

DOI: 10.13376/j.cblls/2021175

文章编号: 1004-0374(2021)12-1560-07

· 情报 ·



熊燕, 中国科学院上海营养与健康研究所生命科学信息中心研究员, 长期从事合成生物学领域的战略研究, 主持和参与国家自然科学基金委-中国科学院学部“合成生物学发展战略研究”、国家重点研发计划“合成生物学”重点专项“合成生物学生物安全研究”、“上海合成生物学技术预见研究”等项目, 为国家和区域的合成生物学科技发展和政策管理提供决策参考。

## 中英美三国合成生物学科技规划和产业发展比较分析

马悦<sup>1,2</sup>, 汪哲<sup>1,2</sup>, 薛淮<sup>3</sup>, 刘晓<sup>1</sup>, 张学博<sup>1</sup>, 陈大明<sup>1</sup>, 熊燕<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院上海生命科学信息中心, 中国科学院上海营养与健康研究所, 上海 200031;

2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院学部工作局, 北京 100190)

**摘要:** 合成生物学是新兴的前沿交叉领域, 在医药、健康、制造、农业等领域具有广阔的应用前景。中国、英国与美国在战略规划、政策引导、项目布局 and 产业发展等方面形成了各具特色的协作模式, 驱动了该领域的发展。该文比较了中英美三国在科技规划、项目资助与研发中心(科研基地)建设、产业发展等方面的模式与特点, 从中凝练了对我国合成生物学战略布局的启示, 以期为相关决策提供参考。

**关键词:** 合成生物学; 战略规划; 项目资助; 研发中心; 产业发展

**中图分类号:** G255.51; Q819      **文献标志码:** A

## Comparative analysis of scientific and technological strategic planning and industrial development of synthetic biology among China, Britain and America

MA Yue<sup>1,2</sup>, WANG Zhe<sup>1,2</sup>, XUE Huai<sup>3</sup>, LIU Xiao<sup>1</sup>, ZHANG Xue-Bo<sup>1</sup>, CHEN Da-Ming<sup>1</sup>, XIONG Yan<sup>1\*</sup>

(1 Shanghai Information Center for Life Sciences, Shanghai Institute of Nutrition and Health, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Academic Divisions, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** As a frontier field, synthetic biology is showing its great application potential in medicine, healthcare, manufacturing, agriculture, and so on. China, United States, and United Kingdom have developed their own unique models through a combination of financial support, strategic planning, policy guidance and industrial application, driving the development of this field. This paper compares their models and characteristics in project deployment and planning, R&D center (scientific research base), industrial development, etc., aiming to inspire future development layout of synthetic biology and provide reference for national policy making.

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-14

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0908600); 国家自然科学基金(NFSC)-中国科学院(CAS)联合项目(XK2019SMA002)

\*通信作者: E-mail: yxiong@sibs.ac.cn

**Key words:** synthetic biology; strategic planning; funding support; research and development center; industrial development

合成生物学作为21世纪生物学领域催动颠覆性创新和学科交叉融合的前沿代表,受到各国政府、学术界、产业界的高度关注。2010年6月,中国科学院与中国工程院、英国皇家学会与英国工程院、美国科学院与美国工程院(简称“三国六院”)在伦敦达成共识,拟定在2011—2012年,分别在英国、美国和中国召开3次合成生物学研讨会。“三国六院”会议促进了合成生物学的国际交流,推动了全球合成生物学的发展。我国较早参与该领域的战略研讨,对我国合成生物学的相关布局也起到了积极作用。在此基础上,中英美三国进一步凝练了合成生物学的发展目标、方向和路径,积极推动相关政策规划和研究项目的探索<sup>[1]</sup>。经过十年的发展,三个国家在合成生物学领域的论文发表量、专利申请量、初创企业数量等方面均处于全球领先地位。本文回顾了中英美三国在合成生物学领域的十年发展历程,梳理了相关的战略规划与科技布局,比较了三国研发中心(基地)建设的特点,凝练了产业发展的经验,总结和分析了促进合成生物学发展的战略决策和举措,以期为加快我国合成生物学新一轮的科技突破和产业发展提供参考。

## 1 战略规划与科技布局

从中英美三国合成生物学的发展历程可以发现,三个国家都在积极推进合成生物学领域的战略规划。过去十年,科学界、产业界和政府管理部门都在积极进行战略谋划、采取各种激励措施,以促进合成生物学的基础研究、应用研究与成果转化。2008—2020年,全球合成生物学领域发表的论文为96 443篇(数据来源:Web of Science核心合集,检索日期:2021年10月10日),其中,中英美三国在2020年的论文发表量占全球论文总数的65%。我国论文发表量及在全球的占比均增长迅速,2012年已经超过英国跃升至全球第二(图1)。

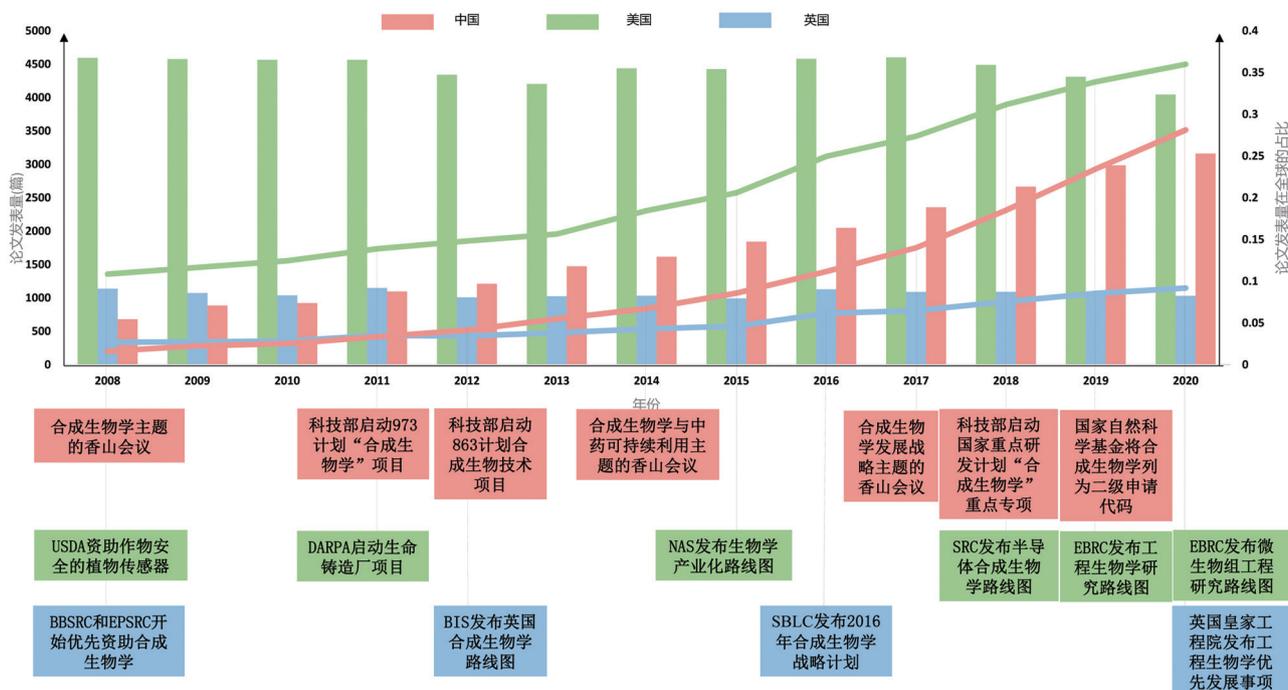
### 1.1 美国积极推动合成生物学领域的跨学科布局

美国农业部(USDA)早在2006年就开始支持合成生物学领域的相关研究,随后国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)、国立卫生研究院(National Institutes Of Health, NIH)、能源部(Department of the Environment, DOE)、国防部(Department of Defense,

DOD)等也开始支持合成生物学的基础研究、技术开发和研发中心的建立<sup>[2-3]</sup>。这些布局的跨学科特征明显,例如,作为美国合成生物学领域最重要的资助机构,国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)资助的生命铸造厂项目不仅发展标准化工具与平台,还用以开发高价值的新型工程化材料。此外,一些基金组织、风险投资集团和企业也积极参与和支持合成生物学项目,并促进其转化应用。近年来,美国研究机构与企业联合,通过发布各类合成生物学路线图,提出颠覆性的创新思路和目标,进一步引导合成生物学领域的跨界合作,例如,美国半导体研究联盟(SRC)2018年发布的《半导体合成生物学路线图》<sup>[4]</sup>,提出基于DNA的大规模信息存储等5个领域未来15年的发展目标和方向。2019—2021年,美国工程生物学研究联盟(EBRC)相继发布的《工程生物学:下一代生物经济的研究路线图》<sup>[5]</sup>、《微生物组工程:下一代生物经济研究路线图》<sup>[6]</sup>、《工程生物学与材料科学:跨学科创新研究路线图》<sup>[7]</sup>,提出了工程生物学与材料科学和微生物组工程未来10~20年的关键技术领域,指明了跨学科创新研究与应用的发展方向。

### 1.2 英国积极推动国家层面的顶层设计

英国皇家工程院(Royal Academy of Engineering, RAE)2009年发布的《合成生物学:范围、应用和启示》报告<sup>[8]</sup>强调国家战略规划的重要性。英国生物技术和生物科学研究理事会(BBSRC)、英国工程和自然科学研究理事会(EP SRC)等机构针对合成生物学领域相继开展了系列战略研究和科研资助。2012年,英国商业、创新与技能部(BIS)发布《英国合成生物学路线图》,明确了面向2030年英国合成生物学的发展路径,提出了基础科学与工程、负责任的研究与创新、用于商业的技术、应用与市场、国际合作5个核心主题。在BIS支持下,英国专门成立了合成生物学领导理事会(SBLC)。2016年,SBLC又推出“英国合成生物学战略计划”,提出在2030年实现英国合成生物学上百亿欧元市场的目标。路线图和战略计划是英国合成生物学发展的重要保障,大力支持了新的合成生物学研究中心以及创新和知识中心的建立<sup>[9]</sup>。在美国探讨工程生物学



USDA, 美国农业部(United States Department of Agriculture); NASA, 美国国家航空航天局(National Aeronautics And Space Administration); NAS, 美国国家科学院(National Academy of Sciences); SRC, 美国半导体研究联盟(Semiconductor Research Corporation); EBRC, 美国工程生物学研究联盟(Engineering Biology Research Consortium); BBSRC, 英国生物技术与生物科学研究理事会(Biotechnology and Biological Sciences Research Council); EPSRC, 英国工程与自然科学研究委员会(Engineering And Physical Sciences Research Council); BIS, 英国商业、创新和技能部(Department for Business, Innovation & Skills); SBLC, 英国合成生物学理事会(Synthetic Biology Leadership Council)

图1 中美英三国合成生物学领域的论文发表量及战略规划里程碑事件

未来发展的同时,英国也基于对2009—2019年合成生物学发展十年的总结<sup>[10]</sup>,探寻英国工程生物学的方向,并在2020年将SBLC调整为工程生物学领导理事会(Engineering Biology Leadership Council, EBLC)<sup>[11]</sup>,提出英国建立更加适应生产力发展的工程生物学生态系统的必要性。

### 1.3 中国科技界与政府联动,实行全方位的发展举措和持续的科研支持

2008—2021年,以“合成生物学”为主题的香山会议举办了4次,科学家不仅利用这个学术平台探讨合成生物学领域的前瞻性、基础性和战略性科学问题,还为未来布局方向提出了建议。中国科学院与国家自然科学基金委员会联合,连续两次资助合成生物学领域的战略研究。2010年,国家重点基础研究发展计划(“973计划”)首个合成生物学项目启动,至2015年连续支持了10个项目,为我国合成生物学的发展奠定了重要基础<sup>[12-13]</sup>。2018年,国家重点研发计划“合成生物学”专项正式发布。围绕医药健康、环境与能源、农业与食品、工程材

料等重点方向,2018—2021年立项支持了114个研究项目。此外,国家自然科学基金从2010年开始,先后支持了793项合成生物学领域相关项目,总金额达5.67亿元。2019年,国家自然科学基金将合成生物学列为二级申请代码,重点支持生命组学技术、基因编辑与生物大分子操控、蛋白质设计与疫苗工程等研究方向<sup>[14]</sup>。

## 2 研发中心(平台)建设

DNA合成技术、标准化元件设计等使能技术的发展与应用需要大量自动化试错,远超出传统劳动密集型研究范式的能力,需要变革性工程化研究平台的支撑<sup>[15]</sup>。中美英三国在战略规划的框架下,积极建设研发中心(平台),发展使能技术,促进成果转化,加强人才培养(图2)。

### 2.1 美国政府引导多方联合共建创新平台

2006年,在美国国家科学基金会(NSF)的资助下,斯坦福大学、伯克利大学等共同参与建设合成生物学工程研究中心(Synthetic Biology Research

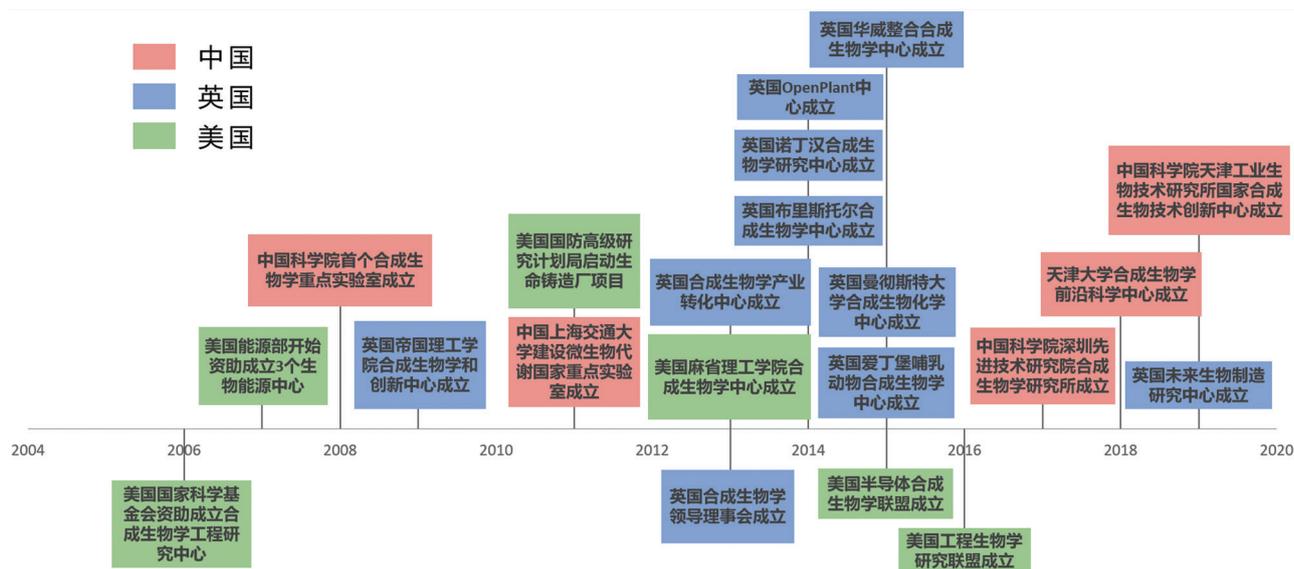


图2 中英美三国的合成生物学研发中心(平台)建设

Center, SynBERC)<sup>[16]</sup>, 该中心不仅支持科研工作, 还通过促进政产学研合作, 搭建政策制定者与其他利益相关者的交流平台。在 NSF 结束对 SynBERC 的支持后, 又以 SynBERC 为基础建立了工程生物学研究联盟 (EBRC)。2020 年, 在国防部的支持下, EBRC 建立了生物工业制造和设计的生态系统 (Bioindustrial Manufacturing and Design Ecosystem, BioMADE), 拟通过推动合成生物制造加速生物技术的发展。起源于麻省理工学院为期一个月课程的国际基因工程机器大赛 (International Genetically Engineered Machine competition, iGEM) 通过发挥参赛者的创新思维来开发人造生物器件和回路<sup>[17]</sup>。目前, iGEM 已建立了标准元件库以及促进核酸合成相关设备的标准化以及特征鉴定的中心<sup>[18]</sup>, 并设立了为科研人员提供实验工具和研发团队的创业实验室 (Venture Creation Lab)<sup>[19]</sup>。

## 2.2 英国积极推动国家层面的综合网络建设

2012 年以来, 英国已经建设了 6 个合成生物学研究中心、1 个创新中心以及 1 个制造中心<sup>[9, 20]</sup>, 其中包括爱丁堡大学的哺乳动物合成生物学研究中心 (UK Centre for Mammalian Synthetic Biology)、曼彻斯特大学的精细与专用化学品合成生物学研究中心 (Manchester Synthetic Biology Research Centre for Fine and Speciality Chemicals, SynBioChem)、以植物合成生物学技术开发为主的 OpenPlant 中心、聚焦工程微生物的诺丁汉大学合成生物研究中心 (Synthetic Biology Research Centre Nottingham, SBRC Nottingham)、聚焦生物分子设计与组装的布里斯托

尔合成生物学研究中心 (BrisSynBio)、聚焦生物系统设计的沃里克整合合成生物学中心 (Warwick Integrative Synthetic Biology, WISB)<sup>[21]</sup>, 以及帝国理工的合成生物学和创新中心 (Imperial College Centre for Synthetic Biology, CSynBi)。2019 年, 英国政府又宣布聚焦制药、化工和工程材料的生物制造, 建立未来生物制造研究中心 (Future Biomanufacturing Research Hub, FBRH)。这些中心各有特色且具有互补的基础设施、人才资源以及产业化平台, 形成了覆盖全国的综合网络<sup>[9]</sup>。

## 2.3 我国合成生物学的集聚发展

过去 10 年, 我国许多高校和科研机构在合成生物学实验室和研究中心等科研基地建设上都有相关举措, 其中比较集中的是上海、天津和深圳<sup>[1]</sup>。2008 年成立的中国科学院合成生物学重点实验室是我国最早的合成生物学研究机构, 随后上海交通大学成立微生物代谢国家重点实验室。2015 年, 上海地区高校、研究机构和企业自发组建上海合成生物学创新战略联盟, 旨在发展协同攻关的战略网络<sup>[14]</sup>。天津大学牵头的合成生物学前沿科学中心与中国科学院天津工业生物技术研究所牵头的国家合成生物技术创新中心是天津市的两大合成生物学重要基地, 分别针对前瞻性基础研究与生物技术应用转化两大方向。深圳市从 2017 年开始致力于打造覆盖多层级的综合型研究机构, 并建设了国内首个合成生物研究重大科技基础设施, 旨在通过智能化的自动化实验装置, 高效、低成本地完成合成生物学技术的“设计-合成-测试-学习”循环<sup>[22-23]</sup>。

### 3 投融资和产业发展

在政策的推动、创新的驱动下,合成生物学的投融资近年来呈现高速增长的态势。截止2019年,全球合成生物学领域的公司超过730家<sup>[24]</sup>。SynBioBeta的数据显示,2010—2020年,全球合成生物学投融资1130起,总金额超过210亿美元<sup>[25]</sup>,仅2021年上半年,合成生物学获得的投融资就达到89亿美元<sup>[26]</sup>。一方面,合成生物学能够为传统的产业带来变革性创新,有助于初创公司获得更多投资,也有利于创新技术成果迅速转化;另一方面,政府部门对其广泛的应用潜力给予了更多的关注与支持,看好合成生物学带动生物经济发展的前景。

#### 3.1 美国政府与社会资本协力推动市场发展

政府的战略引导与社会资本的支持共同促进了美国合成生物学初创企业的发展。《生物经济蓝图》<sup>[27]</sup>、《生物经济联邦行动报告》、《护航生物经济》<sup>[28]</sup>等多份报告都着重强调了生物经济发展的重要性。同时,在政府的引导下,社会资本开始投入合成生物学产业,支持包括从事农业、食品与营养添加剂、健康与医药、材料等多个领域的应用型公司,以及研究自动化与软件、DNA合成、生物工程平台开发等工具型公司<sup>[26]</sup>的多元化市场的发展。例如,专注mRNA领域的公司Moderna,目前已经发展成为拥有6种疫苗和临床治疗组合的企业,其开发的新冠病毒疫苗是美国最早授权使用的疫苗之一,在上市前已获得17.5亿美元的投资,于2018年成功上市。食品领域的Impossible Foods公司,凭借其“人造肉”产品吸引了多轮投资,截止2021年已获得近13亿美元的资金,同时也带动了多个食品加工制造类公司的发展,如Upside Foods、Wild Type、Finless Foods等。工具型公司Ginkgo构建的细胞编程平台,有望提高细胞制造的效率,上市前融资金额超过8亿。

#### 3.2 英国政府引导社会资金的投入

过去10年,英国政府建立的支持创新的生态系统促进了合成生物学的转化应用,通过国家产业转化中心(SynbiCITE)、政府的加速器项目、英国科学与创新种子基金等,为初创企业的建立和发展提供多方支持<sup>[29-30]</sup>。

目前,英国已有超过150家合成生物学初创企业<sup>[31]</sup>,在英格兰东南部、东部及伦敦地区等研究中心或加速器项目布局较多的区域逐渐形成了企业集群。例如,获得550万美元融资生产污水处理生物

材料的Puraffinity、获得610万美元融资利用光合作用生产营养成分和蛋白质的Arborea等企业均分布在SynbiCITE附近;获得63.6万美元融资的新型肽生产公司Zentraxa位于孵化器Unit DX附近<sup>[10]</sup>。近年来,英国私人投资与公共资金的比例已经超过10:1。根据英国合成生物学领导理事会(SBLC)统计,过去5年,英国排名前70的合成生物学初创企业共吸引了超过18亿英镑的私人投资,按人均计算,英国合成生物学初创企业吸引私人投资的比例已经超过美国。随着新的初创企业不断出现以及现有初创企业的成熟,未来将会有更多的私人投资进入该领域,预计英国初创企业每年吸引的私人投资或将超过10亿英镑<sup>[10]</sup>。

#### 3.3 中国初创企业融资额增长迅速

目前,我国合成生物学领域的企业还比较少,起步也比较晚,但近几年发展迅速,投融资十分活跃。工程生物产业数据分析平台(EB Insights)发布的“全球最值得关注的50家合成生物学企业”中我国有杭州恩和生物(Bota Biosciences)、北京博雅辑因、北京合生基因、苏州泓迅科技、上海凯赛生物、北京蓝晶微生物、南京传奇生物、深圳森瑞斯生物、深圳鑫飞生物等9家企业入选。另外,近几年我国的合成生物学初创企业有了一些典型的商业案例,逐步实现生产工艺的提升与经济成本的下降<sup>[30]</sup>。在应用企业中,2021年在科创板上市的华恒生物,丙氨酸系列产品的生产规模位居国际前列;2021年完成上亿级融资的弈柯莱生物、蓝晶微生物、迪赢生物以及羽冠生物成立于2015年以后,在起步阶段就获得大笔融资。其中,弈柯莱生物公司2021年4月获得淡马锡和招银国际的近3亿元投资,该公司的台州产业化基地已经拥有日产酶(或其他生物制品)10吨的能力;依托清华大学的科技成果建立的蓝晶微生物公司已经完成新产品从实验室原型到中试,并于2021年获得近2亿元的融资。在平台型企业中,苏州泓迅科技是一家DNA技术公司,拥有较完整的DNA合成组合平台,并在美国的新泽西建立了拥有高标准实验室的分公司,获得深圳华大、北京华大等公司的资金支持。

### 4 总结与建议

合成生物学发展的目标导向、工程化设计与使能技术创新,对于生物技术具有革命性的影响力<sup>[32]</sup>。依靠形成从科技创新到转化型研究、再到研究成果产业转化的创新链与产业链,以及与此相关的政产

学研金各个环节的支撑,使这种影响力可以有效地转化为经济发展的驱动力与真实的生产力。中英美三国不仅引领了全球合成生物学科技的创新,同时也是推动合成生物学产业化的先行者。回顾三国十年的发展历程,总结从科技政策到规划布局、产品研发到应用转化的战略和实践,可为我国合成生物学下一个十年的飞跃发展提供借鉴。

#### 4.1 绘制科技和产业发展路线图,完善战略布局

近年来,合成生物学科技和产业发展路线图已成为一种成功的前瞻规划形式。英国基于对本国合成生物学技术已有基础及优势的分析,以及对未来生物经济发展目标的战略考量,绘制并发布了国家合成生物学路线图。路线图不仅为政府在合成生物学领域的持续支持和投入指明了方向,更是反映了英国政府通过合成生物学技术推动生物经济发展的整体规划和设计。美国在合成生物学领域的科技和产业布局,充分体现了政、产、学、研、金的共同利益,以及对未来生物技术的研判和设计。美国近几年发布的几个重要的合成生物学、工程生物学路线图,都是由政府部门、大学和企业等组成的联盟参与制定。同时,这些路线图也会对政府、科技界、产业界及资本市场的研发和投资方向产生影响。“半导体合成生物学路线图”发布之后,美国海军研究中心(ONR)、美国情报高级研究计划局等机构相继启动分子信息存储等项目,推动半导体合成生物学的发展。

因此,为了进一步明确我国合成生物学科技、产业的重点领域和发展方向,应围绕我国的战略需求,加强顶层设计和前瞻性布局,研究制定我国合成生物学领域的中长期发展规划,尽早出台适合我国国情的合成生物学科技和产业发展的“中国方案”。

#### 4.2 加强工程化平台(研发中心)的学科交叉融合发展,驱动使能技术升级

合成生物学的工程化平台(研发中心)或基础设施是实现合成生物学“设计-构建-测试-学习”闭环的基础和保障。一方面,通过建立学科交叉的研发中心,聚集资源、培养人才;另一方面,通过工程化平台的建设,开发各种通用性及专业性技术,对统一规范、建立标准等也具有重要作用<sup>[32]</sup>。正如美国联邦政府《生物经济战略》指出:美国生物经济发展的重要推动因素正是生物分子自动化高通量、DNA测序技术等基础设施的建设<sup>[33]</sup>。美国国防部高级研究计划局(DARPA)建立的“生命铸造厂”,目标就是构建新型制造平台,实现“按需设

计与生产”<sup>[15]</sup>;英国通过建立各类研发中心(创新中心),构建从教育培养到研发创新再到成果转化的综合性网络,不仅促进了合成生物学技术的开发,也形成了英国合成生物学的创新和产业文化。中国科学院深圳先进技术研究院建设的机器人自动化装备与平台<sup>[15]</sup>也正是人工智能与生物技术交叉的典型,有望推进合成生物学科技与产业实现新突破。

为进一步提升创新能力,应强化合成生物学领域新型研发机构,特别是支持合成生物学元件库、数据库,以及专业性、集成性、开放共享的工程技术平台(包括基础设施)的建设,促进合成生物学相关研究中心、重点实验室的多学科交叉、有效合作,形成优势互补、协同创新的网络。

#### 4.3 推进创新链与产业链的深度融合,大力促进合成生物学科技成果的转化

合成生物学技术要有效转化为真实的生产力,需要依靠从转化型研究到成果转化所形成的创新链与产业链,并获得政、产、学、研、金等各个环节的支持。在促进创新链与产业链融合方面,政府可通过政策和服务等措施,一方面激励企业增加研发投入,以提升企业研发能力;另一方面,在产业转化和上市过程中,加强标准建立和推广,引导产业发展。英美两国的路线图中明确提到建设标准元件库、计算机辅助设计(computer aided design, CAD)标准等目标;英国标准协会(British Standards Institution, BSI)在2015年就制定了与合成生物系统相关的标准使用指南,包括了生物组分、DNA序列数字信息、功能特征化、数字生物信息传递及其数据库构建的标准<sup>[9,34]</sup>,为科技成果向工业转化提供了有力保障。

我国合成生物学的发展不仅需要国家的经费支持和政策引导,还需要充分调动产、学、研、金各方的积极性<sup>[34]</sup>,构建平台化支撑、企业化管理、市场化运营的科技支撑和产业转化模式,进一步做强创新链,打通产业链。在技术源头研发阶段,加强知识产权的保护与管理,促进资源开放共享;在转化研究阶段,建立促进科技创新的激励、保障机制,提高行业抗风险能力;在市场应用和推广阶段,及时研究制定相关的标准和指南,推动新产品早日进入市场,服务社会。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张先恩. 中国合成生物学发展回顾与展望. 中国科学: 生命科学, 2019, 49: 1543-72
- [2] Scholars, W W I C F. U.S. Trends in synthetic biology research funding [EB/OL]. [2015-09-01]. <https://www.>

- wilsoncenter.org/sites/default/files/final\_web\_print\_sept2015\_0.pdf
- [3] 钱万强, 江海燕, 朱庆平, 等. 国内外合成生物学资助体系及产业投入分析. 中国基础科学, 2014, 16: 47-50
- [4] SRC. 2018 Semiconductor synthetic biology roadmap [EB/OL]. [2018]. <https://www.src.org/library/publication/p095387/p095387.pdf#search=Semiconductor%20Synthetic%20Biology>
- [5] Synberc. Synberc (Synthetic Biology Research Center) [EB/OL]. [2012]. <https://ebrc.org/synberc/>
- [6] EBRC. Microbiome Engineering: A Research Roadmap for the Next - Generation Bioeconomy, 2020 [R].
- [7] EBRC. Engineering Biology & Materials Science: A Research Roadmap for Interdisciplinary Innovation, 2021 [R].
- [8] The Royal Academy of Engineering. Synthetic Biology: scope, applications and implications [EB/OL]. <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/synthetic-biology-report>
- [9] 周光明, 陈大明, 熊燕, 等. 英国合成生物学规划及其影响与启示. 中国细胞生物学学报, 2019, 41: 2091-100
- [10] Synthetic Biology Leadership Council. Synthetic Biology UK: a decade of rapid progress. [EB/OL]. [2020]. <https://ktn-uk.org/wp-content/uploads/2020/08/SBLC-combined-final.pdf>
- [11] KTN. Engineering Biology Leadership Council [EB/OL]. <https://ktn-uk.org/programme/engineering-biology-leadership-council/>
- [12] 陈国强, 王颖. 中国“合成生物学”973项目研究进展. 生物工程学报, 2015, 31: 995-1008
- [13] 王璞玥, 唐鸿志, 吴震州, 等. “合成生物学”研究前沿与发展趋势. 中国科学基金, 2018, 32: 545-51
- [14] 杜全生, 洪伟, 祖岩. 2010—2019年国家自然科学基金资助合成生物学领域情况. 合成生物学, 2020, 1: 385-94
- [15] 崔金明, 张炳照, 马迎飞, 等. 合成生物学研究的工程化平台. 中国科学院院刊, 2018, 33: 1249-57
- [16] Synberc. Building the future with biology [EB/OL]. [2016]. <https://ebrc.org/wp-content/uploads/2019/07/Synberc-10-years-book.pdf>
- [17] 赵国屏. 合成生物学——革命性的新兴交叉学科, “会聚”研究范式的典型. 中国科学: 生命科学, 2015, 45: 905-8
- [18] IGEN. Building SynBio [EB/OL]. <https://after.igem.org/projects/building-synbio>
- [19] IGEN. Startup Showcase [EB/OL]. [2021]. <https://igem.org/EPIC>
- [20] The Royal Academy of Engineering. Engineering biology: a priority for growth, 2019
- [21] The University of Manchester. Multimillion pound biotechnology research investment for Manchester [EB/OL]. [2019]. <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/multimillion-pound-biotechnology-research-investment-for-manchester>
- [22] 崔金明, 刘陈立. 合成生物学中的高通量筛选与测量技术. 中国细胞生物学学报, 2019, 41: 2083-90
- [23] Hillson N, Caddick M, Cai YZ, et al. Building a global alliance of biofoundries. Nat Commun, 2019, 10: 2040
- [24] John C. Why California leads the synthetic biology industry (And How Your State Can Cash In, Too) [EB/OL]. [2019]. <https://www.forbes.com/sites/johncumbers/2019/09/18/why-california-leads-the-synthetic-biology-industry-and-how-your-state-can-cash-in-too/?sh=4ecd4cce4e51>
- [25] 邱伟龙, 廖秀灵, 罗巍, 等. 全球合成生物行业发展前沿分析. 集成技术, 2021, 10: 117-27
- [26] Synbiobeta. 2Q 2021 synthetic biology venture investment report [EB/OL]. [2021]. <https://synbiobeta.com/2q-2021-synthetic-biology-venture-investment-report/>
- [27] The White House. National Bioeconomy Blueprint [EB/OL]. [2012]. [https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national\\_bioeconomy\\_blueprint\\_april\\_2012.pdf](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national_bioeconomy_blueprint_april_2012.pdf)
- [28] 邓心安, 万思捷, 朱亚强. 国际生物经济战略政策格局、趋势与中国应对. 经济纵横, 2020, (08): 77-85
- [29] 刘晓, 曾艳, 王力为, 等. 创新政策体系保障合成生物学科技与产业发展. 中国科学院院刊, 2018, 33: 1260-8
- [30] 邓桦. 近年我国合成生物学发展态势分析研究. 竞争情报, 2020, 16: 32-40
- [31] Synbicite. UK Synthetic Biology start-up survey 2017 [EB/OL]. [2017]. <http://www.synbicite.com/news-events/materials/uk-Synthetic-biology-start-up-survey-2017>
- [32] 赵国屏. 合成生物学: 开启生命科学“会聚”研究新时代. 中国科学院院刊, 2018, 33: 1135-49
- [33] British Standards Institution. Use of standards for digital biological information in the design, construction and description of a synthetic biological system [EB/OL]. [2015]. <https://shop.bsigroup.com/products/use-of-standards-for-digital-biological-information-in-the-design-construction-and-description-of-a-synthetic-biological-system-guide/standard>
- [34] 赵国屏, 刘陈立, 赵广立. 我国迎来定量合成生物学发展重要契机[N]. 人民日报, 2021-12-06.