

引用格式: 张拓宇, 孟庆海. 基于产业视角的合成生物学发展态势研究[J]. 世界科技研究与发展, 2024, 46(1): 58-71.

基于产业视角的合成生物学发展态势研究^{*}

张拓宇^{**} 孟庆海

(天津市科学技术信息研究所, 天津 300074)

摘要:近年来,受技术突破、政策支持、产业和资本跟进等因素驱动,合成生物学迅速从实验室走向市场,迎来产业化发展的关键时期。本文梳理了 2020 年以来国内外相关战略规划、政策法规、市场动态、商业合作和金融投资等信息,从产业视角对合成生物学发展态势进行分析。政府方面,合成生物学成为各国生物经济战略中的关键引擎,应用于医药、化工、材料、农业、食品等关联行业的技术路线和规划目标进一步清晰,支持新技术新产品商业化的监管机制不断优化,技术管控和科技安全问题受到关注。市场方面,基于合成生物学的实用成果相继迎来商业化“里程碑”,合成生物企业与传统制造企业“双向奔赴”、协同合作日益紧密,市场投资保持信心并趋于商业理性,有利产业发展的健康生态正加快完善。为加快推动我国合成生物学产业发展,建议进一步研究制定关键领域技术路线,支持底层使能技术、产业核心关键技术与核心装备攻关,推动重点行业应用示范,增强先进生物制造设施、数据资源等能力建设,鼓励各方共建有利合成生物产业化发展的产业生态。

关键词:合成生物学;工程生物学;生物经济;生物制造;产业生态

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2023.06.002

Trend Analysis of Synthetic Biology in Industry Perspective^{*}

ZHANG Tuoyu^{**} MENG Qinghai

(Tianjin Institution of Science & Technology Information, Tianjin 300074, China)

Abstract: Driven by technological breakthroughs, policy support, and industrial and capital follow-up, synthetic Biology is ushering in a time of industrialization. This paper examines the recent strategic planning, policies and regulations, market dynamics, business cooperation, financial investment and other information at home and abroad, and analyzes the development trend of synthetic biology from the industrial perspective. In many countries, synthetic biology has been regarded as a key in national bioeconomy strategies, and the technical roadmap and objectives have been clarified for medicine, chemical industry, materials, agriculture, food and other related industries. The regulation have been continuously optimized to support the commercialization of new technologies and new products, and technical control, and technological safety have attracted attention. In business, more and more practical products based on synthetic biology have successively ushered in commercial “milestones”, cooperations between synthetic biology enterprises and traditional manufacturing enterprises have been closely invested remain confident and tend to be commercially rational, and the environment conducive to industrial development is growing improvement. For the synthetic biology industry in China, it is suggested to clarify the technical roadmap of key fields further vigorously invest in the research of enabling technologies, industrial technologies and

^{*} 天津市科技计划“天津市重点领域技术监测预警平台建设及应用”(20PTZSYS00010)

^{**} E-mail: zhangtuoyu@tj.gov.cn

core equipment, promote the industrial application and demonstration, enhance the capabilities of advanced biomanufacturing facilities and bio-data resources, and explore the high-quality industrial environment construction.

Keywords: Synthetic Biology; Engineering Biology; Bioeconomy; Biomanufacturing; Industrial Ecology

合成生物学是在现代生物学和系统科学基础上发展起来、融入工程学策略、多学科交叉会聚的新兴交叉领域,通过将自然界存在的生物元件标准化、去耦合和模块化,理性设计、改造或重新构建生物系统,以满足人类生产生活的生物功能需求^[1,2]。合成生物学与医疗、材料、能源、化工、农业、食品、环境等诸多行业紧密关联,在引领行业关键技术升级换代、促进传统行业转型和催生高成长新业态方面日益显现出颠覆性、渗透性的广泛作用。在经历世纪初前 10 年的技术积淀后,随着基因组编辑效率大幅提升、“设计-构建-测试-学习(Design-Build-Test-Learn, DBTL)”环路趋于成熟、“BT+IT”深度融合等趋势,合成生物学开始进入应用开发、产业落地的增长阶段^[3]。本文从政府、市场两方面入手,通过梳理近年来相关战略规划和政策措施、产业化进展、商业合作与投融资等动态,对当前合成生物产业化进程进行分析,并对我国合成生物产业布局提出初步建议。

1 国家战略规划和政策推动

1.1 国家生物经济战略推动产业化布局

2020 年以来美国、英国、德国、日本等国家分别发布或更新生物经济战略,我国也在 2022 年发布首个生物经济发展规划。在各国生物经济战略中,合成生物学(Synthetic Biology)、工程生物学(Engineering Biology)、生物制造(Biomanufacturing)被视作驱动生产模式向生物经济转型的核心力量,事关国家未来竞争力与国家安全的战略方向,应对生态环境和气候变化等人类重大议题的有效手段。由相关文件表述(表 1)看到,国家战略顶层设计对合成生物学的定位已不再限于前沿技术

布局和科学研究范畴,而更关注其在塑造经济生产力与核心竞争力、促进可持续发展、维护国家安全等方面的现实价值。以美国为例,2021 年《创新与竞争法案》以产业为导向提出“国家工程生物学研究与开发计划”,2022 年发布“促进生物技术和生物制造创新”行政令,推动生物技术和生物制造在健康、气候变化、能源、粮食安全、农业、供应链弹性,以及国家和经济安全方面创新应用,以保持美国技术领先地位和经济竞争力。随后卫生与公共服务部、国防部、能源部、农业部等相继发布投资计划,用于支持生物制造加强(医药、材料、化学品、农业等)供应链、改善国内生物制造能力和促进生物基产品市场化。中国《“十四五”生物经济发展规划》围绕生物技术赋能经济社会发展,构建现代生物产业体系,推动合成生物学技术创新及在新药开发、疾病治疗、农业生产、物质合成、环境保护、能源供应和新材料等领域应用。此外我国“十四五”医药、石化、轻工、农业等行业规划中,也分别提出合成生物学在医药绿色制造、生物化工、生物基材料、基因编辑动植物、未来食品等领域的产业化布局方向(表 2)。

1.2 重点领域产业技术路线进一步清晰

美国工程生物学研究联盟(Engineering Biology Research Consortium, EBRC)自 2019 年以来陆续发布《工程生物学:下一代生物经济路线图》等 5 份路线图,围绕工业、医药健康、食品农业、环境、能源、材料、国防等重点行业探讨工程生物学产业化应用方向,就短期(2~5 年)、中长期(10~20 年)提出能力突破和里程碑目标^[21-25]。2023 年美国白宫科技政策办公室发布《美国生物技术和生物制造明确目标》提出 21 项主题、49 项目标,包括

表 1 近年来部分国家经济战略中的合成生物学/工程生物学

Tab. 1 Synthetic Biology/Engineering Biology in National Economic Strategies

发布国家	发布年份	文件名称	关于合成生物学/工程生物学的相关表述
美国	2021	美国创新与竞争法案 2021 ^[4]	“生物技术、医疗技术、基因组学和合成生物学”列为 10 项重点新兴技术提出支持国家工程生物学计划,以促进社会福祉、国家安全、可持续发展、经济生产力和竞争力
	2022	芯片与科学法案 2022 ^[5]	进一步强化“国家工程生物学研究和发展计划”具体举措,发挥其在提升经济竞争力等方面的作用;
	2022	“促进生物技术和生物制造创新”总统令 ^[6]	分别从 11 个方面提出支持生物制造的具体政策,包括:扩大国内卫生、能源、农业和工业部门生物制造能力,鼓励生物基产品采购等;随后发布 20 亿美元投资计划,资助内容涉及生物工业制造基础设施,生物制造在医药、能源、材料等行业应用,生物基产品市场化等
	2022	生物制造促进生物经济 1) ^[7]	生物制造是将生物经济创新产品带入商业规模的引擎,有助于解决资源利用、气候变化、经济稳定和环境问题等挑战加强美国国内生物制造基础设施短板
英国	2021	国家创新战略 ^[8]	工程生物学列为优先发展的 7 大技术方向之一,认为在此领域建立领先地位事关国家安全和繁荣
德国	2020	国家生物经济战略 2020 ^[9]	关注工业可持续发展相关议题,将合成生物学视作开发生物质原料的重要手段
加拿大	2020	加拿大工程生物学白皮书 ^[10]	重视工程生物学在促进低碳制造、粮食安全、先进健康等方面的经济社会价值
韩国	2022	第五次科技总体规划/国家战略技术培育计划 ^[11,12]	扩大合成生物学、数字生物技术等先进生物技术的研发;在 12 项关键技术之外,将合成生物学等列为未来有希望的技术领域推出“国家合成生物学计划”,预期未来 10 年内促进 30% 的制造业向生物产业转型
中国	2022	“十四五”生物经济发展规划 ^[13]	推动合成生物学关键技术创新,以及在医药、农业、环境、能源和材料领域应用

1) 按照美国政府“促进生物技术和生物制造创新”行政令,2022 年 12 月,由总统科学技术顾问委员会向总统提交该报告。

表 2 近期我国相关产业规划中的合成生物学

Tab. 2 Synthetic Biology in National Industrial Strategy

规划文件	发文单位	合成生物学行业应用的主要阐述
“十四五”工业绿色发展规划 ^[14]	工信部	发展聚乳酸、聚丁二酸丁二醇酯、聚羟基烷酸、聚有机酸复合材料酸等生物基材料 大宗发酵制品高效生产菌种和绿色提取精制等技术和装备改造
“十四五”全国农业农村科技发展规划 ^[15]	农业农村部	利用基因编辑和合成生物工具来优化农业科技发展布局,布局前沿与交叉融合技术,发展未来食品制造
推动原料药产业高质量发展实施方案 ^[16]	国家发改委/工信部	加快合成生物技术、连续流微反应、连续结晶和晶型控制等先进技术开发与应用
关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见 ^[17]	工信部等六部门	积极发展生物化工,鼓励基于生物资源,发展生物质利用、生物炼制所需酶种,推广新型生物菌种;强化生物基大宗化学品与现有化工材料产业链衔接,开发生态环境友好的生物基材料,实现对传统石油基产品的部分替代
轻工业高质量发展指导意见 ^[18]	工信部等五部门	植物油脂、微生物、发酵产品等生物来源替代石油来源原料的绿色制造工艺
“十四五”国家信息化规划 ^[19]	中央网络安全和信息化委员会	“DNA 存储”写入战略性前沿性技术布局方向
科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030 年) ^[20]	科技部	发展基于合成生物学、太阳能直接制氢等绿氢制备技术 研究基于生物制造的二氧化碳转化技术,以及水、二氧化碳和氮气等为原料直接高效合成甲醇等绿色可再生燃料技术 研发绿色生物化工技术和低碳升级改造、生物质基材料及高附加值化学品制备技术

5 年内基于合成生物学和生物制造能力生产至少 25% 的小分子药物活性药物成分,20 年内通过生物制造途径满足至少 30% 的化学品需求,在供应链瓶颈环节(芯片用原材料、航空和航海燃料等)开发 10 种新生物制造产品等^[26]。澳大利亚联邦科学与工业研究组织(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO)2021 年发布《国家合成生物学路线图》,从“基础、潜在市场、利润、科研实力、终端用户”等维度,对合成生物学在食品、医药、环境、化工、材料、能源、矿业等领域产业化场景进行了梳理^[27]。2021 年,英国研究与创新机构(UK Research and Innovation, UKRI)和国防科学与技术实验室发布英国国家工程生物学计划(National Engineering Biology Programme, NEBP),支持合成生物学在食品、生物医学、清洁增长、环保、仿生设计、新材料、生物工程细胞和系统等行业应用^[28]。德国 2022 年发布的《德国生物经济:生物基和可持续未来机会》对基于合成生物/工程生物学的生物经济产业化方向也进行了探讨^[29]。

这些路线图的制定为合成生物学在重点产业方向落地理清了技术路线、关键节点、里程碑目标(尽管有些目标有待商榷)和潜在风险,为有针对性实施投资计划、能力建设、商业化行动和制定政策提供了参考。截至 2023 年 4 月,中国尚未见公开发布的、针对重点行业设定细化目标和里程碑节点的同类技术路线文件。

1.3 市场准入与监管机制创新助推产业化进程

近年来各国针对基于合成生物学的新技术、新产品临床应用和市场准入议题开展了大量合规性研讨论证,本着鼓励创新、审慎包容的原则,监管机构积极探索管理机制创新,为合成生物产品由实验室走向商业化进一步消减政策阻碍,加强

技术指导和规范监管。

医药领域,基于合成生物学的创新疗法和医药生产制造方法获得监管机构认可,技术审评规则进一步清晰完善。2022 年 3 月,美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)发布涉及人类基因组编辑的基因治疗产品指南草案,为人类体细胞基因组编辑产品的新药研究申请(Investigational New Drug Application, IND)提供指引^[30]。2023 年 1 月,欧洲药品管理局(European Medicines Agency, EMA)受理 Vertex 和 CRISPR Therapeutics 递交的 CRISPR 基因编辑疗法 Exa-cel 监管申请,已获美国 FDA 批准和英国 MHRA 有条件批准上市^[31]。2021 年 8 月弈柯莱生物和通化东宝合作的首个使用生物合成技术的西格列汀仿制药获批上市,成为中国正式接受利用合成生物方法制造医药类产品的标志性事件^[32],2022 年弘合生物首个基于合成生物学的 1 类创新药 KH617 获得中美两国药监部门新药临床试验“双报双批”^[33]。

农业领域,对基因编辑育种的监管有所放宽。2023 年 2 月欧洲最高法院判定,常规使用且具有长期安全记录的体外植物基因编辑技术被排除在限制使用转基因生物(Genetically Modified Organisms, GMO)的欧盟法律之外,有利于基因编辑技术在农业育种及下游产品开发中的应用^[34]。2023 年 3 月,英国政府通过《遗传技术(精准育种)》法案,允许使用基因编辑等技术,有针对性地精准改变生物体遗传密码以获得更有利特性,包括对动物进行精准育种以使其免受疾病困扰^[35]。我国也在 2022 年 1 月发布《农业用基因编辑植物安全评价指南(试行)》,规定未引入外源基因的基因编辑植物不再参照转基因植物安全评价,对目标性状不增加环境安全和食用安全风险的基因编

辑植物,经中间试验后可直接申请生产应用安全证书^[36]。2023 年 4 月,舜丰生物获批我国首个农业用基因编辑生物安全证书。

食品领域,2020 年新加坡成为全球首个允许将细胞培养肉向普通消费者销售的国家, Eat Just 的细胞培养鸡肉获批进入市场,2023 年新加坡食品局(Singapore Food Agency, SFA)再次向该公司旗下品牌 Good Meat 发出全球首个在细胞培养肉生产中使用无血清培养基的监管批准^[37]。2023 年 3 月, Good Meat 收到美国 FDA 的“no question”信函,认为其细胞培养鸡肉可安全食用,此前 Upside Foods 已于 2022 年末成为首个获该项认可的细胞肉品牌^[38,39]。2023 年 2 月,以色列精密发酵公司 Remilk 获得 SFA 监管批准,允许在新加坡销售其精密发酵乳清蛋白,同时该公司也在美国获得 GRAS (一般认为安全)认证^[40]。随着中国、日本等国加紧研讨针对细胞培养肉的监管政策^[41,42],以人造肉为代表的合成生物新食品将获得更大市场增长空间。

1.4 加强技术管控维护产业和科技安全

随着合成生物学在经济、社会及国家安全方面的战略价值凸显,多国相继出台管控措施,保护本土合成生物关键核心技术,维护本土生物制造产业安全和科技安全。美国商务部《商业控制清单(Commodity Control List, CLL)》中已将生物反应器、储罐、发酵设备、分离设备、核酸合成等合成生物关键技术和设备列入管控范围。2022 年出台的“促进生物技术和生物制造创新”总统令及后续相关文件明确提出,减轻国外竞争对手对本土生物制造供应链、基础设施和生物数据安全威胁。2022 年修订的《关键和新兴技术清单》,包含“核酸和蛋白质合成、生物计量学、生物制造和生物加工技术”^[43],该清单将在美国政府各部门制定政策

时作为参考。此外,美国卫生与公共服务部(HHS)正在推进修订《合成寡核苷酸供应商使用者筛选框架指南》,将生物两用物项监管与技术出口管制、外商投资审查等机制相互衔接,加强对上下游客户、终端使用者、生产商、供应商和中间商等实体管控^[44]。英国《国家安全和投资法案》于 2022 年正式生效,针对“能对实体产生控制或超过某个阈值的投资交易”引入强制性申报制度,法案将“合成生物学基础科学研究、生产和服务支持”列为 17 项关键投资领域之一^[45]。中国方面,2023 年 1 月商务部就《中国禁止出口限制出口技术目录》修订征求意见,拟将 CRISPR 基因编辑技术、合成生物学等技术列入禁止或限制出口技术条目^[46]。

2 产业化重要进展和生态建设

2.1 实用化产业化成果加速落地

如表 3 所示,越来越多合成生物学成果加快实用化和商业化,在医药、化工、材料、农业、能源、食品、采矿等行业创造出新的市场机遇。医药领域,2021 年以来 Beam Therapeutics、Codagenix、Synlogic 等在研管线相继迎来“里程碑”,进入临床试验并获得监管机构认证,基于合成生物学的基因编辑药物、工程化细胞疗法、疫苗设计、工程菌药物、诊断产品不断带来诊疗新技术变革; Double Rainbow、Demetrix、川宁生物、普利制药等分别实现天麻素、医用大麻素、红景天苷等产品商业化,医药化学品、原料药绿色生物制造规模不断扩大。化工领域, Conagen 基于精密发酵技术实现 99% 高纯度红景天苷、高纯度萝卜硫素、维生素 K2、二氢白藜芦醇和稀有染料“骨螺紫”等天然产物商业化, LanzaTech 等在工业废气回收和零碳负碳生物转化方面取得进展,以精密发酵、无细胞制造、二氧化碳生物转化为代表的合成生物技术在高

表 3 合成生物部分产业化进展
Tab.3 Top10 Progress of Synthetic Biology

行业	企业	重要进展情况
医药	Beam Therapeutics	镰刀型细胞贫血症碱基编辑基因疗法 BEAM-101 获 FDA 批准进入临床试验
	ExcisionBio	艾滋病 CRISPR 基因编辑疗法 EBT-101 获 FDA 批准临床试验
	CRISPR Therapeutics	采用 CRISPR 基因编辑技术的同种异体 CAR-T 细胞疗法 CTX110 获 FDA 再生医学先进疗法认定 (RMAT)
	Codagenix	采用基因编辑技术的鼻内减毒活疫苗 CodaVax™ -RSV 通过 FDA 批准进入临床试验并获快速通道指定,用于预防婴幼儿 RSV 感染
	Synlogic	高胱氨酸尿症基因工程菌药物 SYNBI353 获得 FDA 快速通道资格
	PsyBio Therapeutics	宣布将在获得必要批准后启动其生物合成裸盖菇素产品临床试验
	弈柯莱/通化东宝	使用生物合成技术的西格列汀仿制药获批上市
	普利制药	实现基于合成生物学技术的高纯度(98%)红景天苷公斤级以上稳定供货
化工	Conagen	基于精密发酵技术的 99% 高纯度红景天苷、高纯度萝卜硫素、维生素 K2、二氢白藜芦醇和稀有染料“骨螺紫”相继实现商业化
	Double Rainbow	首个天麻素(Gastrodin)商业化规模生物合成
	C16 Biosciences	完成首个工业规模 50000L 发酵并推出利用工程化酵母菌株精准发酵的棕榈油生物制造替代品 Palmless
	Calyxt	利用 Plant Cell Matrix™ 平台成功生产植物源角鲨烯天然替代品
	DSM	开始向客户提供利用酵母菌株生产的全生物基维生素 A 样品
	Toray	宣布利用微生物发酵技术和分离膜纯化技术从不可食用生物质衍生糖提取 100% 生物基己二酸
	LanzaTech	宣布成功开发生物催化剂,可直接利用细菌从 CO2 生产乙烯
	川宁生物	宣布完成红没药醇中试验证及约 3000 公斤/月级别规模试生产
材料	凯赛生物	首次实现癸二酸生物法大规模产业化生产并开始销售
	蓝晶微生物	发布首款微生物发酵制造的海洋降解生物聚合物“蓝晶™ PHA”
	Polybion	完成细菌纤维素生物制造设施开发,推出动物皮革替代材料 Celium®,最大产能预计年产 110 万平方英尺
	Cambrium	推出面向高级个护理配方设计、基于酵母精密发酵生产,与皮肤 100% 相同的胶原蛋白产品 NovaColl™
	MycoWorks	联合奢侈品品牌 Nick Fouquet 推出菌丝体材料制成的时尚单品
	Motif FoodWorks	发酵血红素蛋白 HEMAMI™上市销售,并获得 FDA 公认安全认证(GRAS)
	Remilk	在新加坡获准销售无动物牛奶产品“Cow-Free”牛奶
	Solar Foods	新加坡批准含有其微生物发酵蛋白粉末 Solein® 的食品上市销售
食品	TurtleTree	宣布将推出首个精密发酵生产的乳铁蛋白 LF+
	Myco Technology	菌丝体发酵产品 FermentIQ MLL 和 PTP 通过欧盟委员会新型食品审批,可安全用于食品和饮料类别
	周子未来	百升级生物反应器中完成种子细胞扩大培养,国内细胞培养肉首次进入百升级生物反应器试生产
农业	Pivot Bio	推出工程固氮菌产品 PROVEN® 40 On-Seed 和 RETURN® On-Seed,可在种植过程中将微生物氮源与种子无缝结合
	DNA Script	推出酶促法驱动的台式 DNA 合成仪 SYNTAX
平台/工具	Codex DNA	推出全自动、高通量台式 DNA 合成仪 BioXp™ 9600
	Ansa Biotechnologies	成功从头合成 1005 个碱基的 DNA 序列,是目前单次合成最长的 DNA 寡核苷酸
	金斯瑞 GenScript	推出用于 DNA 合成的高通量半导体芯片
	天壤 XLab	上线国内首个蛋白质设计工作台 xCREATOR

值化学品生产、化工行业低碳转型等方面展现积极作用。材料领域,凯赛生物首次实现癸二酸生物法大规模产业化生产并开始销售,蓝晶微生物首发海洋降解生物聚合物“蓝晶™ PHA”, Geltor、Polybion、Cambrium 分别推出胶原蛋白、细菌纤维素、菌丝体材料等产品,体现绿色、健康和可持续理念的生物基材料越来越多进入美妆、服装、时尚行业。食品领域,随着 Eat Just 细胞培养鸡肉、Remilk 无动物牛奶“Cow-Free”、Solar Foods 微生物发酵替代蛋白 Solein™ 等相继获准上市销售,合成肉类(包括鱼肉)、无动物奶制品、低热量甜味剂和功能添加剂、高价值替代蛋白等市场前景广阔。农业领域,基因编辑育种、工程微生物正在帮助提高植物生长和农业产量、减少农业合成肥料使用、提高作物营养价值,光自养生物系统作为疫苗、化学品等生物制造平台已经在实际生产中应用。

同时也必须看到,合成生物学产品的商业化进程依然面临挑战:一是研发和产业化过程中固有的技术风险,特别是规模化、连续性和(非实验室)现实生产条件下的高效稳定生产仍是制约产业化进程的瓶颈;二是能源和原料投入、工程化改造等环节的成本控制,特别在简单大宗化学品制造方面尚未体现出与传统化学工艺的替代优势^[47];三是市场推广受监管政策因素和下游客户、终端消费者主观因素影响较大,如公众对微生物精密发酵、细胞培养等替代蛋白,对基因编辑与转基因农作物的认知^[48];四是现有生物制造设施不足以满足越来越大的产能扩增需要, Synonym Bio 基于其 Capacitor bio 发酵设施数据库发布《全球发酵产能状况》显示,现有发酵设施主要集中在合同制造与学术科研所需的实验室规模(29%)或中试规模(41%),而示范规模(15%)和商业规模(16%)设施相对较少^[49]。

2.2 合成生物与传统行业企业密切联动

合成生物学正在为传统产业带来颠覆性变化,成长中的合成生物企业与传统行业企业间正“相向而行”建立优势互补、互利共生的伙伴关系。以合成生物企业视角看,在从实验室走向生产过程中普遍面临技术、规模、成本、监管、供应链和市场渠道建设等多重挑战,通过与传统企业合作,能够获得其产业端关键技术、市场洞察、基础设施、法规知识等支持,分享原料供应、分销伙伴和销售渠道等资源^[50]。以传统制造企业视角看,与合成生物企业建立合作,有助于帮助其丰富产品管线,彰显科技、低碳品牌价值和形象,破解碳基能源依赖、原材料成本、供应链可持续、生物伦理等瓶颈和挑战^[51]。从合作方式看,包括组建行业联盟、合作开展技术研发、收购并购、直接投资(包括以旗下风投、孵化机构进行投资)、合资成立新公司、共建市场销售渠道等。

本研究汇总 2021 年以来涉及主要合成生物企业的 380 余项商业合作信息,部分信息如表 4。可见越来越多的传统行业巨头正在加入合成生物“朋友圈”,合作方向涵盖医药化学品、基因与细胞治疗、微生物疗法、生物基材料、高值化学品、生物燃料、食品和添加剂、农业微生物制品等。Ginkgo 发布 2022 年财报显示,其细胞铸造厂(Foundry)业务全年收入 1.44 亿美元,增长 27%,在医药、农业与食品、工业与环境、消费品等业务板块新增细胞制造项目 59 个,同比增长 90%,其中仅医药领域已经与罗氏、默克、礼来、渤健、诺和诺德、Moderna 等知名药企建立合作,涵盖小分子药物、细胞和基因治疗、生物制品、微生物组疗法、疫苗递送系统等管线^[52]。LanzaTech 以其碳转化核心技术,与巴斯夫、住友化学、首钢等工业企业开展工业废气碳回收及转化技术开发,并与奇华顿、

表 4 合成生物企业与传统行业企业合作情况

Tab. 4 Cooperation of Synthetic Biology and Traditional Industry Enterprises

合成生物企业	传统行业企业	合作内容
AgBiome	BASF、FARMHANNONG（LG 化学子公司）	生物杀菌剂
AgBiome	MOSAIC	土壤微生物制品
AMSilk	Mercedes-Benz、Airbus	生物材料、航空复合材料
Amyris	Superordinary、Rose Inc、Givaudan	美妆、护肤品
Amyris	DSM、Ingredion、Minerva Foods	香精香料、食品配料
Beam Therapeutics	Pfizer	碱基基因编辑疗法
Beyond Meat	Panda Express、PEPSICO、McDonald、KFC	植物肉
biomass	HM、IBF	生物水泥
Bolt Threads	Adidas、Stella McCartney、Kering	Mylo 菌丝体纤维材料
Cemvita Factory	Mitsubishi、OLCV（西方石油旗下公司）	工业脱碳、生物乙烯
Codexis	Takeda、Novartis、GSK、Merck、AstraZeneca	医药用蛋白质工程平台
Debut	DSM、DIC	食品、化妆品天然色素
Genomatica	Creo、Covestro、Unilever、Kao、L’Oréal	生物基化学原料
Genomatica	Aquafil、Lululemon、Asahi Kasei	生物基尼龙
Ginkgo Bioworks	Biogen、Microba、Roche、Merck、Novo nordisk	多种医药管线
Ginkgo Bioworks	Cronos Group、Givaudan、Sumitomo、Solvay	香料、天然产物等化学品
Ginkgo Bioworks	Bayer、Elanco Animal Health Incorporated	农业生物制品
LanzaTech	Woodside Energy、Bridgestone、NextChem、首钢	碳转化乙醇乙烯等
LanzaTech	Givaudan、Lululemon、On	碳转化生产化学品、材料
Modern Meadows	Everlane、Limonta	生物皮革服装面料
Spiber	GOLDWIN	蛛丝蛋白服装面料
Synlogic	Roche	炎症性肠炎药物
Twist Bioscience	Centogene、BoehringerIngelheim	生物信息学服务
Viridos	Exxon Mobil	藻类生物燃料
恩和生物	BASF	生物基产品及工艺流程
蓝晶微生物	Thai Wah、四环医药、Helian Polymers、Chori	PHA 生物基材料
慕恩生物	集萃药康、恒瑞医药	工程菌药物
慕恩生物	先正达、百果园、新农股份	农用生物制品
微构工场	安琪酵母	PHA
弈柯莱生物	江苏七洲绿色化工	精草铵膦绿色生物合成

Lululemon 等客户合作开发日化、服装面料等下游工业制品。同时,越来越多消费品企业合成生物技术,以提升其“健康、绿色、科技”等品牌形象,联合利华与 Genomatica 成立合资企业开发替代棕榈油和化石原料生产的清洁护理成分,该合作迅速吸引了花王、欧莱雅两大日化品牌加盟;运动品牌 Adidas、GOLDWIN 相继推出使用 Bolt Threads Mylo 菌丝体材料、Spiber 蛛丝蛋白材料的服装;

H&M 则与“生物砖”公司 Biomason 成为合作伙伴,承诺在其实体店地板采用生物混凝土砖低碳解决方案。

2.3 市场投资回归商业理性

围绕合成生物企业的市场投资正在由早期对合成生物“概念”热捧趋向商业理性,对技术路径、选品策略、市场研判、盈利预期、政策监管等商业因素的考虑更加全面,这对于促进合成生物产

业稳定、健康、可持续发展是积极的。特别是近年来合成生物企业快速扩张下暴露出种种商业风险,如明星企业 Zymergen 因 Hyaline 选品失败折戟, Ginkgo 上市后市值持续走低(2023 年 4 月 18 日其市值约 25.29 亿美元,远低于上市初 175 亿美元), Amyris 在制造设施扩建、现金流周转和盈利能力等方面持续面临压力,已于 2023 年申请破产保护,这些“前车之鉴”使得投资者与从业者对合成生物学产业进程与潜在风险形成更加客观清醒的认识,在看好长期愿景的同时保持定力。本研究汇总了 2022 年以来国内合成生物企业 60 余项主要投融资事件(部分信息如表 5)。梳理这些融资事件看,体现出以下几方面特点:一是业界对合成生物产业化长期愿景看好,微构工场、摩珈生物、擎科生物等约 20 项投资金额过亿元,百葵锐生物、德默特、柯泰亚等连续完成两轮融资,显示出投资者信心;二是在下游应用型企业尚未形成规模效应的情况下,自身兼有“核心平台+盈利

管线”的企业更受资本青睐,如蓝晶微生物在完成 B4 轮 4 亿元融资后, B 系列融资总额已经达到 19 亿元;三是相对于后期大额投资的冷静审慎,投早、投小成为优先策略,其中种子轮、天使轮投资 25 项, A 系列融资 21 项,占投资事项总数约 3/4;四是关注制约未来产业增长的底层技术与生物制造核心装备,围绕国产替代赛道,在国产基因测序仪、基因合成仪、菌株设计和酶工程平台等方向, 华大智造登录科创板,今是科技、齐碳科技、中合基因、惠利生物等分别获得市场融资。

3 推动我国合成生物产业发展的建议

当前,合成生物学开始进入向实用化和产业化阶段发展的关键时期,受宏观政策驱动、底层技术突破、行业应用落地、市场投资支持等利好因素加持,有望在未来数年迎来新技术新产品爆发式增长。但同时,合成生物学的产业化进程中依然面临技术开发、规模化生产、市场替代、外部环境、

表 5 2022 年以来国内合成生物企业部分投融资事项
Tab.5 Investments of Domestic Synthetic Biology Enterprises since 2022

企业	主要研发和产业方向	融资轮次	融资金额
柏垠生物	可持续生物基材料	天使轮、Pre-A 轮	过亿元
昌进生物	可食用微生物合成蛋白	A 轮	1.4 亿元
德默特	微藻基生物合成	天使轮、Pre-A 轮	过亿元
惠利生物	酶计算设计平台	A 轮	3 亿元
蓝晶微生物	PHA	B4 轮	4 亿元
齐禾生科	农业基因编辑工具	种子轮	超亿元
齐碳科技	基因测序仪	C 轮	7 亿元
擎科生物	基因合成	-	4 亿元
态创生物	新材料、医药中间体	A+ 轮	数亿元
微构工场	PHA	A+ 轮	3.59 亿元
微元合成	活性天然产物生物制造	天使轮	近亿元
中科国生	HMF	Pre-A 轮	近亿元
川宁生物	医药生物制造	IPO 创业板	-
华大智造	高通量基因测序仪	IPO 科创板	-
近岸蛋白	重组蛋白应用解决方案	IPO 科创板	-
巨子生物	重组胶原蛋白和多种稀有皂苷	IPO 港股	-

安全伦理等不确定风险。基于本研究对国内外产业化态势的分析,就推动我国合成生物产业发展初步提出以下建议。

1) **制定关键领域技术路线,构建产业核心技术体系。**聚焦“十四五”生物经济规划“医、食、美、安”关键领域,围绕合成生物学促进医疗卫生突破、医药先进制造、农业育种创新、未来食品制造,以及促进能源、化工等传统制造业转型升级、落实“双碳”目标,维护生物经济供应链安全等方向,研究制定技术路线图,设计科学合理、积极可行的技术和经济“里程碑”目标。支持科技、卫生健康、农业、能源、化工、轻工等行业主管部门,以相关行业技术路线为指导,体系化、持续性地支持合成生物学领域新技术、新产品、新业态、新模式发展。针对工业核心菌种、酶制剂等战略资源短板,支持核心工业菌种构建、核心工业酶创制与应用,生物反应器等核心装备开发等技术攻关,构建合成生物制造产业核心技术体系。

2) **支持重点行业应用示范,增强先进生物制造能力。**围绕医药、化工、材料、轻工食品等重要工业产品生物制造,传统制造工艺低碳生物技术替代,高性能生物材料和生物制品开发等应用场景,制定技术解决方案,实施概念验证和应用示范,促进更多合成生物实用化产业化成果落地。支持面向医药、化工、材料、轻工食品等行业的先进生物制造能力建设,增强生物制造中试与规模化生产基础设施,以满足未来持续升级的产业化需求,维护重点产业链供应链安全。重视生物大数据资源作为合成生物产业关键要素的价值,支持多组学数据、生物医学和健康数据、生物元件、生物种质资源等载体平台建设、先进计算工具开发、资源安全共享与高效利用。

3) **培育合成生物企业主体,“政府 + 市场”共**

建产业生态。培育壮大合成生物企业主体,鼓励合成生物企业与传统制造龙头企业相向而行,发挥各自在技术、市场、信息、资源等方面的优势,深化协同创新,推动产业生态共建共享。探索运用政府采购、消费补贴、金融保险等机制,对技术适用,市场需要,安全可靠的合成生物自主创新产品/服务予以支持,带动市场破冰,培育企业成长。建立政府、社会资本共同参与的多元化金融支持体系,完善投融资服务,支持对合成生物企业和产业化项目的持续稳定支持。加强监管部门与行业企业间的交流互动,坚持鼓励创新、包容审慎的基本原则,探索合成生物新产品市场准入、行业监管、生物安全和伦理议题,构建有利产业创新发展的政策环境,发挥国家自主持续示范区、国家自由贸易试验区等先行先试条件探索政策试点。加强对相关国家合成生物领域技术管控的预警研判,有效保护关键技术产品、生物制造设施、科技和产业人才和生物资源。

参考文献

- [1] 李青. 合成生物学[M]. 北京:化学工业出版社,2020. (LI Qing, Synthetic Biology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.)
- [2] 丁明珠,李炳志,王颖,等. 合成生物学重要研究方向进展[J]. 合成生物学,2020, 1(1): 7-28. (DING Mingzhu, LI Bingzhi, WANG Ying, et al. Significant Research Progress in Synthetic Biology [J]. Synthetic Biology Journal, 2020, 1(1): 7-28.)
- [3] 陈大明,周光明,刘晓,等. 从全球专利分析看合成生物学技术发展趋势[J]. 合成生物学,2020, 1(3): 372-384. (CHEN Daming, ZHOU Guangming, LIU Xiao, et al. Analysis of Global Patents for the Trend of Synthetic Biology Inventions [J]. Synthetic Biology Journal, 2020, 1(3): 372-384.)
- [4] The United State Senate. United States Innovation and

- Competition Act of 2021 [EB/OL]. (2021-05-18). <https://www.democrats.senate.gov/imo/media/doc/DAV21A48.pdf>.
- [5] 马诗雯,王国豫.合成生物学的“负责任创新”[J].中国科学院院刊, 2020, 35(6): 751-762. (MA Shiwen, WANG Guoyu. “Responsible Innovation” in Synthetic Biology [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 751-762.)
- [6] 梅亮,陈劲.负责任创新:时域视角的概念、框架与政策启示[J].科学学与科学技术管理,2016,37(5): 17-23. (MEI Liang, CHEN Jin. Responsible Innovation: Concept Origin, Theory Construction and Policy Implication from Durational Perspective [J]. Science of Science and Management of S.&T., 2016, 37(5): 17-23.)
- [7] President’s Council of Advisors on Science and Technology. Biomanufacturing to Advance the Bioeconomy [EB/OL]. (2022-12-08). https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/PCAST_Biomanufacturing-Report_Dec2022.pdf.
- [8] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. UK Innovation Strategy [EB/OL]. (2021-07-22). https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1009577/uk-innovation-strategy.pdf.
- [9] Federal Ministry of Education and Research. National Bioeconomy Strategy 2020 [EB/OL]. (2020). https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/FS/31617_Nationale_Biooekonomiestrategie_Langfassung_en.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- [10] National Engineering Biology Steering Committee. White Paper Engineering Biology: A Platform Technology to Fuel Multi-sector Economic Recovery and Modernize Biomanufacturing in Canada [EB/OL]. (2020-11) [2023-03-21]. <https://www.candesyne.ca/white-paper-engineering-biology>.
- [11] Ministry of Science & ICT, Korea. The Fifth Science and Technology Master Plan (2023-2027) [EB/OL]. (2022-12-14). https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=762.
- [12] Ministry of Science & ICT, Korea. National Synthetic Biology Initiative [EB/OL]. (2022-11-29). https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=758.
- [13] 国家发展改革委. 国家发展改革委印发《“十四五”生物经济发展规划》(National Development and Reform Commission. The 14th Five-year Plan for Bioeconomy) [EB/OL]. (2022-05-10) [2023-03-22]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202205/t20220509_1324417.html?code=&state=123.
- [14] 中国政府网. 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于加强科技伦理治理的意见》(State Council of the People’s Republic of China. Opinions on Strengthening the Governance of Science and Technology Ethics issued by the General Office of the CPC Central Committee and the General Office of the State Council) [EB/OL]. (2022-03-20) [2023-03-01]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-03/20/content_5680105.htm.
- [15] 农业农村部. 农业农村部关于印发《“十四五”全国农业农村科技发展规划》的通知 (Ministry of Agriculture and Rural Affairs. The 14th Five-year Plan for Agricultural and Rural Science and Technology Development) [EB/OL]. (2021-12-24). http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202112/t20211229_6385942.htm.
- [16] 国家发展改革委,工业和信息化部. 关于推动原料药产业高质量发展实施方案的通知 (National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology. Implementation Plan for High Quality Development of API Industry) [EB/OL]. (2021-10-29). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211109_1303461_ext.

- html.
- [17]工业和信息化部,国家发展和改革委员会,科学技术部等.关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见 (Ministry of Industry and Information Technology, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, et al. The 14th Five-year Plan for High Quality Development of the Petrochemical and Chemical Industry) [EB/OL]. (2022-03-28). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/08/content_5683972.htm.
- [18]工业和信息化部,人力资源社会保障部,生态环境部等.关于推动轻工业高质量发展的指导意见 (Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Human Resources and Social Security, Ministry of Ecology and Environment, et al. Plan for High Quality Development of Light Industry) [EB/OL]. (2022-06-08). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/19/content_5696665.htm.
- [19]中央网络安全和信息化委员会.“十四五”国家信息化规划 (Central Cyberspace Affairs Commission. The 14th Five-year Plan for National Informatization) [EB/OL]. (2021-12-27). http://www.cac.gov.cn/2021-12/27/c_1642205314518676.htm.
- [20]科技部.科技部等九部门关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》的通知 (Ministry of Science and Technology. Technological Plan for Carbon Peak and Carbon Neutrality) [EB/OL]. (2022-06-24) [2023-03-22]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm.
- [21]EBRC. Engineering Biology: A Research Roadmap for the Next-generation Bioeconomy [EB/OL]. (2019). <https://ebrc.org/focus-areas/roadmapping/engineering-biology-2019/>.
- [22]EBRC. Enabling Defense Applications through Engineering Biology: A Technical Roadmap [EB/OL]. (2020). <https://ebrc.org/focus-areas/roadmapping/roadmap-for-enabling-defense-applications-through-engineering-biology/>.
- [23]EBRC. Microbiome Engineering: A Research Roadmap for the Next-generation Bioeconomy [EB/OL]. (2020). <https://ebrc.org/focus-areas/roadmapping/microbiome-engineering-2020/>.
- [24]EBRC. Engineering Biology & Materials Science: A Research Roadmap for Interdisciplinary Innovation [EB/OL]. (2021). <https://ebrc.org/focus-areas/roadmapping/roadmap-for-materials-science-engineering-biology/>.
- [25]EBRC. Engineering Biology for Climate & Sustainability: A Research Roadmap for a Cleaner Future [EB/OL]. (2022). <https://ebrc.org/focus-areas/roadmapping/engineering-biology-for-climate-sustainability-september-2022/>.
- [26]The White House. Bold Goals for US Biotechnology and Biomanufacturing [EB/OL]. (2023-03-22). <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/03/Bold-Goals-for-U.S.-Biotechnology-and-Biomanufacturing-Harnessing-Research-and-Development-To-Further-Societal-Goals-FINAL.pdf>.
- [27]CSIRO. A National Synthetic Biology Roadmap: Identifying Commercial and Economic Opportunities for Australia [EB/OL]. (2021). <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Future-Industries/Synthetic-Biology-Roadmap>.
- [28]UKRI. UKRI Paves the Way for a Future Engineering Biology Programme [EB/OL]. (2021). <https://www.ukri.org/news/ukri-paves-the-way-for-a-future-engineering-biology-programme/>.
- [29]Federal Ministry of Education and Research. Bioeconomy in Germany: Opportunities for a Bio-based and Sustainable Future [EB/OL]. (2022). <https://www.bmbf.de/SharedDocs/>

- Publikationen/de/bmbf/FS/31106_Bioeconomie_in_Deutschland_en.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- [30] FDA. Human Gene Therapy Products Incorporating Human Genome Editing [EB/OL]. (2022-03-21). <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/human-gene-therapy-products-incorporating-human-genome-editing>.
- [31] Fierce Biotech. EMA Validates Vertex's CRISPR Application, Clearing Barrier on Road to Landmark Approval [EB/OL]. (2023-01-25). <https://www.fiercebiotech.com/biotech/ema-validates-vertexs-crispr-application-clearing-barrier-road-landmark-approval>.
- [32] 弈柯莱生物. 中国首个使用生物合成技术的西格列汀仿制药获批 (Abiochem. China's First Generic Drug of Sitagliptin Using Biosynthetic Technology Approved) [EB/OL]. (2021-08). <https://www.abiochem.cn/news/gsxw/146.html>.
- [33] 中证网. 合成生物助力中药创新打开新空间 (CSN. Synthetic Biology Assists Traditional Chinese Medicine Innovation) [EB/OL]. (2023-01-16). https://www.cs.com.cn/ssgs/gsxw/202301/t20230116_6319233.html.
- [34] CVRIA. Techniques of Genetic Modification: the Court Specifies the Status of in Vitro Random Mutagenesis Having Regard to the GMO Directive [EB/OL]. (2023-02-07). https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2023-02/cp_230022en.pdf.
- [35] Department for Environment, Food & Rural Affairs, UK. Genetic Technology Act Key Tool for UK Food Security [EB/OL]. (2023-03-23). <https://www.gov.uk/government/news/genetic-technology-act-key-tool-for-uk-food-security>.
- [36] 农业农村部. 农业用基因编辑植物安全评价指南(试行) (Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Guidelines for Safety Evaluation of Genetic-edited Agricultural Plants) [EB/OL]. (2022-01-24). https://www.moa.gov.cn/ztl/zjyqwgz/sbzn/202201/t20220124_6387561.htm.
- [37] Green Queen. Singapore Approves Good Meat's Serum-Free Media in a Cultivated Meat First [EB/OL]. (2023-01-19). <https://www.greenqueen.com.hk/singapore-approves-good-meats-serum-free-media-cultivated-meat/>.
- [38] Green Queen. Eat Just's Cultivated Good Meat is the Second to Receive US FDA Clearance [EB/OL]. (2023-03-22). <https://www.greenqueen.com.hk/eat-justs-cultivated-good-meat-fda-clearance/>.
- [39] Foodbev. Upside Foods Gets FDA Approval for Cultivated Meat [EB/OL]. (2022-11-17). <https://www.foodbev.com/news/upside-foods-gets-fda-approval-for-cultivated-meat/>.
- [40] Remilk. Remilk Racking up Regulatory Approvals [EB/OL]. (2023-02-23) [2023-03-29]. <https://www.remilk.com/newsroom/remilk-racking-up-regulatory-approvals>.
- [41] 食品资讯中心. 中美细胞培养肉监管审批路径研讨会顺利召开 (Foodmate. The Seminar on Regulatory Approval Pathways for Cell Culture Meat between China and the United States) [EB/OL]. (2022-12-26) [2023-03-29]. <http://news.foodmate.net/2022/12/649844.html>.
- [42] Green Queen. Japan Makes Move to Assess the Safety Of Cultivated Meat [EB/OL]. (2022-06-24) [2023-03-28]. <https://www.greenqueen.com.hk/japan-starts-assessing-safety-of-cultivated-meat/>.
- [43] The White House. Critical and Emerging Technologies List Update [EB/OL]. (2022-02) [2023-3-29]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/02/02-2022-Critical-and-Emerging-Technologies-List-Update.pdf>.
- [44] HHS. Screening Framework Guidance for Providers of Synthetic Double-stranded DNA [EB/OL]. (2022). <https://aspr.hhs.gov/legal/syndna/Pages/default.aspx>.

- [45] 常雁. 英国《国家安全与投资法》主要内容及影响分析[J]. 全球科技经济瞭望. 2022, 37(7): 29-35. (CHANG Yan. The Analysis of the Main Content of the UK'S National Security Investment Act and Its Impact on China [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook. 2022, 37(7): 29-35.)
- [46] 商务部. 关于《中国禁止出口限制出口技术目录》修订公开征求意见的通知 (Ministry of Commerce. Notice on soliciting public opinions on the revision of the Catalogue of Technologies Prohibited or Restricted from Exporting in China) [EB/OL]. (2022-12-30). <http://fms.mofcom.gov.cn/article/tongjiziliao/202212/20221203376696.shtml>.
- [47] DABOUSSI F, LINDLEY N D. Challenges to Ensure a Better Translation of Metabolic Engineering for Industrial Applications [M/OL]. (2022-10-14). https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2617-7_1.
- [48] BCG. Food for Thought: The Protein Transformation [EB/OL]. (2021-03-24). <https://www.bcg.com/en-cn/publications/2021/the-benefits-of-plant-based-meats>.
- [49] Synonym Bio. State of Global Fermentation Capacity [EB/OL]. (2022). <https://capacitor.bio/>.
- [50] Fortune. In Synthetic Biology, Startups and Incumbent Companies Should Be Partners, Not Foes [EB/OL]. (2023-02-03). <https://fortune.com/2023/02/03/synthetic-biology-startups-incumbents-cooperation/>.
- [51] Fortune. Synthetic Biology Could Disrupt Some of The World's Biggest Industries. Here are Four Steps to Building a 'Syn-bio' Strategy [EB/OL]. (2023-03-03) [2023-04-12]. <https://fortune.com/2023/03/03/synthetic-biology-strategy-loreal-unilever-sanofi-basf/>.
- [52] Ginkgo Bioworks. Ginkgo Bioworks Q4 2022 Results [EB/OL]. (2023-03-01). <https://investors.ginkgobioworks.com/overview/default.aspx>.

作者贡献说明

张拓宇:撰写文章初稿,修改定稿;

孟庆海:收集整理资料,文章修改。