



探索生物数字会聚—— 生物学和数字技术融合的启示

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

2021年4月

探索生物数字会聚：生物学和数字技术融合的启示

编者按：政策视野 (Policy Horizons Canada) 是加拿大政府的战略预见组织，其任务是在面对即将出现的颠覆性变革时，为政府制定未来政策和计划提供相关的支撑服务。2020 年，加拿大政策视野针对生物数字会聚的前景以及可能出现的政策问题展开对话活动，并发布报告《探索生物数字会聚：当生物学和数字技术融合时会发生什么？》(Exploring Biodigital Convergence: What happens when biology and digital technology merge?)，探讨了现在生物数字融合的重要意义和特点、可能产生的新能力，以及初步的政策启示。

20 世纪 70 年代末 80 年代初，加拿大政策制定者就意识到数字时代已经来临。近年来数字化飞速发展，数字技术和生物系统正在以一种可能会深刻影响社会、经济，以及人们自身设想的方式进行结合或融合。本报告称之为**生物数字会聚 (biodigital convergence)**。

1. 生物数字会聚的定义和内涵

生物数字会聚是数字技术、生物技术与系统的交互式结合，有时甚至达到融合的程度。“政策视野”正在研究这种会聚融合的 3 种方式。

1.1 生物实体和数字实体的完全物理集成

数字技术可以嵌入生物体，生物成分可以作为数字技术的组成部分。生物和数字的物理啮合、操纵和融合正在创造新的生物和技术混合形式，每种（融合形式）都在有形世界中发挥作用，而且通常都有增强的能力。例如，具有生物大脑的机器人、具有数字大脑和生物学身体的机器人，也出现了具有脑机接口的人机交互系统。数字设备在人体上的医疗用途以及数字化调控的昆虫，例如，雄性蜻蜓、受调控的蝗虫，这些都是数字技术与生物实体相结合的例子。通过进入神经系统并操纵神经元，可以将科技融入到生物体中，进而改变或增强其功能。随着融合会聚的发展，可能会出现新的有机体和新的认同感。

1.2 生物技术与数字技术的共同进化

当一个领域推动另一个领域的发展时，这种生物数字融合就出现了。生物学、数字科学与技术的共同进步使这些领域都得到飞速发展，甚至使生物和数字技术

以集成或互补的形式被开发出来。

数字技术的进步有助于生物数字技术的发展。复杂的生命系统（细菌、真菌、植物和包括人类在内的动物）越来越多的可以通过数字化工具和机器学习等应用进行监测和检测。这种借助数字技术对生命更深入的理解，意味着生物学或将受到影响和操纵，这在几年前是不可能实现的。例如，基因测序与人工智能（AI）结合促进了对基因表达的了解，通过改造有机体，并以新的方式创造有机化合物，甚至是完全人工合成新的有机体。同时，更多的生物学认知正在推动生物计算领域的发展。神经网络——以生物大脑为基础的计算机系统设计，就是生物学认知如何塑造数字技术的实例。

不论是天然的还是有机的，数字的、工程的或合成的，这些概念间的界限相对比较模糊。例如，以细菌、真菌和酵母菌作为微生物生产的宿主，用阿魏酸、丁香酚和葡萄糖为原料可以合成香草。虽然不是来自香草植物，但美国和欧盟的食品立法规定“天然前体的微生物转化”产品也被允许使用“天然食品”标签。

1.3 生物与数字系统的概念会聚

生物数字第三种会聚形式涉及观点的转变，可能会重塑生物和数字领域的框架和方法，从而促进两者融合。

作为生物数字化时代的结果，可预测性和数字化管理特征的生物学观点可能会变得越来越普遍。当今，生物学专业的学生都成长在数字化世界里，可能会有意无意地运用生物信息学和生物学概论的参考框架。

从数字角度，已经看到一个潜在的、相反方向的转变。计算最初是一种产生可预测、可复制和相对简单结果的手段。随着数字技术变得越来越复杂并紧密相连，系统开始模拟生物世界的特征，进而导致生态系统技术创新概念。生物模型也用于开发数字工具，例如，基于神经网络的人工智能。

2. 探索生物数字融合的契机

今天，已经有足够信号塑造生物数字化的未来。这些信号表明，生物科学和生物技术正处于一个快速扩张时期的风口浪尖——可能类似于 1985 年前后的数字计算。

当年，微软推出了 Windows 1.0，Atari 发布了 Atari ST 家用电脑，第一个域名 symbolics.com 网站被注册。计算机进入大众市场，为更多组织和环境创造与

过去几十年大型主机时代相比更多的价值。

生物数字融合也正显示出类似的轨迹——从制药和工业生物技术的集中模式转向广泛应用的商业和消费用途，从创造有机组织的生物打印机到能够程序化创造全新有机体的合成生物机器。例如，Printeria 是一种一体式生物工程设备，可以自动打印细菌中的基因线路，可以作为家用台式打印机使用，预计售价 1500 美元。

生物技术的快速发展得益于低成本、广泛可用和不断增强的数字化处理、存储和通信能力。然而，生物领域自身独特的属性同时也影响着数字系统。生物能力正在以新的形式用于数字网络、人工智能应用和计算的构建，提高它们的效率并创造出新机遇。

生物数字融合需要重新考量生物学，它既可以提供原材料，也可以开发创新流程，从而制造新型产品、服务和方式。当前的快速变化和创新迫使人们对生物和数字系统的未来与预期进行重新评估。这些领域的融合可能导致跨领域的系统性变革，并影响相关的政策制定。政府需要帮助管理风险并抓住可能出现的机遇。

3. 生物数字会聚将产生新的能力

人们已经通过新产品、新平台、新服务和新产业体验到了数字和生物系统的结合。生物数字的会聚融合正在开辟惊人的新途径（表 1），包括改变人类、改变或创造其他有机体，改变生态系统、感知、存储、处理和传输信息、管理生物创新、组织和管理生产和供应链等。

表 1 数字和生物系统会聚融合产生的新能力

正在扩展的新功能	生物和数字技术结合可以实现的结果	目前的成果（示例）
改变人类的新方法——身体、思想和行为		
改变人类基因组-核心生物学属性和特征	<ul style="list-style-type: none"> 基因测序和编辑的发展，例如 CRISPR/Cas9 机器学习有助于科学家预测编辑的目标基因 	<ul style="list-style-type: none"> 世界上第一例接受基因编辑的婴儿出生于中国 利用计算机科学工具增强分子生物学
监管、改变和调控人类的思想和行为	<ul style="list-style-type: none"> 神经技术通过读取大脑信号来监控注意力并控制疲劳 数字应用有助于提高大脑的健康水平 	<ul style="list-style-type: none"> SAP 和 EMOTIV 合作帮助 SAP 员工管理压力 2019 年美国人耗费 19 亿美元在应用程序上，用于保持他们的大脑敏锐度
监测、管理和影响身体功能	<ul style="list-style-type: none"> 对样本的基因测序有助于了 	<ul style="list-style-type: none"> 经证明, Guardant 对肺癌患者的

的新方法，预测、诊断和治疗疾病的新方法	<p>解复杂环境，例如人体微生物组</p> <ul style="list-style-type: none"> • 可佩戴或嵌入人体内的数字设备，用于治疗和监测功能 • 机器学习系统可以预测死亡率和治疗效果 	<p>液体活检比组织活检更准确、更迅速</p> <ul style="list-style-type: none"> • 加拿大滑铁卢大学的研究人员开发了一种自我供电的医疗监控传感器 • 亚马逊的专利将允许 Alexa 检测咳嗽或感冒 • AI 提供可靠的昏迷预后预测
创造新的器官并增强人体功能	<ul style="list-style-type: none"> • 基于数字设计和生产工具的 3D 打印组织可以定制器官 • 使用植入数字设备的生物黑客技术以增强身体功能 	<ul style="list-style-type: none"> • 生物工程师用 3D 打印出模拟肺组织和血管的结构 • 实验室培养的肾脏在动物受体中显示出完全的功能 • 植入芯片，实现高度个性化的双因素认证
体验与世界互动的新方式	<ul style="list-style-type: none"> • 实现通过大脑信号控制机器人的脑机接口 • 使用机器学习算法拓展假肢的功能和灵敏度 	<ul style="list-style-type: none"> • Neuralink 公布了一个集成数千个通道的脑机接口平台 • Infinite Biomedical 拥有 FDA 批准、深度学习驱动的假肢控制系统 • FDA 发布脑控假肢监管指南
创造新的器官并增强人体功能	<ul style="list-style-type: none"> • 用于模拟蛋白质折叠并促进药物设计的机械学习技术 • 用于测试疗法的 3D 打印组织 • 可以操作并在生物体内精确传递药物的纳米机器人和纳米材料 • 用于预测临床试验结果的机器学习 	<ul style="list-style-type: none"> • 能够以比以往更快的速度求解结构的人工智能蛋白质折叠算法 • 新西兰科学家 Shalini 打印肿瘤细胞，旨在让肿瘤长出来，从而确定何种疗法最有效 • 微型机器人在老鼠胃里爬行，用于治疗溃疡 • 麻省理工学院应用人工智能技术预测临床试验结果
改变或创造其他有机体的新方法		
改变生物体生长所需的输入类型或数量	<ul style="list-style-type: none"> • 基因测序和编辑进展，如 CRISPR/Cas9 	<ul style="list-style-type: none"> • 转基因烟草光合作用的增强使其产量提高了 40%
创造具有特定特征的全新生物	<ul style="list-style-type: none"> • 合成生物学从生物学、工程学、计算机科学和物理学获得启发，用于新生物实体的设计和构建 • 人工智能可以帮助设计具有特定特性的微生物 	<ul style="list-style-type: none"> • 像计算机辅助设计 (CAD) 工具一样，很多开源软件帮助研究人员分析和设计复杂的遗传线路，从而在生物体中满足特定功能 • Gingko Bioworks 设计定制有机体，“用于取代生物技术” • 科学家利用机器学习加速生物燃料的生产 • 像数字电路一样，被称为 PERSIA 的“生物万用表”使研究

		人员能够在体内和体外实时测量基因线路的生物学功能
改变生物体产生物质的内容和方式	<ul style="list-style-type: none"> 基因测序和编辑的进展，例如 CRISPR/Cas9 	<ul style="list-style-type: none"> 研究人员利用细菌，使用水、CO₂ 和阳光合成丁醇
改变生态系统		
改变和消灭整个种群	<ul style="list-style-type: none"> 利用 CRISPR 改变生态系统或以野生动物基因驱动的方式进行种系编辑 	<ul style="list-style-type: none"> 在基因驱动试验中，Target Malaria 在 Burkina Faso 释放转基因蚊子
大规模改变自然环境	<ul style="list-style-type: none"> 精确模拟碳捕获或太阳反射的地球工程方法 	<ul style="list-style-type: none"> 利用泥炭地中的工程微生物来储存和捕获碳以抵消气候变化
预测和管理疾病传播	<ul style="list-style-type: none"> 数字化流行病学依靠数字通信技术来分析和追踪疾病 	<ul style="list-style-type: none"> Flutracking 和 InfluenzaNet 利用数字化连接的志愿者网络追踪流感爆发
感知、存储、处理和传输信息的新方法		
利用生物系统存储信息的新方法	<ul style="list-style-type: none"> 在生物系统中存储大量数字信息，储存时间比目前的技术要长 	<ul style="list-style-type: none"> 微软和华盛顿大学展示了第一个全自动 DNA 数据存储系统
将生物转化为生物计算机	<ul style="list-style-type: none"> 利用生物有机体和属性进行计算 	<ul style="list-style-type: none"> 使用 CRISPR 在人体细胞内制造双核计算机
创建仿生材料	<ul style="list-style-type: none"> 从生物系统中汲取灵感，设计更高效的电子和数字系统 	<ul style="list-style-type: none"> 研究人员创造出比人类皮肤更敏感的人造皮肤和神经系统
管理生物创新、生产和供应链的新方法		
更高效和可扩展的研究和生产方法	<ul style="list-style-type: none"> 利用数字化系统扩大生物生产规模 利用数字化系统实现研究自动化 	<ul style="list-style-type: none"> Fraunhofer 在光生物反应器中实现微藻培养的自动化 实验室自动化正在加速研究 机器人农场主已经成功地自己种植和收获了大麦 走向自主抗生素发现
日益开放和高效的供应链管理	<ul style="list-style-type: none"> 机器学习和分布式账本可以跟踪材料并帮助审计 	<ul style="list-style-type: none"> 区块链成为生物制药的“真相之源”
细胞系和基因组开放合作，支持研究	<ul style="list-style-type: none"> 用于协助生物材料和代码有效交换的数字化网络 	<ul style="list-style-type: none"> Frozen Farmyard: 创建洁净肉类细胞系库

4. 生物数字系统的特征

生物数字系统的特征可能包括：民主化、去中心化、地理扩散、可扩展性、定制、对数据的依赖等，下面概述生物数字技术的特征及潜在影响。

4.1 民主化

细胞生物学和生物技术一般都是在无菌实验室和专业工厂里开发和生产，需要昂贵的设备和专业知识。如今，软件和硬件的进步正在消除对生物科学和生物技术生产的这些限制。远程控制系统有以数字形式传输指令集的能力，还有更高

水平的自动化，正在使以生物为基础的生产更加接近消费者。例如，相对实惠、提供线上消费者选择的产品包括：售价 30 美元的“基因设计入门工具包”，新手在厨房桌子上就能实现将一个基因插入到水母中并让其发光；另一种 CRISPR 试剂盒可让购买者编辑能够繁殖的细菌的基因组售价 159 美元；“分子生物学和基因工程”入门工具包的价格不到 170 美元。

基因组测序成本的降低是生物技术越来越广泛应用的主要原因。2003 年，首个全基因组测序（读取所有的 30 亿个碱基对）耗费 13 年，花费超过 30 亿美元。到 2016 年，价格降到 1000 美元左右。2019 年 7 月，这一价格为 599 美元，个性化遗传学公司 Veritas Genetics 预测，到 2022 年，这一价格将下降至 200 美元以下。因此，基因分型的消费市场（其中仅对少于基因组 1% 的基因测序）已经出现，支持对自身遗传情况感兴趣或希望揭示目标健康信息的人群，典型代表为 23andme.com 网站之类的服务。

4.2 去中心化

随着合成生物学能力的提高，可能会看到更多的去中心化。随着人们越来越擅长通过更便宜、定制的化学和生物工艺来进行组装（或培养）有机和非有机化合物，先前需要在特定区域产生的产品能够实现更广泛的生产。这包括在无需耕地的情况下创造食物或加工肉类的能力。实验室培养的肉类——发育成肌肉的细胞以及在受控环境中培养的肉类，可能改变分散在从农业到航运的多种行业规则。日本生物技术公司 Spiber 开发了一种称为 Brewed Protein 的转基因蛋白质，它可以在时装工业中用作纺织品，或在建筑和汽车工业中作为坚固材料。藻类生物反应器捕获 CO₂ 所产生的生物量可以转化为燃料、塑料和化妆品等产品。

4.3 地理扩散

去中心化使得缺乏天然资源的经济体能够通过生物数字技术生产先前必须进口的材料，从而与资源丰富的国家产生竞争。

开放资源不断增加可能会使地域分布迅速扩大。更普遍地说，生物数字知识的传播能够在具有意愿的地方迅速传播。一些研究人员允许访问其所有的数据。例如，华盛顿大学的生物工程先驱们正在致力于实现 3D 器官最新突破的商业化。通过 Volumetric 公司，他们已经免费公开了所有来自其 3D 打印血管网络的试验数据。

4.4 可扩展性

在数字生物世界中，可能实现快速缩放。数据可以快速复制，简单的生物体通常很容易复制。这意味着在这两个领域的生产中增加一个单位可能会迅速提高产量。换句话说，生物数字经济的特点是边际生产成本非常低。如果供应商之间存在竞争，那么这种特性可以显著地降低消费者购买许多生物数字产品或服务的成本。同时，低边际生产成本和易于复制也意味着生物数字融合经济中的创新具有高度可扩展性。

4.5 定制

生物系统既简单又复杂。作为动态系统，它们能以意想不到的方式进行反应或造成无法轻易避免的多重影响。这种复杂性是生物系统的特征，它意味着系统具有高度适应性和多样性。这表明可能有许多能够生产的途径，因此具有高度的定制潜力。生产方法和设备可以利用这种复杂性，通过单一系统来生产多种定制的生物产品。例如，合成生物学公司开发生产数百种不同生物和类似的过程产物。

在医疗保健领域，生物复杂性的案例之一体现在对人类微生物组的理解：数以万亿计的非人类细菌生活在人们身体里和身体表面，据估计其数量等于或多于人类自身的细胞。微生物群影响着人们生活的许多方面，从消化到心情再到身体的气味。未来可能出现针对微生物组的生物数字化疗法，最大限度提高个性化疗法的效率。

4.6 对数据的依赖

以生物数字会聚为特征的技术与应用能够在没有大量数据的情况下进行操作。例如，生物信息学领域使用数字化工具和数据分析了解生物系统，包括部署深度学习算法，分析细胞图像以检测人类不可能辨别的模式。诸如二代基因测序技术的数据密集型特点，给数据的共享、归档、集成和分析带来新的挑战。全球生物信息学市场预计将从 2018 年的 77.3 亿美元增长到 2023 年的 135 亿美元，年复合增长速度为 14.5%。

此外，所需的数据也千差万别。在生产工艺的上游，数据可能是企业的重要资产，以基因组、表型、多元化人类和多种独特有机体的形式呈现。生物勘探已经是药物开发的重要领域，未来可能会变得越来越重要，但同时也增加了医疗领域的伦理争议问题。

生物数字会聚的全部潜力可能需要恒定的数据流。这些数据的捕捉、管理、分享和监管可能成为资源密集型工艺，并且本身就可能成为高度发达的产业。

5. 初步的政策问题

生物数字世界的动态——民主化、去中心化、地理分布、可扩展性、定制和数据依赖，可能需要个人、政府、组织和行业改变他们的管理和经营方式。报告重点介绍了一些与政策相关的初步问题，这些问题涉及经济、社会、生态、地缘政治和管理等领域。

5.1 经济

基于传统资源的竞争优势是否会消失？

生产系统（结构、生产者、消费者等）可能会在生物数字会聚过程中发生显著变化。如果开发出生物来源的替代品，包括原材料在内的许多传统商品的需求可能会下降。向分布式生物工程产品的转变可能会降低土地或其他自然资源在国家和地区之间的分布。

民主化和去中心化的生产可能对依赖稀缺自然资源或独特地理因素生产产品和服务的国家、地区、社区和企业带来挑战。依赖于接近或特别接触现有稀缺资源的制造商为保持竞争力可能面临新技术开发的压力。

是否需要调整教育和培训系统从而解决潜在的技能差距？

生物数字化技术产品的生产和应用可能会变得更简单，但是它的设计和开发可能依然对技术要求很高。对数字化和生物技能的需求可能会随着生物数字的融合进程而提高，在数字化和生物交叉领域的人员将受到高度追捧，导致人才供不应求。

在生物数字化时代，数据保护和知识产权框架会是什么样子？

生物数字化服务的潜在影响可能会刺激国家或全球知识产权制度的转变，尤其是应对新兴突破性健康疗法市场、对食品安全具有特别意义的农业创新，以及可以缓解气候变化的方式。

知识产权和数据保护规则可能是生物数字化世界的瓶颈，既激励又约束创新。或者说，生物数字化工具的民主化可以促进许多生物数字创新，采用并行但不同的生物数字化创新方式，提高竞争力并降低由知识产权产生的成本。

在生物数字化世界，政策将如何创造竞争性商业环境？

平台可能在未来的发展中发挥着重要作用，已经实现在线广告、社交网络和电子商务等。数据政策可能会影响大型组织在生物数字经济中是否具有优势，包括访问、购买、管理和保护大量数据的占有能力。

生物数字会聚的数据依赖性意味着数据需求可能会大幅增高，尤其是人类、动物、植物和细菌等的的数据。大型平台可能潜在地收集和控制大量信息和数据，一些平台可能试图通过操作封闭生物数字化生态系统来获得价值。

5.2 社会

社会观念是否会转向健康的生活方式？

健康的含义可能会在生物数字会聚过程中发生改变，进而影响社会关系。今天，健康更多的是与避免疾病并从事全方位人类活动的的能力相关。

在生物数字会聚中，关于人体、微生物组和生物功能的领域可能会创造新的机会来了解并影响人们的健康。健康的最大化可能涉及广泛的、更精确的行为和营养相关干预措施。随着数据变得更容易获取，健康可能成为身份的象征。益智药物（改善大脑功能的药物）的准入和投资也可能引发社会政策问题。

哪些政策有助于解决健康不平等问题？

生物数字会聚可能加速开发能够将人的能力提高到最高水平的技术，无论是通过药物、营养补剂、假肢还是神经技术。获得昂贵技术能力的不均衡可能会进一步使得经济不平等复杂化。

尽管不平等的访问可能会影响弱势群体，生物数字化健康产品和服务的民主化或可弥补这个缺口。例如，如果能生产安全、可靠、廉价的救命药，健康不平等也会相应减少。

哪些政策可以促进伙伴和利益相关方之间的信任？

生物数字会聚依赖广泛的生物数据，可能会改变公民与提供服务的企业之间的关系。企业和个人之间的关系可能需要更高的信任水平，因为企业正在搜索公民生活和身体的高度私密数据。例如，人类的“数字双胞胎”可能成为医疗保健以外的宝贵资产。社会服务、司法系统、环境服务和教育提供者可能都需要信任、管理并处理与人们及其周围世界相关的、越来越私密的数据。

向公众公开数据的策略可以促进生物数字化融合，也会制造障碍。许多政党都能轻松地提取或利用与个体基因组、生物群落、健康标记和环境相关的个人数

据，这已经超越了现有的个人健康信息保护法，对监管提出了改进的新要求。随着基因测序的价格下降和普及性升高，先前仅限于司法系统和保险业的隐私问题在很大程度上也会出现在其他社会领域。

无处不在的基因测序可能会给家庭和社区带来隐私问题，考虑到个人的 DNA 测试也提供了关于生物学亲属的信息。政府可能需要进行超越个人隐私的思考，考虑集体隐私的概念，尤其是遗传数据可能会产生对他人的权利或自由的影响情况。

5.3 环境

土地利用和自然环境可能发生何种变化？

生物数字化融合可以改变人类与土地和自然环境相关的工具和价值。如果对传统生产原材料的需求下降，则资源价格可能下降，导致土地利用的变化。工业区的建立可能以牺牲耕地为代价，特别是在提供数据、生态服务和生物勘探原料的、生物多样性可能具有新价值的重要地区。

气候挑战的规模可能使得地理工程和生物工程更具吸引力和可行性。定制微生物的释放可以有助于泥炭地更高效地吸收 CO₂。

生物数字化技术可以有助于实现可持续发展和循环经济策略，更有效地利用材料，并降低生产和资源开采对环境的影响。例如，Fraunhofer IGB 开发出一种新方法，使得生物塑料更容易实现生物可降解并可安全食用。由此产生的无机-有机杂化聚合物可以阻止影响食物的气体和蒸汽，并且适用于生物塑料和纸张包装，使得涂层产品完全可生物降解（例如外卖食品的包装）。

5.4 地理

在全球生物数字化世界中，哪些政策是竞争所必需的？

生物数字会聚的经济效益刺激了国家竞争，还起到保护行业、防止一些国外资本收购国内创新工作。由美国外国投资委员会管理的修正案限制了国际资本对美国生物技术公司的投资。

各国也开始基于严格和快速的监管批准进行竞争。一些国家可能会尝试通过提供有利于快速生物数字化发展的监管环境来吸引投资，可能以牺牲其他地方正在加强的现行生物伦理规范和实践为代价。

在生物数字化世界中，需要什么来保护公民安全？

合成生物学包括许多两用技术，也具有军民两用潜能。对技术的恶意使用引发了人们的担忧，特别是那些在生物数字化领域已经广泛使用的技术。

生物安全在依赖生物数字化系统的世界可能很重要。例如，美国国防部高级研究计划局（DARPA）的安全基因倡议旨在开发工具来控制、反击，或许可以实现逆转基因组编辑的效果，包括在生物系统中进行基因驱动。同时也存在实验室制造的致命病毒被恶意、无意、意外释放的可能性。阿尔伯塔大学的病毒学家已经能够使用合成生物学技术，通过将邮购的 DNA 序列拼接并与 2006 年发布的马痘病毒（一种类似天花的病毒）基因组序列进行匹配，进而重建马痘病毒。

5.5 监管

监管和政策制定如何考量社会对生物数字化技术进步的关心？

技术可行性和社会接受度之间存在巨大差异。生物数字会聚可能会暴露各国政府内和政府间政策与监管的缺口与滞后。它也可能为生物数字化系统新整合及应对监管方法提供机会，就像其他促使监管系统更加灵活的新兴技术一样。

社会许可证对技术与监管途径的发展非常重要，特别是人类生殖和食物系统的相关途径。例如，对转基因作物法律和社会应对方面的差异已经导致了北美和欧洲的监管环境完全不同，这是由不同的风险管理方法和部门之间的权力差异导致的。准入的监管障碍可能会影响规模较小的运营商，特别是在受到高度监管和司法管辖的食品和医疗领域。

社会关注往往会影响监管系统和改革进程，特别是在安全、定价、使用权和劳动权方面。社会许可证往往是一个比法律救济或强制执行更为重要的问题。

当前的税收框架是否适合生物数字化世界？

数字化领域的特点可以扩展到生物数字化领域，使其税收难以被追踪和收集，反过来又可能带来对什么进行征税、由谁负责征税等方面的挑战。生物数字化产品的潜在许可价值来自其组成部分，而不是组合终端产品本身。这可能会限制当局对最终产品的销售进行评估和征税，可能会降低总体增值税收入。

是否需要重新评估公共财政系统，从而在生物数字化世界中保持可持续性？

如果生物数字会聚的健康效益显著，除了长期寿命带来的效益，增加预期寿命也会为税收、社会保障、医疗保健和住房制度带来挑战。退休基金、公共医疗费用和老年人的住宿等方面都会受到积极和消极的影响。