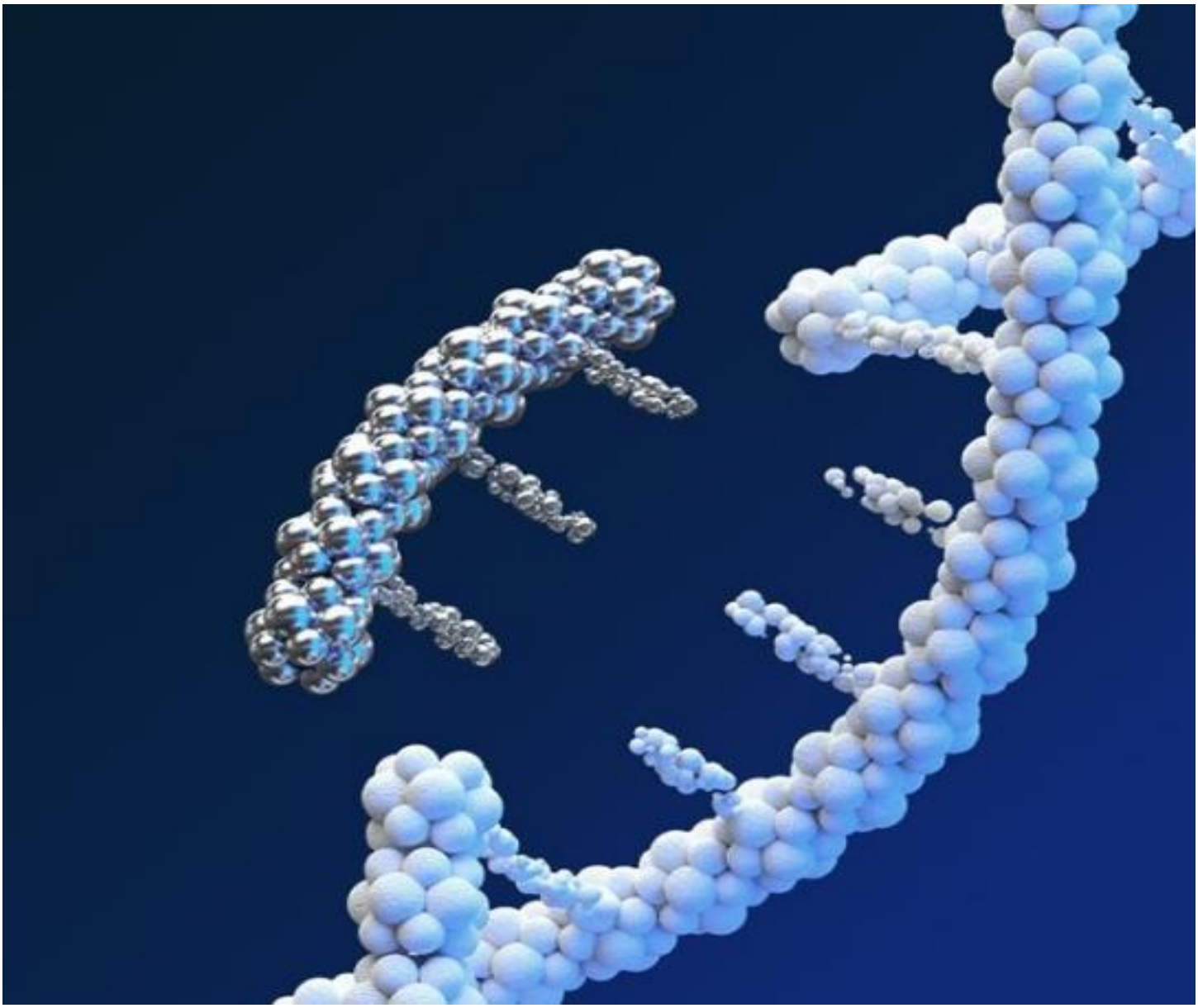


麦肯锡全球研究院

生物革命：创新改变了经济、社会和人们的生活

中国科学院上海生命科学信息中心

上海市生物工程学会

2020 年 6 月

麦肯锡全球研究院

生物革命：创新改变了经济、社会和人们的生活

编者按：2020 年 5 月，麦肯锡全球研究院（McKinsey Global Institute，MGI）发布了报告——《生物革命：创新改变了经济、社会和人们的生活》（The Bio Revolution: Innovations transforming economies,societies, and our lives）。报告详细介绍了生物科学的进步及其应用对经济和社会的影响；通过 400 个案例分析，总结了未来生物创新的 4 个关键领域：生物分子（Biomolecules）、生物系统（Biosystems）、生物机器界面（Biomachine interfaces）和生物计算（Biocomputing）；提出了在未来短期（2020-2030）、中期（2030-2040）和长期（2040-2050）可能的创新应用方向。

生物领域的研究已经进入了新阶段。近几年一系列创新（例如 CRISPR–Cas9 基因编辑和干细胞重编程）正在为该领域提供新的理解、新的材料、新的工具，以及更低的成本。2016 年启动的人类细胞图谱计划（Human Cell Atlas project），旨在创建人体所有细胞的综合参考图谱，并为研究、诊断、监测和治疗提供基础。生物科学的发展也对经济和社会产生了极大的影响。原则上全球经济物质投入中的 60%可由生物产生。麦肯锡的分析表明，大约 1/3 的投入是源自生物材料，如木材、棉花、食品等。生物领域的创新正在改变现有的生产工艺。例如，角鲨烯是一种用于护肤品的保湿剂，传统上来自鲨鱼肝油，目前已经可以利用基因工程改造的酵母通过发酵以更可持续的方式获取。其他 2/3 非生物材料来源的，比如尼龙，也已经可以利用基因工程化的微生物代替石化原料进行生产。虽然生物要在这些生产投入方面充分发挥潜力还有很长的路要走，但即使取得部分进展，也可能会改变供求关系、经济状况和参与者的行为。生物学未来的潜力或将决定人们吃什么、穿什么、用什么护肤品，甚至是建设世界的方式。

麦肯锡的报告详细研究了生物科学进步带来的实际应用，以及对经济和社会发展的影响。报告指出：“生物革命”的新时代已经来临，这是个充满机遇和不确定性的时代。

1. 生物创新正在 4 个关键领域中进行

生物科学正在随着计算、数据分析、机器学习、人工智能以及生物工程的发展而不断进步，这也加速了创新的浪潮。报告将创新方向分为 4 个领域：生物分子（Biomolecules）、生物系统（Biosystems）、生物机器界面（Biomachine interfaces）和生物计算（Biocomputing）（表 1）[1]。

表 1 生物创新的 4 个关键领域

	生物分子	生物系统	生物机器界面	生物计算
定义				
研究	组学研究中，通过细胞内分子（如 DNA、RNA 和蛋白质）的监测研究细胞过程和功能	复杂的生物组织和过程，以及细胞间的相互作用	神经系统的结构和功能	细胞内通路或细胞网络根据特定条件反馈输出（用于计算）
工程	细胞内分子（如利用基因组编辑）	细胞、组织和器官，包括干细胞技术和移植	连接生物神经系统和机器的混合系统	用于计算过程（存储、检索、处理数据）的细胞和细胞组件
实例	利用基因治疗单基因疾病	在实验室中培养肉	用于人类或机器人的肢体运动控制的神经修复技术	DNA 中成串的数据存储

注：工程是指设计、从头合成或修改

上述 4 个领域的重大突破正在相互促进和加强。生物分子和生物系统中，组学和分子技术的进步，例如细胞内分子和途径的映射与测量及其工程化，不断提升人们了解生物过程和设计生物的能力（表 2）。例如，科学家利用 CRISPR 技术，可以更快、更精确地编辑基因。生物机器和生物计算的发展都涉及到生物学和机器之间的深度连接，未来可能实现神经信号的测量以及精准的神经修复，也使利用 DNA 存储数据成为可能。某种程度上，一公斤 DNA 就能存储当前世界

[1]本文对生物分子的定义涵盖了组学研究中细胞内成分（例如 DNA、RNA 和蛋白质）的映射和测量，还包括细胞内成分的工程化（例如基因组编辑）。对生物系统的定义涵盖了细胞、组织或器官层面的工程化，包括干细胞技术和移植。生物机械界面是生物学领域范畴，主要是生命体神经系统与机器的连接，包括脑机接口。生物计算也是生物学领域范畴，主要是利用细胞和细胞组件进行计算的过程（存储、检索或处理数据）。

上所有数据。

世界范围内的 DNA 测序每年都在产生大量生物数据。低成本测序或高通量筛选等技术的发展，有助于降低成本、加快实验步伐，产生更多新形式的数据，以便更好地理解生物学。单细胞水平的进展，例如单细胞成像工具和单细胞 RNA 测序，使科学家能够建立分辨率越来越高的细胞图谱，为研究、诊断和治疗提供有力的支撑。理解和设计生物过程的能力也在不同维度上得以提升。

表 2 一系列组学的研究

细胞内流动的遗传信息	表观基因组学		DNA 修饰	调节基因表达的表观修饰标记（如 DNA 甲基化、组蛋白修饰）
	基因组学		DNA	生物体全部遗传信息（DNA），随时间推移相对静止
	转录组学		RNA	一定时间内产生的 RNA 转录本的集合
	蛋白质组学		蛋白质	生物体的一整套蛋白质，随时间变化而变化
细胞内的代谢产物	代谢组学		代谢物	一组代谢物、小分子中间体和代谢产物
	糖组学		聚糖	拥有完整结构和功能的糖基化产物
	脂质组学		脂质	全套脂质产物
其他	微生物组学		微生物群落	种群中的所有微生物（如肠道微生物）
	单细胞组学		人和其他细胞	捕捉单细胞水平的细微差别
	循环无细胞 DNA 或 RNA 分析		血液而不是细胞中的 DNA/RNA	无创基因或转录组信息

调控　转录　翻译

基因组学是组学技术最先发展的分支，可以追溯到人类基因组计划（1990 年开始、历经 13 年、花费 30 亿美元），并且已经有相关应用。此后，其他组学技术也开始快速发展。目前，DNA 测序成本的下降速度已经快于摩尔定律（图 1）。2003 年绘制人类基因组图谱耗费约 30 亿美元；2019 年仅需花费不到 1000 美元；

未来十年甚至更短时间内，成本可能会降到 100 美元以下。

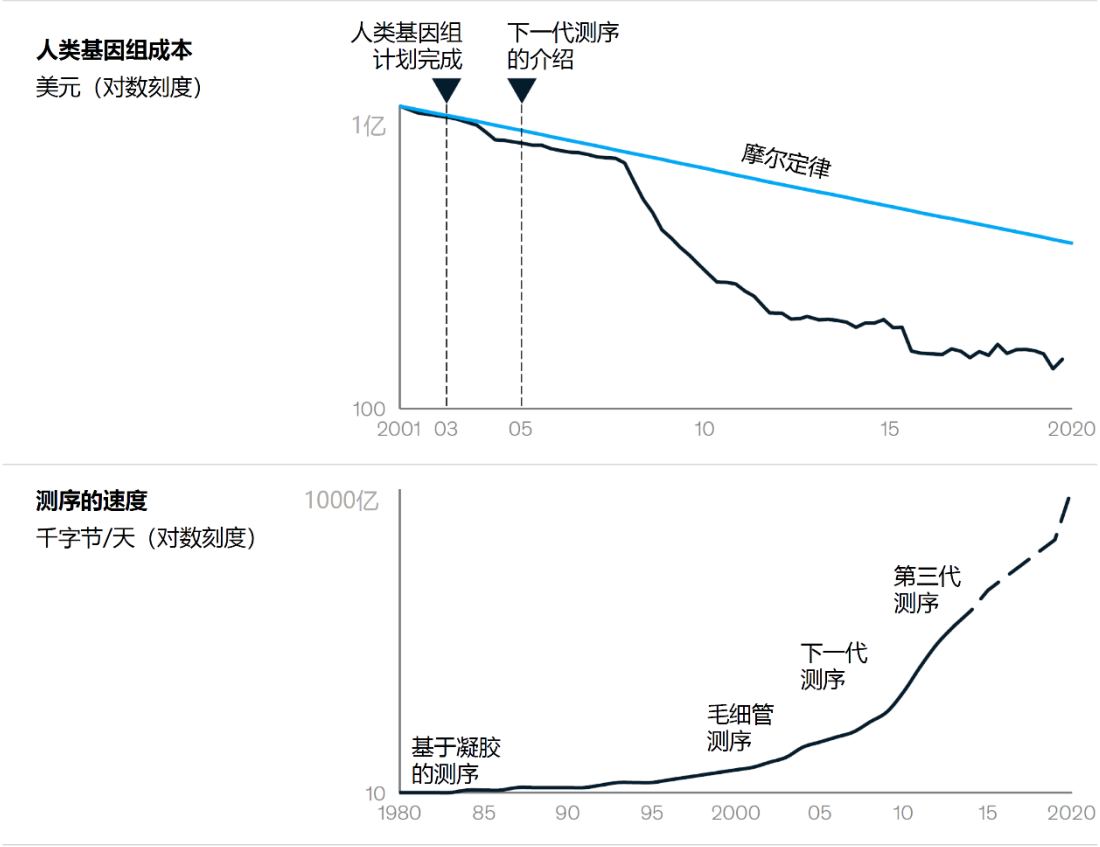


图 1 计算、生物信息学和人工智能等的快速进步推动组学数据的分析

注：图中标注的数据和成本不包含基因组测序的所有成本，仅包括与生产相关的成本（例如劳动力、仪器、信息学、数据提交等）。数据来源：美国国家人类基因组研究所。

2. 新的生物学创新能力可以带来经济、社会和生活的变革

新的生物学的创新能力有可能给经济和社会带来巨大变革：从研发范式到生产的实际投入，再到药品和消费品的交付与消费方式，整个价值链都会受到影响。这些能力包括：

- **生物学手段可以用于生产大部分的全球经济物质，具有改善性能和可持续性的潜力**，包括改善材料特性、减少制造和加工过程的排放、缩短价值链等。数百年来，发酵一直用于制作面包和啤酒，而如今也可以用来制造人造蜘蛛丝等纺织品。越来越多利用生物学创造的新颖材料具有高品质、全新功能、可生物降解，以及通过显著减少碳排放方式生产等特性。例如，利用蘑菇根而不是动物皮毛制作皮革；用酵母代替石油化学生产塑料等。
- **精准和个性化贯穿从开发到消费的整个价值链。**生物科学的进步使研发和交

付都更加精准和可预测；研发也正在从偶然发现向合理设计转变。对人类基因组以及某些基因与疾病之间联系的理解不断加深，推动了个性化或精准医疗的实现，这或许比以前那种“千篇一律”的疗法更为有效。精准同样适用于农业，对植物和土壤微生物的了解和改造可以优化产量，并为消费者提供基于基因测试的个性化营养计划。

- **对人类和非人类生物进行工程设计和重新编程的能力不断提高。**基因疗法首次提供了一些疾病的全新治疗。类似技术也用于开发有价值的新特性，例如，提高微生物、植物和动物等的产量。对农作物的基因改造可以获得更高的产量或抗性（耐热或抗旱）。虽然可能存在潜在的生态风险，但通过永久改变传播疾病的媒介（如蚊子）的基因，基因驱动可以用来预防病媒传播的疾病，例如疟疾、登革热、血吸虫病和莱姆病等。
- **自动化、机器学习以及大量生物数据的会聚正在提高研究的发现、通量和产量。**生物和计算正在共同推动研发进而可能解决生产力的挑战。麦肯锡 2017 年的分析发现，生物制药行业生产力的收入与研发支出比率在 2008-2011 年之间达到最低点。随着测序技术成本下降，大量的生物数据产生，越来越多的生物技术公司和研究机构开始在实验室中使用机器自动化和传感器，将吞吐量提高了十倍。此外，高级分析、强大的计算技术和人工智能的使用，也在一定程度上加快了研发进程。
- **生物系统和计算之间接口的潜力正在增长。**新一代生物机器接口依赖于人与计算机的紧密交互。此类接口，如神经义肢，包括可恢复感觉功能（仿生视力），或是使大脑信号可控制假肢和瘫痪肢体进行身体运动等。目前正在研究利用生物学模仿硅的生物计算机，包括利用 DNA 存储数据。DNA 的密度大约是硬盘的一百万倍；从技术上讲，一公斤 DNA 就可以存储世界上全部的数据（截止 2016 年）。

3. 未来 20 年内对广泛领域产生深远影响的可预见的应用管线

报告排除了目前科学上无法想象或到 2050 年不可能产生重大商业影响的案例，收集到大约 400 个实用案例，并以此为基础构建未来初步可预见的管线。主要通过 4 个价值增益驱动因素评估直接影响，包括减少疾病负担、提高质量、降低成本、环境效益。未来 10-20 年，预计这些应用可能对全球每年产生 2-4 万亿

美元的直接经济影响（图 2）。人类健康和性能方面，从研究到应用都有清晰的管线，但是未来超过一半的直接影响可能来自健康以外，主要包括农业和消费品等（图 3）。

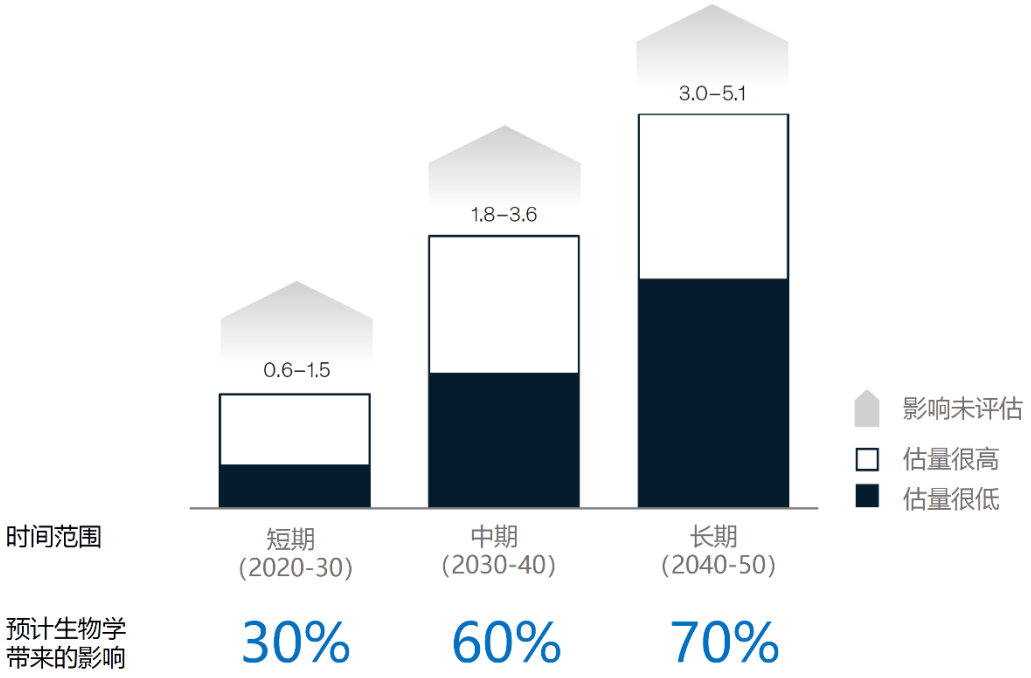


图 2 按时间范围评估潜在直接经济影响（万亿美元）

注：目前的评估是根据收集的 400 个案例的潜在年度直接经济影响得出的，不包括生物计算机和生物机器界面的非经济影响。这些影响评估数值并不全面，估计的数值是相对于 2020 年的经济，不包括人口和通货膨胀等变量的变化。

分析表明，未来 10-20 年大多数价值出自 4 个领域，以及正在进行生物创新应用的行业集群。下面总结了这些关键领域中的应用案例。

- **人类健康和性能。**新一波的创新浪潮已经来临，包括用于治疗或预防疾病的细胞、基因、RNA 和微生物组；创新的生殖医学；药物开发和交付的改进。目前正在探索更多的选择，并将其用于治疗单基因疾病（例如单个基因突变引起的镰状细胞性贫血）、多基因疾病（例如多个基因引起的心血管疾病），以及传染病（例如疟疾）。通过这些应用，未来 10-20 年可以减轻全球疾病总负担的 1-3%，大致相当于消除肺癌、乳腺癌和前列腺癌的全球疾病负担。麦肯锡预计，随着技术创新及充分应用，未来或将解决全球疾病总负担的 45%。该领域未来在全球范围内每年直接产生的潜在影响约 0.5-1.3 万亿美元，占总额的 35%，主要应用范围可能是提高治疗的精准度和个性化程度，以及

加快研发步伐。长远来看，创新也将扩展到更多医疗领域，例如心血管疾病和神经退行性疾病等。

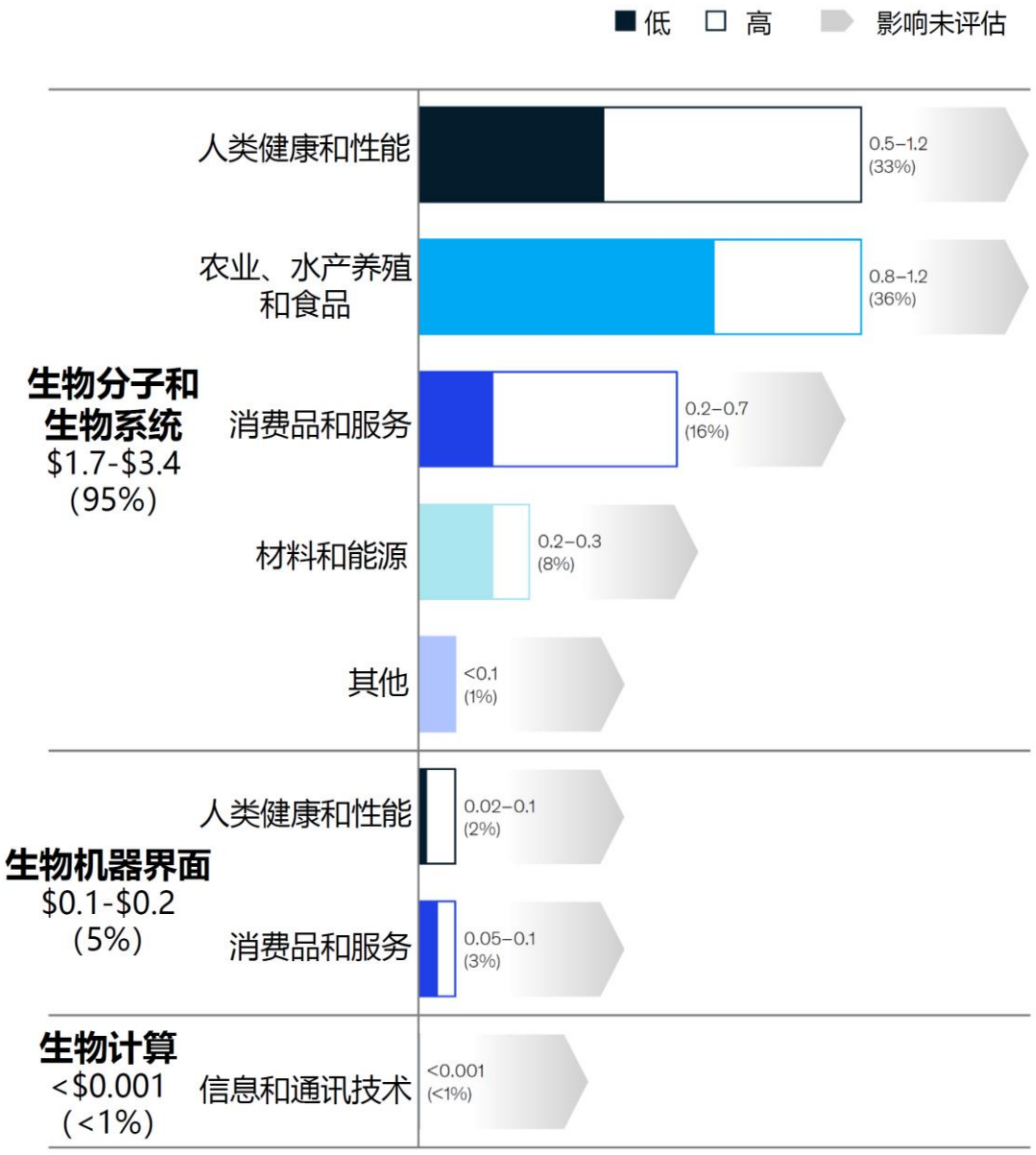


图 3 按领域评估潜在直接经济影响（万亿美元）

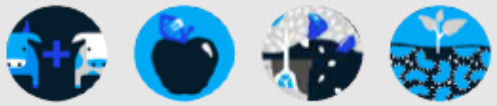
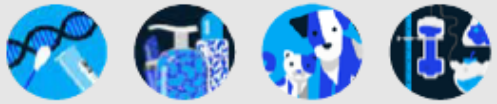
注：其他应用包括防御和安全、消除环境危害、教育和人才等。

- **农业、水产养殖和食品。**诸如低成本、高通量的微阵列等的应用使动植物测序相关数据激增，从而能够基于更全面的遗传标志物，人工选择所需性状，这种标记辅助育种比传统育种方法更快速和便捷。20 世纪 90 年代基因工程的商业化应用，以超越传统育种方式来改善植物性状。从历史上看，第一轮基因修饰作物被称为转基因（GMOs），主要是引入外来遗传物质。目前，基因工程的最新进展（例如 CRISPR 的出现）已经可以实现高度特异性的同源

突变和基因内变化（改变受体植物的基因组合和调控序列）。该领域的其他创新还包括利用植物、土壤、动物和水中的微生物提高农业生产的质量和产量；开发替代蛋白质减轻传统畜牧和水产业对环境的压力，例如实验室中培养的肉。未来 10-20 年，该领域年度直接经济影响可能在 0.8-1.2 万亿美元之间，占总额的 36%。

- **消费品和服务。**大量生物数据的产生有助于为消费者提供个性化的产品和服务。相关应用包括直接面向消费者（DTC）的基因测试，基于微生物群落的美容和个人护理，以及人和宠物的创新养生。其中一些应用也可能对人类健康产生间接影响，例如健身应用程序等。该领域未来 10-20 年的年度直接经济影响可能在 0.2-0.8 万亿美元之间，占总额的 19%，其中大约 2/3 可能来自个性化服务。
- **材料、化学品和能源。**新生物方法可以改进材料、化学品和能源的制造和加工过程，进而改变人们的日常生活。发酵过程的改善可以提高生产速度和质量（例如食品和饲料成分）。此外，创新生物线路可能产生全新的材料；能源获取的改善和储能技术的发展也为生物燃料的应用带来了更多前景。相关应用包括利用新型生物线路开发具有全新特性的材料；基于生物燃料的进步发展创新储能方式。未来 10-20 年该领域年度直接经济影响可能在 0.2-0.3 万亿美元之间，占总额的 8%。这种经济潜力中约 3/4 与新生产方式带来的资源效率提高有关。

生物学还有许多其他潜在应用，例如通过生物碳固存（利用生物过程捕获大气中的碳排放物）和生物修复（去除土壤、水和大气中可能的有害无机物和有机物）保护环境。此外，在教育、国防以及太空探索中也都有潜在应用价值。报告指出，生物分子和生物系统的创新将产生相对更大的经济影响；目前，生物机器界面和生物计算的发展还处于早期阶段，但其未来应用前景非常广阔，正在开发的应用包括利用神经修复技术恢复听力和视力等。

领域与案例	创新领域	转化能力	年度潜在直接经济影响（2030-40） 万亿美元（占总影响百分比）	溢出到上游、下游和辅助部门（案例）	价值链转变并调整业务战略（案例）
人类健康和性能 子孙后代的健康改善 基因驱动减少媒介传播疾病 基于细胞、基因、RNA的疾病预防、诊断和治疗 药物开发和交付的改善	 生物分子 生物系统 生物机器界面	控制和精准度提高 改造和重编程人类和非人类生物的能力增强 研发通量和产量增加 生物系统和计算机之间接口的潜力越来越大	**人类健康和性能** 0.5–1.3 (35%)	健康保险（更好地风险预测和治疗效果） 辅助服务（存储和移动的细胞疗法基础设施）	即时诊断的推广（如囊性纤维化的基因测序）或将分散护理 制药公司会适应治愈而不是一直在治疗的商业模式
农业、水产养殖和食品  动植物的选择性育种 植物的CRISPR基因工程化 植物基蛋白质和实验室培养肉的增加 微生物数据帮助优化农业投入	 生物分子 生物系统	利用生物手段的物质投入 控制和精准度提高 改造和重编程人类和非人类生物的能力增强 研发通量和产量增加	**农业、水产养殖和食品** 0.8–1.2 (36%)	食品零售和饭店（有新特性的食品，植物基蛋白质和培养的蛋白质） 房地产（更有效的农业和实验室培养肉减少了土地使用） 运输和物流会调整以生产具有新特性的产品（更长保质期） 环境（碳足迹较小的肉类生产）	肉类价值链将从饲养、喂养、屠宰、加工、分配，转变为组织采样、培养基生产、活细胞培养产生肉 整合价值链，单个参与者可在其中做很多步骤 出现销售收益目标的商业模式，进而替代种子或农药包装等产品
消费品和服务  DTC基因测试 基于微生物的美容产品 基因工程化的宠物 基于组学数据的个性化健康、营养和健身服务	 生物分子 生物系统 生物机器界面	控制和精准度提高 生物系统和计算机之间接口的潜力越来越大	**消费品和服务** 0.2–0.8 (19%)	健康保险（基于消费者DTC基因测试更好地预测风险） 食品（个性化饮食计划驱动需求变化） 医疗保健（DTC测试需要遗传顾问更多的支持）	价值链向上移动（DTC测试公司开发临床产品和服务） 数字货币的新途径（出于研发目的将消费者数据出售给制药公司）
材料、化学品和能源 为织物和燃料开发新的生物线路 改进现有工业酶发酵工艺 开发新型材料，例如生物聚合物 利用微生物提取原料	 生物分子 生物系统	利用生物手段的物质投入 改造和重编程人类和非人类生物的能力增强 研发通量和产量增加	**材料、化学品和能源** 0.2–0.3 (8%)	时装和化妆品（可持续更高的材料，如有微生物而非石油化学材料制成的尼龙） 电子（基于生物的光学显示器） 消费者（可以改善消费者生活质量的新颖材料）	价值链压缩（设计、制造、定制都在同一地方完成） 基于平台的公司成立，为各行各业提供服务

4. 生物创新承载着深刻而独特的风险和问题

生物创新的激增也伴随着潜在的风险和问题，考量这些可能需要综合一系列独特的因素。

- **生命体是自我复制、自我维持且不受管辖边界约束。**例如，作为新型基因工程的基因驱动在用于控制虫媒传播疾病的同时，也可能对生态环境造成永久性损害，意外后果的蔓延是没有边界限制的。
- **生物学相互联系的性质可能会增加意外后果的可能性。**生物是高度互联的，改变系统的某一部分可能会引发整个生态系统或物种的连锁效应和意想不到的后果。基因编辑技术也会产生“偏离目标”的效果，例如，CRISPR 的“脱靶”效应。
- **较低的准入门槛可能为潜在误用提供便利。**与核材料不同，某些生物技术相对便宜且易于获得，例如 CRISPR 的商业试剂盒在互联网上出售。除此之外，公司间的竞争加剧可能导致营销上过度炒作。在某些情况下，这些生物学产品和服务的相关科学尚未经过全面测试就被推向市场，这可能会误导消费者。
- **不同价值体系的群体难以达成共识。**这种风险的核心在于个人、文化和国家等不同层面上的跨价值体系的协调面临挑战，可能还需要考虑宗教、文化和历史价值以及各国文化的差异等。道德层面的挑战并不在本报告的研究范围。
- **隐私和知情同意至关重要。**许多生物数据是来自人体，因此对个人隐私和知情同意的担忧也越来越多。例如，随着脑机接口应用的扩展，从大脑收集的数据量可能会激增。
- **资源获取的不平等可能会使社会经济差距长期存在。**生物学的发展及其商业应用可能无法使所有人都平等地获取，进而加剧社会经济差距。

5. 科学是起点，需要以负责任的方式进行商业化和推广

从实验室到应用的过程主要分为三个阶段：科学研究、商业化、推广。以负责任方式大规模推广生物学的应用并产生积极影响，可能与 6 个因素有关：第一个因素是对科学研究的投资，这与第一阶段的工作息息相关；价值主张、商业模型、走向市场、运营扩展等 4 个因素是第二和第三阶段的关键；最后一个因素风险和管理机制的应用在三个阶段中都至关重要。

- **科研投资。**资金、工具、人才和数据获取是确保科学研究顺利进行的必要投入。生物科学新工具和技术拓展了研究能力。计算能力的提升和成本下降推动了生物信息学的快速发展。此外，确保科学家能够获取所需数据资源也至关重要。带标引且可获取的数据库在生物学发展中起到了重要促进作用，例如人类基因组计划、GenBank、UniProt 等。
- **4 个因素在商业化和推广中的重要作用。**一旦应用在科学上可行，其他因素将决定从实验室到市场再到广泛使用的过程。报告确定了 4 个关键因素，第一个因素是基于生物学的新产品或服务示范，为潜在的最终用户提供了价值主张(value proposition）。创新不仅需要在成本上与现有产品竞争，还需要通过提供更高质量或新特性、或满足现有产品无法满足的需求来与之竞争。建立价值主张并不易，许多生物产品的潜在客户处于利润率较低的行业，如能源和农业，而基于生物的创新目前仍然相对昂贵，例如首个实验室培养的汉堡成本超过 30 万美元。
- **第二个因素是商业模式是否适合瞬息万变的环境。**因此，可能需要新的商业模型，例如将生物学、化学、数据科学和自动化等专业知识相结合的仿生公司。第三个因素是要确保新产品或服务能够通过定价、销售和营销等环节进入市场并有效地吸引潜在客户。第四个要素是扩大运营规模的能力，包括准确的基础构架、流程、供应链和人才。例如，目前非常缺乏可以帮助患者和公众理解基因检测结果的遗传咨询师，2019 年美国约有 5000 名遗传咨询师得到认证，但接受基因检测的消费者已经超过 2600 万人。
- **风险和管理机制的应用。**鉴于生物创新潜在风险的独特性，管理机制的应用在第一阶段以及商业和推广中都很关键，包括来自社会和法规的广泛接受。即便相关应用在科学上是可行的，但商业化是需要最终用户和其他利益相关者去使用和消费它，有时可能会承受一部分风险。举例来说，菲律宾生产的第一批黄金大米（维生素 A 强化）的推广花费了近 20 年，该产品 2019 年在菲律宾获批，是第一个批准维生素 A 缺乏症使用黄金大米的国家。监管机构面对大众的消极态度，对新产品的批复可能会有所拖延。通过对当今主要经济体现行法规等的分析发现，大约 70%的潜在影响可能取决于消费者、社会和法规的接受程度。

6. 利用生物创新的速度和程度因应用领域不同而有所差异

利用生物创新的速度和程度会因应用领域的不同而不同（表 3）。一些应用已经显示出早期商业应用的前景，例如 CAR-T 细胞疗法已经证实商业上可行，虽然还在初期阶段，但未来十年可能会迅速发展。还有一些应用，例如通过基因工程植物隔离 CO_2，虽然在科学研究中显示出了希望，但距离其商业可能性的实现还有很长的路要走。

表 3 不同时间段不同领域的应用差异

应用案例（例举）	通过应用案例评估时间范围内的加速点 加速点是利用率开始快速增长的时间			
	现状 2020 年前	**短期** 2020-30	**中期** 2030-40	**长期** 2040 以后
人类健康和性能	病原体筛查 无创产前检查	液体肿瘤的 CAR-T 细胞疗法 液体活检	基因驱动预防媒介传播疾病 实体瘤的 CAR-T 细胞疗法	干细胞产生的可移植器官 用于医学目的的胚胎编辑（如通过 CRISPR）
农业、水产养殖和食品	标记辅助育种（用于食品的作物和动物） 食品来源、安全性和真实性的遗传追踪（如过敏原、物种、病原体）	植物基蛋白质 作物微生物组诊断和益生菌治疗	培养肉 可以更快生长的基因工程动物	通过增强光合作用加快生长的基因工程作物
消费品和服务	DTC 基因测试	基于遗传和微生物组的个性化膳食服务 DTC 基因测试：关于健康和生活方式的个人见解	基于组学数据的个人健康、营养和健康状况的生物监测传感器	基因治疗，如皮肤衰老
材料、化学品和能源	药物生产的新生物路线（如肽）	新型材料：生物农药/生物肥料（如 RNAi 农药） 改善现有发酵工艺：食品和饲料成分（如氨基酸、有机酸）	新型材料：生物聚合物（如 PLA、PET）	生物太阳能电池和生物电池
其他应用	用于法医的 DNA 测序		封存 CO_2 生物修复污染	

1. 健康和性能领域的应用包括减少个人和群体疾病负担的创新，延长寿命的抗衰老治疗，生殖健康（如携带者筛查）的应用，药物开发和制造的创新。

2. 农业、水产养殖和食品领域的应用包括用于食品生产、食品运输和食品存储的动植物相关的应用。
3. 消费品和服务领域的应用包括直接面向消费者的基因测试、美容和个人护理、保健（如健身）和宠物。我们将营养和健身归类为消费品而非健康领域，因为它们不是直接减轻全球疾病负担，也不会选择性地有益于成年人，例如脱发和化妆品。尽管其中一些应用可能会对疾病负担产生间接影响，如可穿戴设备，但它们不是直接的治疗方法。
4. 材料、化学品和能源领域的应用包括与材料生产相关的创新（例如，发酵工艺的改进、新的生物线路或新型材料），以及能源生产和存储。

刘晓 编译自
McKinsey Global Institute