的经验，BioFabbrica 可以提供可持续的生物制造材料解决方案，满足品牌独特的性能和设计期望。

## **2.2 新的解决方案的部署**

目前的生物制造能力大多以制药为导向，给新的低成本生物制造应用提供了具有挑战性的成本结构。替代生物制造领域应用的下游能力，不像制药领域开发应用的基础设施那么复杂。早期原型设计对于生物制品的商业化至关重要，以确保与预期应用等效和/或兼容，这将需要额外的上游工程循环。目前，缺乏早期原

型已成为早期技术生物工程活动中的一个主要缺陷。

例如，非制药相关应用的商业示范规模正在进入生物制造应用。然而，初始原型批次的生产或初始商业产品的运行，对生物制造的早期产品提出了重大的财务和物流挑战。虽然发酵制造领域的历史领导者（如 DSM，Cargill）在这类应用中取得了显著成功，但对于将新的制造概念推向市场的技术先驱者来说，承担开发和制造规模的成本是一个资本密集过程。如今，学术实验室可以进行小规模工艺演示，但往往受到设备/能力多样性的限制。或者，合同制造组织可以提供大规模的解决方案，但与这些组织合作的成本通常很高，并且需要符合现有商业需求。与此同时，上游工艺开发技术（如 Sartorius 的 ambr250、Culture Biosciences、Univercell）自动化和复杂性的提高，从而实现更快速的跨生产技术的转让。

目前，生物制造应用的试点和原型设计能力的分散状态表明，竞争前的生物工艺示范设施，其设计应具有当今可实现的灵活性。诸如“生物制造合作社”等组织，共同投资和共同设计的公私合作项目，可以使技术先驱者加速原型设计和应用测试，从而提高生物制造应用的整体成功率。许多上游设备需求在生物制造应用程序之间共享，并且可以实现跨细分市场和生物安全应用程序的多功能性。下游能力更加多样化，需要深思熟虑的设计和重大投资才能跨越必要的应用范围，但前提时要解决生物制造原型设计的主要障碍。

大多数生物制造都是通过搅拌槽中培养微生物，以低成本原料进行生物转化。用于无肉汉堡的蛋白质、用于生物尼龙的己内酰胺等化学品，以及用于新冠肺炎疫苗的质粒 DNA 都是利用微生物发酵。根据应用情况，储罐尺寸、特定过程控制需求与监管合规性（例如氧气供给、溶剂额定值、良好制造规范合规性等）可能有所不同，但主要资本组成部分和能力是相似的。

虽然工程生物学工具包在整个生物制造生态系统中是共享的，但每个产品的应用都需要独特的处理限制，从而实现产品的关键性能指标。随着生物工程能力的成熟，以生物方式生产所需产品的上游生物工艺管道正在扩大和加速。除生物制造的生物成分外，还需要一系列不同的化学、物理和热单元操作，用于从生物系统中提取和加工目标产品。在生物制造开发的周期中，要尽早启动下游开发，才能确保核心产品 KPI 的最低可接受性能，避免投入大量资本和时间后再面临产品集成的挑战。这些应用测试方法只有在净化和分离最终产品后才可能实现



(图 2)。



图 2 应用领域下游工艺涉及的环节 (例举)

扩大合作伙伴关系为扩大生物制造生态系统和整合系统专业知识、技术提供了机遇,以提高生物制造商业化的成功率。合作可以汇集必要的资源和专业知识,增强生物制造产品的部署能力。对先进创造、空间协作的投资将有助于打破新生物制造应用商业化的主要障碍,加速生物经济的增长。

### 3. 劳动力转型: 培养终身学习和提高技能

除了技术进步和战略伙伴关系外,紧急行动对加快未来劳动力的增长,对推动生物制造革命至关重要。传统制造业向生物制造业的演变将产生针对不同劳动力部门的全新技能需求,与自动化和数字化的最新技能发展形成协同效应。

过去对生物制造领域劳动力的认识一直集中在需要广泛高等教育的高技术、高薪职位上。这些工作已在学术和技术机构周边的城市/大都市中心本地化。随着生物制造业的扩张，劳动力在制造业价值链和地理位置上将不断扩大。

### 3.1 新兴的机遇

生物制造革命正在改变传统生物技术劳动力的层次结构。从上游的生物工程到制造，再到产品整合和营销所需的工艺的开发和部署，需要跨学科、跨职能。这样的生态系统需要受过研究生培训的劳动力团队，从而承担上游生物工程角色。同时，生物制造业在自动化和软件工程、化学和材料工程等的熟练劳动力创造了更多机会。

生物制造业需要开发新的“青领”制造岗位，与面向可持续绿色技术与传统“蓝领”制造进行整合。目前，这种职位多数面向四年制大学毕业生。自动化和数字化正在使制造技术实现跨领域的技能集成并逐渐标准化，从而能够开发有针对性的贸易认证项目，这就创造了重新培训的机会，但同时也可能打破现有制造业的劳动群体。许多用于普通生物制造应用的低成本原料都是在发酵设施附近，从农业领域获得，这为增加大城市以外工作创造了机会。

与信息通信技术（ICT）行业非常类似。计算机革命导致了软件开发人员的诞生，如今软件开发人员在全世界约有 2400 万个高薪岗位。软件开发人员是数字经济的支柱，几乎对任何从事数字战略的企业都至关重要。生物工程/能力方面的技术创新目前仍将主要由博士级的科学家和学术界推动，此外，还有一类新的创业者在生物平台上开发应用程序，这些应用程序不一定需要生物科学的专业知识，而是需要视觉和创造力等软技能。

### 3.2 劳动力战略

过去 20 年，由于信息和通信技术、化学、能源与制药行业的成功，科学、技术、工程和数学（STEM）领域的劳动力显著增长，导致高收入熟练岗位的增长。例如，2020 年，信息和通信技术领域的专家就占加拿大总就业人数的 7%。未来，生物制造业将在更广泛的 STEM 群体中分享自动化和数字化的基本技能，创造劳动力流动的机会，并分享劳动力发展的最佳实践。国际劳工组织（ILO）对加拿大、中国、德国、印度、印度尼西亚、新加坡和泰国等 7 个国家的 ICT 部门进行了调研，提出了 10 项可能促进劳动力发展的政策建议（表 2）。生物革命

在发展和支持高技术产业劳动力所需的战略方面也有相似之处。例如，强生公司的内部劳动力发展项目就是为促进持续地跨学科发展。通过劳动力转型扩大生物领域岗位的多样性，利用最佳实践进行继续教育并提高技能，对于生物制造革命至关重要。

表 2 国际劳工组织劳工针对信息和通信技术领域劳动力关键因素和可能的政策对策

这些政策应对措施有助于促进政府、雇主和劳工组织之间的对话，以制定有效的政策，从而促进数字经济中更多公平的工作机会：	
①投资技能预测系统，增强对当前和未来技能需求的理解	⑥促进跨学科技能发展
②增加对高等教育机构和教师队伍的投资	⑦投资有效的终身学习系统和 ICT 领域的持续培训
③鼓励更多女性学习科学、技术、工程和数学（即 STEM 科目），并从事信息和通信技术领域的工作	⑧促进更好地认可外国的学历和工作经验
④解决在高校或职业培训机构获得的技能与行业所需技能之间的差距	⑨简化签证申请流程，给 ICT 专家移民提供支持，帮助他们融入新工作和生活环境
⑤增加对软技能的教育和重点培训	⑩促进相关部委和当局之间的协调，加强社会对话

### 3.3 加速生物制造革命的行动

生物技术领域的领导者们已经在采取行动，具体措施主要体现在两个方面：

- 通过在竞争前进行先进制造技术和空间方面的投资，鼓励合作与创新
- 建立学术方面的合作伙伴关系，从而确定劳动力需求并填补技能差距

例如，新加坡一直鼓励国内生物制药行业的发展。2000 年以来，与行业领导者合作，并进行了大量投资，用于支持基础设施和劳动力发展，实现生物制药创新在本地生态系统的可持续发展，为不断增长的亚洲和全球市场做贡献（表 3）。

表 3 新加坡生物制药产业的发展

	行动	影响
基础设施	在 Tuas 生物医药园建立设施，如 JTC 空间	— 到目前为止，培训项目 AnT 已形成了强大的技术工人队伍，拥有

投资	向公共部门投入研究资金 40 亿美元，用于发展健康与生物医学	170 多个培训机会
劳动力发展	与前沿制药公司（如 Lonza 和 Amgen）合作开展培训项目（AnT），毕业生在该项目中接受在职培训，从而确保当地大学的毕业生拥有最相关的技能	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 2000 年以来，新加坡制药行业的产出增长了 3 倍多，为全球市场生产的产品价值超过 160 亿美元</li> <li>— 熟练劳动力增加了一倍多</li> <li>— 前 10 大制药公司中有 8 家在新加坡设厂，他们在新加坡生产全球收入排名前 10 位药物中的其中 4 种</li> </ul>

刘晓 张学博 编译自 WEF