

特约评述

DOI: 10.12211/2096-8280.2025-066

农业合成生物学：政策规划与产业发展协同推进

张学博¹, 朱成姝¹, 陈睿雲^{1,2}, 金庆姿^{1,2}, 刘晓¹, 熊燕^{1,2}, 陈大明^{1,2}

(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)

摘要: 农业合成生物学作为融合生物学、工程学与计算机科学的交叉学科, 通过创新设计与改造生物系统, 推动农业生产向更高效、可持续的方向发展。其进步不仅依赖技术创新, 更需政策规划与产业需求的动态适配。近年来, 全球各国政府通过政策制定、创新激励与产业促进, 加速推进该领域的发展。政策方面, 美国、欧盟、英国及澳大利亚等国家和地区, 通过顶层设计和配套措施, 支持基因编辑、代谢工程等关键技术农业领域的研发与应用。我国亦积极构建产学研一体化的创新生态系统, 加速农业合成生物技术的创新与产业化进程。产业方面, 在政策引导下, 创新技术已在育种、食品与饲料、生物农药等细分领域实现初步商业化。本文基于农业合成生物学的创新链与产业链, 系统梳理国内外相关政策规划与产业发展现状, 并聚焦作物改良、抗逆性提升及原材料开发等重点方向, 解析农业合成生物学“技术驱动-中试验证-产业转化”链条中的关键环节, 以期破解产业化瓶颈、优化资源配置、激发市场主体活力提供参考路径, 从而加快我国农业生物技术创新成果转化进程, 保障国家粮食安全与生态安全, 全面提升我国农业领域的国际竞争力与可持续发展能力。

关键词: 合成生物学; 农业; 创新链; 产业链; 政策规划

中图分类号: Q-1; Q81 **文献标志码:** A

Policy planning and industrial development of agricultural synthetic biology

ZHANG Xuebo¹, ZHU Chengshu¹, CHEN Ruiyun^{1,2}, JIN Qingzi^{1,2}, LIU Xiao¹, XIONG Yan^{1,2},
CHEN Daming^{1,2}

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

Abstract: Agricultural synthetic biology, an emerging interdisciplinary field, synergistically integrates fundamental principles from biology, engineering and computer science, and is dedicated to advancing agricultural production towards greater efficiency and sustainability by innovatively designing and engineering of biological systems. In recent

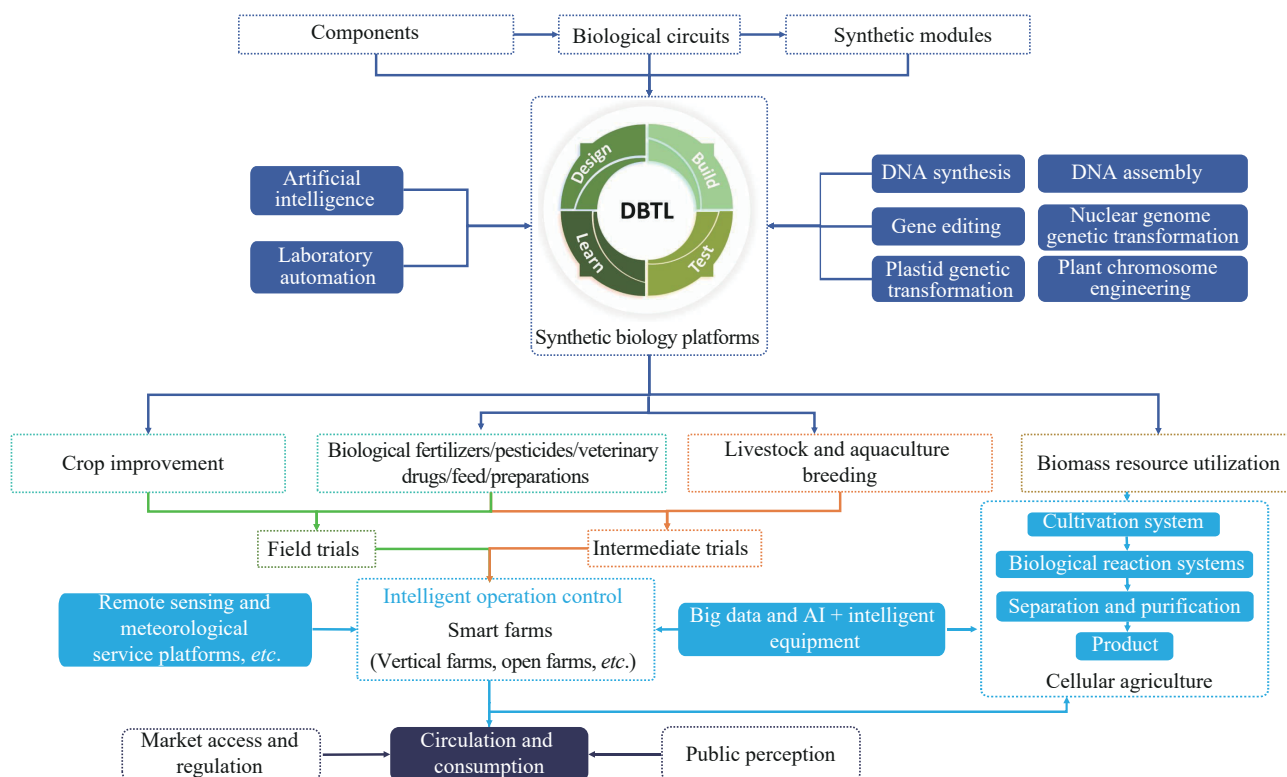
收稿日期: 2025-06-25 修回日期: 2025-08-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFA0908601)

引用本文: 张学博, 朱成姝, 陈睿雲, 金庆姿, 刘晓, 熊燕, 陈大明. 农业合成生物学: 政策规划与产业发展协同推进[J]. 合成生物学, 2025, 6(5): 1224-1242

Citation: ZHANG Xuebo, ZHU Chengshu, CHEN Ruiyun, JIN Qingzi, LIU Xiao, XIONG Yan, CHEN Daming. Policy planning and industrial development of agricultural synthetic biology[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(5): 1224-1242

years, governments worldwide have accelerated the development of this field through the combined efforts of policy initiatives and technological innovation. Countries and regions including the United States, the European Union, the United Kingdom, and Australia have introduced policies to explicitly support the research and application of key technologies, such as gene editing and metabolic engineering, in the agricultural field. These supportive frameworks have greatly advanced the global development of agricultural synthetic biology. In China, active efforts are being made to construct an integrated innovation ecosystem connecting industry, academia, and research institutions, with the goal of accelerating the industrialization of agricultural synthetic biology technologies. Currently, several technologies have achieved initial commercial applications in areas such as breeding, food and feed production, and biological pesticides. In crop breeding, precise genome editing enables the development of varieties with enhanced yield, improved nutritional quality, and greater resistance to biotic and abiotic stresses. In the field of food and feed, genetic engineering is employed to modify microorganisms to produce enzyme preparations that improve feed digestibility and nutritional value, as well as to develop microbial-based biopreservatives to replace chemical preservatives, or natural-source coatings that extend the shelf life of fruits and vegetables. Additionally, biological pesticides derived from natural microorganisms, plant extracts or insect pheromones can effectively reduce the impact on soil, water sources and ecosystems, while reducing the risk of residues. These products are increasingly applied in crop protection, and offer sustainable alternatives for reducing environmental pollution while safeguarding food safety. Several innovative enterprises worldwide have provided valuable experience and insights into the development and application of agricultural microbial products. These companies not only demonstrate effective pathways for translating laboratory research into practical products, but also offer business models that serve as valuable references for the broader industry. Simultaneously, a number of Chinese enterprises are actively exploring the application of synthetic biology to improve crop breeding, enhance crop resistance to stress and diseases, and develop biopesticides, biofertilizers, and new bio-based materials. Some are employing synthetic biology approaches to improve crop performance under adverse environmental conditions or to enhance soil health by optimizing microbial community structures. Despite recent breakthroughs, the continued development of agricultural synthetic biology still faces numerous challenges,



including limited market acceptance, underdeveloped regulatory frameworks, insufficient capital investments, and persistent technological bottlenecks. Overcoming these challenges requires a concerted, multi-faceted approach that integrates policy guidance, technological innovation, and industrial upgrading. It is essential to foster synergistic development across key domains, including the engineering of non-food crops, the expansion of photoautotrophic microbial platforms, and the advancement of carbon capture and utilization technologies. At the same time, interdisciplinary collaboration should be strengthened to encourage more research institutions and enterprises to engage in this field. Through the combined forces of supportive policies and increased capital investment, barriers such as ecological risk assessment can be effectively addressed, thereby accelerating the commercialization of new products. Governments must act promptly to establish clear, science-based regulatory pathways that ensure the safety and efficacy of emerging agricultural biotechnologies, at the same time investors should recognize the transformative potential of this field and provide financial support for startups and research initiatives. Ultimately, the goal is to catalyze a global agricultural transformation that ensures food security for a growing population, mitigates the impacts of climate change, and promotes ecological conservation and restoration. Through collaborative efforts among all stakeholders, agricultural synthetic biology has the potential to become a driving force for advancing modern agriculture and building a greener, healthier, and more sustainable future for humanity.

Keywords: synthetic biology; agriculture; innovation chain; industrial chain; policy planning

随着基因组学和系统生物学的兴起，合成生物学作为一门工程化学科应运而生，旨在运用工程化理念，设计、操控并编程细胞行为^[1]。目前，该学科已经在能源、化工、医药、食品、环境、农业等领域取得了重大进展。当前，全球面临人口持续增长以及资源环境约束日益严峻的双重压力，合成生物学正通过工程化手段重塑生命体系，展现出变革传统农业的巨大潜力。农业合成生物学融合基因组学、系统生物学与工程化设计，对生命系统进行重构和编程，以实现作物性状优化、微生物功能调控及农业生产流程升级。作为21世纪农业科技革命的核心方向之一，农业合成生物学通过对作物代谢网络与微生物组功能的系统设计，在优化抗逆性状与营养品质^[2]（例如利用基因编辑技术实现蛋白质的定向改良）、提升光合效率（例如人工光合体系二氧化碳固定速率突破自然上限^[3]）、增强生物固氮能力^[4]（例如通过微生物组工程构建可促进玉米田间增产的固氮体系）等核心方向取得突破性进展，为应对粮食安全、减少农业碳排放、降低化肥农药依赖等全球性挑战提供了新路径^[5]。然而，这些技术突破距离大规模产业化应用仍面临多重难题：核心技术成熟度方面，植物系统性代谢重构、高效叶片固氮等

关键环节仍存在瓶颈^[6]；资金投入方面，大型农业科技企业相对缺乏，资本市场对早期项目支持不足；市场接受度方面，消费者对农业合成生物学产品的了解有限；监管审批方面，亟需加快产品审批周期，完善生物农药、肥料等产品的生态风险评估。

破解上述难题，需构建“政策-技术-产业”协同推进机制——政策层面，应整合技术研发、中试验证与产业转化全链条资源，通过税收优惠、专项基金等工具加速关键共性技术攻关；同时建立跨部门协作机制，推动科研机构、企业与政府在标准制定、监管创新上的深度联动，破解生物安全评估与市场准入壁垒。产业生态层面，需依托示范园区、产学研联合体等载体构建闭环，打通实验室成果与规模化生产间的转化通道，缩短技术成熟周期。在此基础上，亟需系统设计覆盖技术研发、中试验证到产业转化的全链条，并深度整合标准、监管、市场准入和推广等多维度的政策工具，特别是针对核心技术转化鸿沟、生物安全监管协同、技术标准体系及财税激励政策等核心堵点，构建可操作的解决方案，跨越从“技术可行”到“商业成功”之间的鸿沟，将实验室的创新成果转化为现实的新质生产力。当前，国

际创新企业在农用微生物等产品的开发应用中已积累了丰富的经验,我国也涌现出一批企业,积极运用合成生物技术提高作物育种水平、增强作物抗逆性,并开发生物农药、生物肥料以及新型原材料。尽管取得了一些突破性进展,但该领域产业化仍然面临市场接受度低、资金投入不足、监管制度不完善等挑战。唯有通过政策引导、技术创新与产业升级的协同发力,结合资本力量破解生态风险评估难题,加快产品上市进程,才能推动农业在非粮作物开发、光自养平台拓展及碳捕获利用等方向实现多元化突破,带来革命性变革。

1 农业合成生物学创新链与产业链融合

农业合成生物学的创新链始于基础元件与平台技术的系统化构建,奠定了精准调控生物系统的核心基石^[7]。基础元件作为生命系统的“积木库”,涵盖调控元件、催化元件、信号元件及转运元件等关键功能单元^[8]。这些标准化元件的模块化设计与组合,为底盘细胞的功能重塑提供了广阔空间。例如,通过优化启动子强度,可精准调控作物中靶基因的表达水平,突破传统育种方式在遗传改良上的限制^[9]。支撑元件创新的合成生物学平台深度融合人工智能辅助设计^[10]、实验室自动化操作及多组学分析技术^[11],通过依托植物、微生物及动物底盘细胞,结合DNA合成组装、CRISPR基因编辑和遗传转化等技术,实现对生物遗传蓝图的高效重编程^[12]。同时,组学技术、基因组编辑、蛋白质设计和高通量表型分析在作物改良中的综合应用,提高了作物的抗病性、适应性和产量^[13]。平台技术的跨学科融合不仅提升了元件构建与筛选效率,更大幅拓展了农业遗传资源的创新应用。

创新链的核心驱动力源于“设计-构建-测试-学习”(design-build-test-learn, DBTL)循环研发模式的深化应用。人工智能算法通过模拟代谢网络与基因互作关系,精准预测多基因编辑叠加效应,CRISPR相关工具(如碱基编辑器和引物编辑器)极大地扩展了基因组编辑的范围^[14],将传统育种周期从数年压缩至数月甚至数周^[15];自动化

实验系统则实现高通量基因组与表型筛选,使底盘细胞改造进入“小时级”的迭代进程^[16]。测试环节贯通实验室微生态系统、田间试验与中试基地三级场景,同步验证技术可行性、环境适应性及生产稳定性。这一循环机制持续驱动创新成果向多元农业应用场景延伸。例如,在作物改良领域,合成生物技术通过提高光合作用效率、构建碳浓缩机制,显著降低光呼吸损耗^[17];同时开发自主固氮系统减少化学氮肥依赖,并优化作物的营养品质^[18]。畜牧水产育种的研究则聚焦抗病抗逆品种与功能性产品开发^[19],增强畜禽环境适应能力^[20],生产富含特定营养成分的产品^[21]。生物质资源利用领域更是实现“变废为宝”,通过纤维素高效解聚、木质素定向转化等技术,将农业废弃物转化为生物乙醇、生物基材料等高值产品^[22]。

在现代农业的发展进程中,创新链和产业链的深度融合成为推动农业合成生物学发展的关键动力。这种融合不仅加速了技术成果的产业化进程,同时也依赖产业链上游所提供的技术支持和产品创新。上游环节紧密衔接创新成果,聚焦技术转化与新产品研发,构建起从科研到生产的无缝连接桥梁。例如,在生物制剂领域,通过工程菌株开发微生物肥料^[23](如固氮/解磷菌剂)、靶向型生物农药^[24](如RNA干扰杀虫剂)及微生态调节剂^[25],显著降低了农业生产对化学品的依赖。此外,在农业合成生物学的应用方面,产生了更多突破性的进展,例如生物基棉花等工业原料的合成技术,以及利用合成生物学方法突破传统畜牧养殖的空间与环境限制^[26],推动了农业产业从“传统种养”向“生物智造”的跃升,拓展了产业边界,也为未来农业发展开辟了新的方向。

同时,产业链中游通过合成生物学与智慧农场的结合,驱动农业生产的高效化与精准化,而农业物联网、农用机器人与人工智能技术深度融合,为合成生物学产品在垂直农场与开放农场等场景中的应用提供了高效的生产条件^[27]。田间试验与中试环节作为关键枢纽,验证了通过基因编辑改善植物的遗传稳定性、抗逆性、抗病性及营养成分^[28],助力创新成果从实验室走向田间,推动农业生产实现从“经验驱动”向“数据智能驱

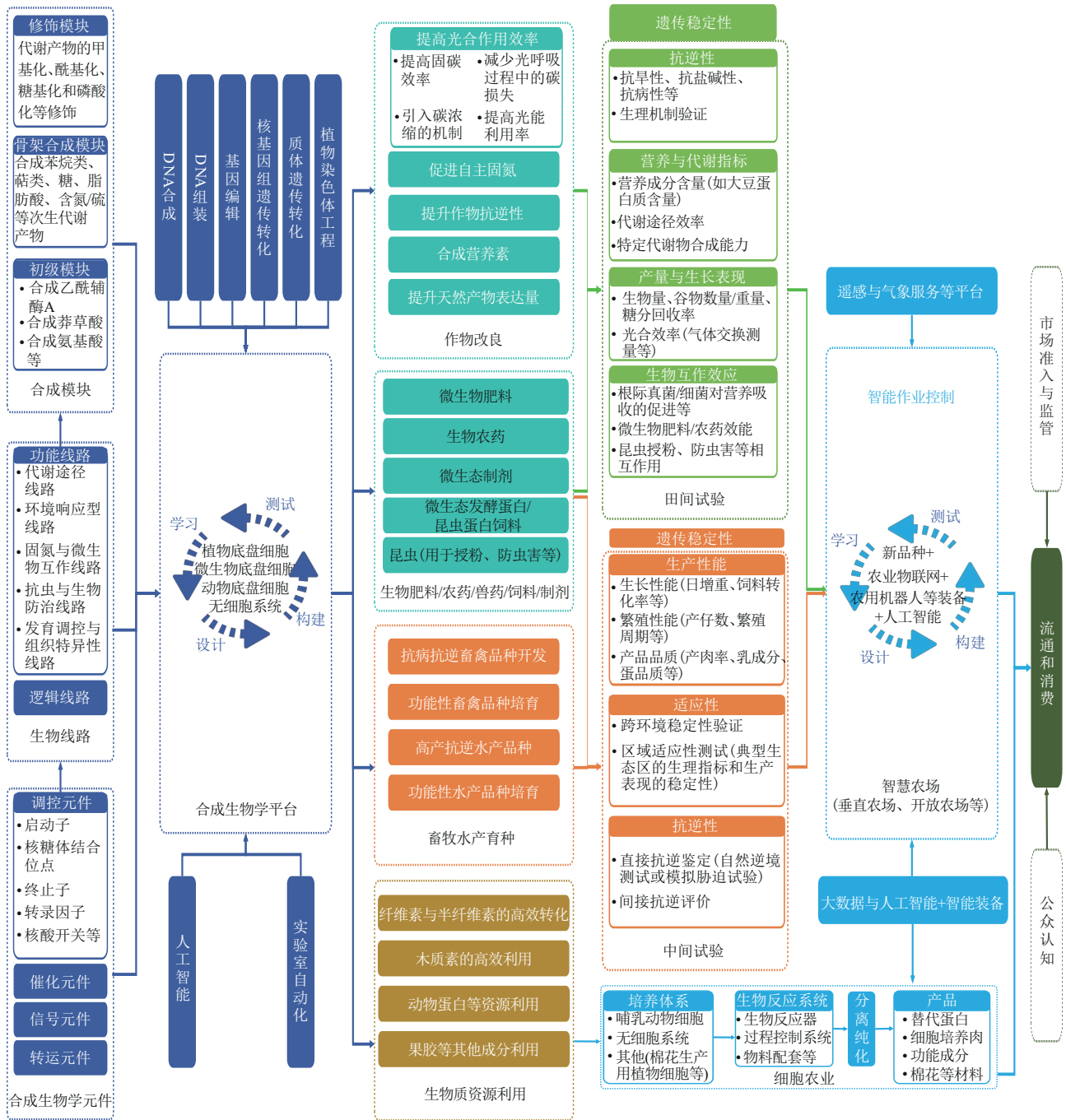


图1 农业合成生物学：从技术创新到产业应用的全流程框架

(图中左侧部分主要描述了合成生物学平台的构建过程，包括元件、生物线路、合成模块等元素的设计与测试；中间部分则聚焦于不同应用场景下的具体实践，如作物改良、畜牧水产育种、生物质资源利用等；右侧部分进一步探讨了这些技术成果如何通过智能作业控制、市场准入与监管等环节，最终实现流通和消费，并获得公众认知的过程。)

Fig. 1 Agricultural synthetic biology: A full-process framework from technological innovation to industrial application

(The left part of the figure mainly describes the construction process of the synthetic biology platform, including the design and testing of elements such as components, biological circuits, and synthetic modules. The middle part focuses on specific practices in different application scenarios, such as crop improvement, livestock and aquaculture breeding, and the utilization of biomass resources, etc. The right section further explores how these technological achievements, through intelligent operation control, market access and supervision, and other links, ultimately achieve circulation and consumption, and gain public recognition.)

动”发展。产业链下游则聚焦市场流通、消费引导与公众认知塑造，全力打通价值转化的“最后一公里”。替代蛋白、基因编辑农产品等创新产品突破传统认知壁垒，依托科学数据支撑的价值传播、监管合规性认证与沉浸式消费体验推广，有效提升市场接受度。生物互作效应研究成果优化农业生态系统，减少化学品使用，生产绿色优质农产品，满足食品安全需求。品牌打造与市场培育将创新产品转化为消费热点，拉动经济增长，实现价值从“生产端”到“消费端”的闭环流动。政策体系在此过程中扮演着“加速器”的关键角色，贯穿全产业链：上游通过专项基金和产业集群建设支持基础研究与平台开发；中游加速生物制剂审批、提供中试补贴；下游则着力完善安全评价体系、开展消费者教育，为创新产品开辟市场通道（图1）。

从创新链与产业链的内在逻辑看，农业合成生物学的创新链始于基础研究，贯通基因编辑、代谢工程等核心技术研发，具有高投入、长周期、高风险的特点；产业链则聚焦技术成果的规模化生产与市场应用，需统筹兼顾成本控制、市场接受度与监管合规性。二者的衔接面临技术成熟度不足、资金投入断层、监管标准模糊等现实障碍，而政策规划正是破解这些障碍的关键纽带。也就是说，政策通过顶层设计为产业发展提供方向指引、资源保障与制度支撑，而产业实践则通过市场反馈推动政策动态优化，形成“政策引导-技术创新-产业转化-需求反哺”的良性循环。

2 农业合成生物学的政策规划

政策规划的必要性源于农业合成生物学的三重特性：其一，技术研发具有强外部性，需借助政策工具内化社会效益以引导资本投入；其二，产业链关乎粮食安全等战略领域，市场机制难以独立应对系统风险；其三，公众对“非自然改造”的认知壁垒需通过政策主导科学传播与消费者教育予以突破。因此，诸多国家（地区）正加速制定支持该领域发展的政策与战略规划。例如，美国通过发布路线图，将农业合成生物学定位为关键领域，特别支持基因编辑和代谢工程等技术

在农业领域的研发应用；欧盟在其《地平线欧洲计划》中明确强调，合成生物学是农业绿色转型的关键驱动力，并重点支持改善土壤健康、减少农药使用及促进碳中和等领域。英国、澳大利亚等国也通过政策引导技术革命，推动农业合成生物学实现从“实验室突破”到“田间革命”的跨越。

2.1 美国通过长期战略规划支持农业合成生物学基础研究与技术创新

美国农业合成生物学的政策在政府机构间分层互补、动态联动的政策支持体系下（表1），呈现跨学科整合、长期战略规划以及动态调整的特征。例如，美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）聚焦基础研究与技术创新，通过资助合成生物学工程研究中心及植物基因组研究项目等，推动基因编辑和代谢工程技术在农业中的应用，提升作物改良和生物质转化效率。美国农业部（United States Department of Agriculture, USDA）则聚焦技术落地与监管适配，通过《植物遗传资源、基因组学和遗传改良行动计划2018—2022》^[39]，利用基因组学提升作物抗逆性和产量，并调整基因编辑作物的监管框架以适应现代农业的需求，不仅为研究提供了指导方向，还为企业在实际生产中应用新技术创造了条件，促进了实验室到市场的无缝衔接。美国国家研究理事会（National Research Council, NRC）致力于制定长远战略，统筹战略方向与产业愿景，明确生物制造在农业中的核心作用。美国国防部（United States Department of Defense, DOD）则通过跨领域资源整合，拓展技术应用场景，着眼于生物防御与军事应用，探索合成生物学在农业废弃物资源化利用的潜力，以增强国家安全和资源利用效率。这种跨部门的合作不仅加速了技术转化，形成从技术突破到产业转化的闭环生态，更增强了领域整体竞争力。

美国政府还通过《国家生物技术和生物制造计划》^[40]，投入大量资金开发气候智能型农业系统等项目，进一步提高农业生产的可持续性和环境友好性。美国工程生物学研究联盟（EBRC）提出的《下一代生物经济路线图》涵盖作物改良、微生物底盘开发等方向^[41]，为未来研究确立优先方

表1 美国农业合成生物学政策规划 (例举)

Table 1 A list of policy plans for agricultural synthetic biology in the United States

出台时间	出台部门	政策规划	农业合成生物学相关内容
2006年	美国国家科学基金会	资助建立合成生物学工程研究中心 ^[29]	提供3900万美元资助,通过跨学科合作推动基因编辑、代谢工程和生物传感器设计等技术在农业中的应用
2014年	美国国防部	将合成生物学列为优先发展领域 ^[30]	推动合成生物学在军事和农业领域交叉应用(如生物防御)
2015年	美国国家研究理事会	《生物学工业化路线图:加速化学品的先进制造》 ^[31] 等	制定技术路线及目标,揭示合成生物学将农业生物质原料转化为化学品的潜力
2016年	美国国会	《国家生物工程食品信息披露法》 ^[32]	要求美国农业部根据法案制定生物工程食品的强制性标准,披露生物工程食品的信息
2016年	美国国家科学基金会	资助植物基因组研究项目	重点研究大豆种子繁殖的基因调节网络;在基因组水平上了解玉米小麦和谷物中维生素含量平衡的种子生物化学原理;利用番茄的天然多样性来寻找新的抗病资源等
2017年	美国农业部	《植物遗传资源、基因组学和遗传改良行动计划2018—2022》 ^[33]	利用植物的遗传潜力助力农业转型,提高农产品的产量和质量,增强粮食安全,并降低全球农业对疾病、害虫和极端环境的脆弱性
2017年	美国农业部	撤销对应用CRISPR基因编辑技术的农作物进行管理的计划 ^[34]	调整基因编辑作物监管框架,将CRISPR编辑作物移出传统转基因范畴,转为聚焦其作为“潜在有害杂草”的风险评估
2019年	美国工程生物学研究联盟	《工程生物学:下一代生物经济研究路线图》 ^[35]	建议重点投资包括粮食和农业在内的5个领域,其中农业合成生物学聚焦作物改良(光合效率优化、固氮系统)、微生物底盘开发、智能元件设计等方向
2023年	美国白宫科技政策办公室	《生物技术与生物制造宏大目标》报告 ^[36]	倡导在食品与农业领域构建气候智能型农业系统,培育更具抗逆性和适应性的作物品种
2024年	美国参议院	《2024年合成生物学推进法案》 ^[37]	建立国家合成生物学中心,促进食品和农业等领域的创新
2025年	美国国家新兴生物技术安全委员会	《生物技术未来蓝图》报告 ^[38]	提出六大战略行动和49项具体建议,提议未来五年投入至少150亿美元支持生物技术研发,推动农业合成生物学等领域发展

向。2024年发布的《合成生物学推进法案》进一步提出建立国家合成生物学中心^[42],聚焦粮食安全和农业可持续性,通过跨部门协作加速技术转化。这些举措彰显了美国各机构在推动农业合成生物学发展中的独特贡献和协同效应,有效推进该领域的创新发展。

2.2 欧盟聚焦低碳转型与绿色农业发展

欧盟在农业合成生物学领域的政策规划演进,呈现出从严格监管向支持创新与可持续发展的趋势。早期政策聚焦转基因生物的严格风险评估、标识和追踪管理。这一阶段的监管框架虽强化了生物安全控制,但因审批周期长、成本高、公众接受度低等问题,在一定程度上限制了技术应用的商业化进程,导致欧盟在农业生物技术领域的产业发展长期相对滞后。随着生物技术的持续进步,欧盟逐步意识到合成生物学在农业领域的潜在价值,并通过一系列战略规划、科研资助及跨

区域合作,积极推动技术创新。自2010年代起,欧盟的政策重心转向低碳转型与绿色农业发展,显著增强对生物经济的支持力度,并在监管框架上进行适应性调整,特别是在基因编辑技术的应用方面,探索差异化管理路径。例如,2018年欧盟最高法院对基因编辑作物的分类争议引发的政策反思^[43],促使欧盟部分成员国(如德国、法国)在地方层面试点简化审批流程,为技术落地提供了实验性通道。2023年后,欧盟提出新基因组技术分类监管方案,结合环境监测与数据驱动工具,旨在通过精准化监管提升农业的资源利用效率和气候适应能力,同时降低企业合规成本。这种从“限制性监管”向“适应性监管”的转变,有力推动了农业合成生物学在欧盟的健康发展,也凸显了政策优化对产业协同推进的关键作用(表2)。

2.3 多国依托本土资源整合,推动领域高质量发展

英国、澳大利亚和加拿大通过政策设计与产

表2 欧盟农业合成生物学政策规划 (例举)

Table 2 A list of policy plans for agricultural synthetic biology in the European Union

出台时间	出台部门	政策规划	农业合成生物学相关内容
2001年	欧盟委员会	关于转基因生物的追溯性及标识办法与转基因生物食品和饲料产品的追溯性条例 ^[44]	建立转基因生物环境释放和商业化审批制度,严格规范风险评估、标识及可追溯性管理,确保农业应用的安全性
2003年	欧盟委员会	关于转基因食品和饲料的条例 ^[45]	统一转基因食品和饲料的上市审批流程,转基因农产品必须通过欧洲食品安全局的安全评估,并执行强制标识规定,以保障消费者健康权益
2007年	欧盟委员会	发布《迈向基于知识的生物经济》报告 ^[46]	展望食品与营养等领域2030年生物经济发展前景,聚焦生物经济前沿的新概念与技术趋势
2010年	欧盟委员会	发布《欧洲基于知识的生物经济:成就与挑战》报告 ^[47]	提出整合政策与创新举措以支持向低碳可再生经济转型
2014年	欧洲合成生物研究区域网络	《欧洲合成生物学下一步行动——战略愿景》 ^[48]	概述合成生物学在环境、能源和农业领域的广阔前景
2016年	欧盟委员会	“地平线 2020”研究计划 ^[49]	资助未来农业项目,专注于重新设计植物代谢途径以提高碳固定效率和产量,例如通过优化光呼吸过程来提升光合效率
2018年	欧盟委员会	更新版《生物经济战略:可持续的欧洲生物经济——加强经济、社会与环境的联系》 ^[50]	加速生物经济转型,支持非粮生物质转化技术(如秸秆转化)
2020年	欧盟委员会	《从农场到餐桌战略》 ^[51]	强调微生物农药和生物肥料在替代化学农药、推动农业绿色转型中的作用,支持利用微生物技术开发抗逆作物和生物防治工具,降低农业对环境的影响
2021年	欧盟委员会联合研究中心	《新基因组技术当前和未来的市场应用》 ^[52]	建议调整监管框架,明确将不含外源DNA的基因编辑作物排除在2001/18/EC转基因法规之外,并呼吁通过立法修订实现差异化监管。同时强调基因编辑作物是推动欧盟监管改革的重要依据,可促进“绿色协议”目标达成与提升粮食安全水平
2021年	欧盟委员会	“地平线欧洲”研究计划 ^[53]	重点支持改善土壤健康、减少农药使用及促进碳中和的项目,涵盖合成微生物群落等技术的开发与应用
2022年	欧洲食品安全局	发布合成生物学技术培育转基因植物,用于食品和饲料的适用性评估报告 ^[54]	建议未来的指南应明确如何将合成生物学的设计和建模信息纳入食品和饲料风险评估体系,并倡导在转基因植物的设计阶段即纳入食用和饲用安全性评估
2024年	欧盟委员会	《新基因组技术提案》 ^[55]	将植物分为NGT-1型和NGT-2型两类,前者免于转基因生物法规监管,但需向主管部门报备、标记种子信息、列入公开数据库,且禁止用于有机生产;后者适用传统转基因生物监管框架,需进行风险评估和上市授权。对具备可持续农业贡献性状(如抗病、抗旱)的植物,可适用简化审批程序
2024年	欧盟委员会	《与自然共建未来:推动生物技术和生物制造》 ^[56]	强化气候智能型农业导向,通过合成生物学等技术提高资源利用效率和气候适应能力;重点布局合成生物学在工业、医疗和农业领域的应用;推动数据驱动模型的开发

业需求的动态适配,构建了农业合成生物学领域的“政策-产业”协同推进机制。该机制的核心在于以顶层设计优化监管框架、强化科研支持,并以市场需求为导向加速技术转化。

英国通过顶层设计、重点领域布局与灵活监管机制,系统推进合成生物学在农业等关键领域的高质量发展。2018年发布的《至2030年国家生物经济战略》^[57]将合成生物学确立为工业战略的支柱之一,强调技术转化和多领域产业化应用。

该政策通过建立创新网络加速生物经济的发展。2021年,英国研究与创新署(UK Research and Innovation, UKRI)主导的《国家工程生物学计划》^[58],首次将农业列为优先领域,强化农业合成生物学的系统布局,支持作物遗传育种、动物标记育种和废弃物资源化等研究,鼓励植物天然产物合成和生物传感技术的开发,促进形成“科研-产业-市场”闭环。2023年,英国科学、创新与技术部(Department for Science, Innovation and

Technology, DSIT) 在《工程生物学的国家愿景》^[59] 中进一步承诺增加资金投入, 深化在农业、医疗等领域的应用创新, 彰显政策对产业需求的敏捷响应。

澳大利亚通过一系列系统性政策布局与多阶段发展目标的设定, 有效整合了科研、产业与国际合作资源, 并利用合成生物学技术应对农业与环境挑战, 有力促进了生物经济的发展。2021年, 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) 发布《国家合成生物学路线图》^[60], 首次从国家战略高度分阶段设定发展目标, 这一政策设计不仅明确了农业合成生物学在保障粮食安全和实现环境可持续性方面的战略价值, 还通过“短期能力建设、中期商业突破、长期市场主导”的阶段性目标, 为产业发展提供清晰路径。其中, 短期目标聚焦商业可行性验证, 中期着力推动产业关键规模形成, 长期则瞄准全球市场扩展, 由此构建了“研发-验证-产业化”的梯度支持体系^[61]。

加拿大通过监管灵活性调整和产学研网络建设, 积极利用农业合成生物学技术, 应对经济、环境和社会挑战。例如, 通过发布《加拿大工程生物学白皮书: 推动经济复苏和生物制造现代化的技术平台》^[62], 将农业合成生物学定位为经济复苏的关键技术方向, 并将粮食安全列为优先领域。2022年, 加拿大卫生部发布的新指南明确指出, 基因编辑作物若与传统育种无实质差异则无需上市前安全评估, 这一“产品导向”的监管原则显著降低了企业合规成本^[63]。2025年《加拿大基因组学战略》进一步提出构建产学研网络, 加速农业生物技术转化^[64]。此外, 加拿大政府持续加强监管协调: 2023年农业部发布支持基因编辑种子引入市场的指南^[65], 2024年食品检验局简化新型生物农药/肥料审批流程^[66], 均体现了监管对产业需求的适应性调整。

2.4 政策导向引领我国农业合成生物学实现产学研协同创新

我国农业合成生物学领域规划布局的发展历程可划分为四个阶段: 早期基础与战略萌芽期

(2010年前)、战略明确与体系构建期(2011—2020年)、规划深化与产业加速期(2021—2024年)以及技术跨越与产业爆发期。这一历程不仅形成了从国家战略到地方实践的多层次支持体系, 更彰显了我国在新兴生物技术领域的战略前瞻性与审慎态度。在推动创新发展的同时, 我国也积极强化安全监管, 为农业合成生物学的稳健发展奠定了坚实保障。

我国农业合成生物学相关的基础研究布局始于国家科技计划的支持。2010年前, “国家高技术研究发展计划”与“国家重点基础研究发展计划”虽未直接冠以“合成生物学”之名, 但所资助的基因工程、微生物代谢调控等生物技术研究, 为后续技术发展奠定了重要基础。随后, 在2018年, 科技部启动的“合成生物学”重点专项, 涵盖了抗逆作物育种和生物农药合成等领域, 标志着该领域迈入加速发展阶段。在此期间, 我国《“十三五”生物技术创新专项规划》^[67]明确要求突破微生物固氮、作物代谢通路设计等农业关键技术, 推动相关学科从基础研究向应用导向的战略转型。2022年颁布的《“十四五”生物经济规划》^[68]将合成生物学列为关键创新领域, 要求突破基因设计、细胞工厂等使能技术, 重点发展生物育种、微生物固氮及“人造蛋白”新型食品。此外, 教育部于2022年将合成生物学纳入生物育种科学核心课程体系, 有力促进了教育与科研的结合。与此同时, 多地出台支持政策, 标准建设也在同步推进, 如团体标准《农业合成生物技术的创新与应用》积极探索产品分类准入机制, 以推动技术的规范化应用^[69]。

总体来看, 农业合成生物学的产业化进程依赖政策与市场的双向驱动。早期严格或模糊的监管框架曾限制其产业化进程, 但各国通过政策调整构建了“政策破除壁垒-产业反馈需求-政策动态优化”的协同机制, 显著提升了技术转化效率。然而, 该领域仍然面临一些核心挑战: 在技术层面上, 遗传线路设计、规模化生产等关键技术瓶颈有待突破, 需持续加强基础研究和技术创新; 在监管层面, 生物安全风险平衡机制尚待完善, 亟需建立更为科学、精准的监管体系, 在保障安全的同时促进创新; 在产业层面, 产学研协同创

新机制有待加强，需进一步推动科技成果转化和产业化应用。未来，若能持续突破这些瓶颈，并通过政策引导、资金支持和国际协调等综合措施，全球农业合成生物学的产业化进程有望显著加速，从而推动农业向更高效、绿色和可持续发展的方向发展。

3 农业合成生物学的产业发展

在政策规划的顶层设计下，技术、资本、监管与市场等要素得以高效整合，系统地破解了创新链与产业链间的转化鸿沟。在此背景下，农业合成生物学的产业发展潜力加速释放，实验室成

果向新质生产力的转化链条持续优化，农业合成生物学的相关产品也陆续在国内外市场落地应用。

3.1 国外利用前沿技术推动农业生产全链条革新与可持续发展

当前，全球农业合成生物学产业正通过前沿技术重塑农业生产全链条，涵盖作物改良及保护、食品与饲料创新和可持续化等多个维度（表3），形成了以北美（尤其是美国）为创新高地，欧洲、亚太地区紧随其后，快速跟进的发展格局。这不仅加速了技术的快速传播和应用，也推动了农业生产向绿色化、智能化转型。

表3 国外农业合成生物学领域的企业及相关产品（示例）

Table 3 Examples of enterprises and related products in the field of international agricultural synthetic biology

企业名称	国家/地区	细分领域	农业合成生物学产品或服务
AgBiome	美国	作物保护	植物遗传性状分析和生物农药研制
AgriMetis	美国	作物保护	天然杀虫剂
Agrisea	加拿大	作物改良	海洋稻米
Agrivida	美国	动物营养	利用工程化改造玉米生产饲料酶
Apeel	美国	农产品保鲜	开发植物源涂层技术以延长果蔬保鲜期
Avalo	美国	作物研发	利用机器学习促进基因发现及作物改良
BioCraft Pet Nutrition	美国	宠物食品	研发用于宠物食品的培养肉
Benson Hill	美国	作物改良	用于改良作物基因的生物信息平台 CropOS™
Berkeley Yeast	美国	食品	设计酵母菌株,以实现可持续酿酒
BioPhero	丹麦	生物防治	利用发酵生产控制害虫的信息素
BlueNalu	美国	食品	细胞培养海产品
Bluestem Biosciences	美国	农业	基于计算工具的可持续生物制造
Bond Pet Foods	美国	宠物食品	利用微生物发酵技术生产宠物食品蛋白质
Boost Biomes	美国	生物防治	开发针对植物真菌病原体的生物防治组合物
Calysta	美国	饲料产品	利用天然气和微生物发酵生产饲料蛋白
Calyxt	美国	作物改良	研发高油酸大豆、抗白粉病小麦等作物
Caribou Biosciences	美国	生物育种	利用基因编辑技术培育猪、牛及其他家畜的新性状
Cibus	美国	作物改良	利用基因编辑进行育种
Deep Branch Biotechnology	英国	饲料产品	将二氧化碳转化为可持续生产的蛋白质,替代传统饲料中的大豆和鱼粉
Endless West	美国	饮品	使用天然植物和酵母提取物生产新型酒类产品
Ethos Chocolate	美国	食品	利用转基因可可树生产巧克力
Evogene	以色列	作物改良	利用植物基因组学开发提升作物性能和生产力的种子
G+Flas Life Sciences	韩国	生物育种	利用基因编辑技术开发植物基生物改良剂
GreenLight Biosciences	美国	RNA生物农药	开发双链RNA喷剂,用于防治害虫、杂草及有害真菌
Ikenga Wines	美国	酿酒	可持续生产葡萄酒
Concentric Agriculture	美国	农业	土壤改良剂和植物生产促进剂
Invaio Sciences	美国	生物防治	基于AI开发生物制剂以减少传统农药的使用
Jord Biosciences	美国	农业	定制微生物解决方案
Joyn Bio	美国	食品	开发植物益生菌以减少农业对氮肥的依赖
Khepra	美国	农业	结合多领域技术解决农业及相关研究问题

续表

企业名称	国家/地区	细分领域	农业合成生物学产品或服务
KWS SAAT SE	德国	育种	植物育种
Lachancea	美国	食品	通过设计酵母改良发酵饮料品质
Lesaffre	法国	发酵	专注于发酵和探索微生物的潜力,生产和销售面包酵母等
Marrone Bio Innovations	美国	生物防治	制定生物农药和微生物解决方案
Meiogenix	法国	作物改良	开发非转基因植物的染色体编辑技术
Nature's Fynd	美国	蛋白质生产	通过改造微生物发酵生产菌类蛋白质
Oxitec	英国	虫害防治	基因改造昆虫(利用虫际传播控制害虫)
Pheronym	美国	生物防治	开发信息素喷雾用作有机杀虫剂
PivotBio	美国	微生物固氮	开发针对作物的微生物固氮产品,用于减少化学氮肥使用
Planetarians	美国	食品	生产植物基蛋白质
Plastomics	美国	作物改良	利用叶绿体功能特性,研发抗病虫害作物
Provivi	美国	生物防治	用昆虫信息素生产农药替代品
Real Vegan Cheese	美国	食品	开发无动物奶制品的纯素奶酪
Recombinetics	美国	育种(动物)	利用基因编辑培育动物
Valent BioSciences	美国	生物防治	开发生物杀虫剂、植物生长调节剂、生物刺激剂
Vestaron	美国	生物防治	开发新型多肽农药
Yield10 Bioscience	美国	作物改良	利用差异化性状基因发现平台,发现特定遗传性状并培育优良品种

作物改良和作物保护是产业的核心方向之一。在作物改良方面,农业发达国家已步入以“生物技术+信息技术+人工智能+大数据”为特征的育种4.0时代。欧美国家凭借其在生物技术和信息技术领域的早期布局、丰富的种质资源积累、先进的技术工艺以及成熟的全产业链经营模式,在国际种业市场占据了主导地位,特别是拜耳(Bayer)、科迪华(Corteva)等龙头企业,占据了全球近一半的种子市场份额,展示了强大的技术领导力和市场竞争力。与此同时,企业专注于特定的技术或市场需求,借助基因编辑与基因组学技术培育高性能品种。例如,Benson Hill公司的CropOS™平台通过基因组学优化作物性状^[70]; Cibus公司开发的“快速性状开发系统”(Rapid Trait Development System, RTDS®)将作物特异性细胞生物学平台与基因编辑技术相结合,以实现半自动化的精准育种^[71]。此外,Calyxt公司于2019年生产出首个基因编辑植物产品——不含反式脂肪的大豆油^[72]; G+Flas Life Sciences公司研发的CRISPR植物表达系统可在不引入转基因的情况下培育更优良的植物品种^[73]; Alora公司的耐盐水稻拓展了抗逆作物的地理适应性^[74]; Pivot Bio公司推出的微生物固氮产品可替代化学氮肥,直接为玉米提供氮营养并减少径流污染^[75],体现了合成生物学在减少农业投入品依赖方面的突破。在作物保护领域,企业通过生物防治剂替代化学农药,降低环

境足迹。例如,AgBiome公司利用微生物全基因组大数据平台研制生物农药,开发新型农作物保护产品^[76]; GreenLight Biosciences公司推出双链RNA喷剂,精准靶向害虫、杂草和真菌,避免伤害益虫及污染水土^[77]; Oxitec公司则通过基因改造昆虫并利用虫际传播控制害虫数量,减少疾病传播与作物损害^[78]。

在食品与饲料创新领域,合成生物学的发展促进了资源高效利用和可持续替代。全球各国积极支持未来食品与替代蛋白的研究,通过实施专项计划、建设研究平台、完善数据中心等举措,加速该领域的技术突破与产业发展^[79]。例如,Better Meat公司研发的Rhiza菌丝蛋白在获得美国食品药品监督管理局(FDA)安全性认可之后,又于2024年7月获得新加坡食品局的监管批准作为纯素肉和食品的增强剂^[80]; Apeel公司研发的可显著延长果蔬保鲜期的植物源涂层技术^[81]; Nature's Fynd公司通过微生物发酵生产菌类蛋白^[82]; Agrivida公司开发的GRAINZYME®植酸酶饲料添加剂,通过增强饲料消化率减少动物营养损耗^[83]; Calysta公司则利用天然气发酵生产蛋白饲料FeedKind®,服务水产与畜牧养殖^[84]。

3.2 我国着力构建从实验室到田间的全链条产业生态,为保障粮食安全和推动低碳转型提供支撑

我国农业合成生物学领域已初步构建起“技

术研发-产品转化-场景应用”全链条的产业生态。从基因编辑育种、微生物固氮、替代化肥、生物农药，到生物基可降解农膜和微生物蛋白饲料，相关企业正从实验室走向田间，为保障粮食安全、推动农业低碳转型提供系统性解决方案（表4）。在生物育种领域，我国高度重视生物育种产业化发展，将种子视为农业的“芯片”和国家战略性、基础性核心产业。自2020年12月中央经济工作会议提出“有序推进生物育种产业化应用”，到2025年中央一号文件强调“继续推进生物育种产业化”，国家政策的陆续出台为强化生物育种产业化发展提供了有力支撑，推动产业链的不断完善与优化。在此背景下，一批具有核

心技术竞争力的企业应运而生：齐禾生科聚焦小麦、大豆等作物的抗逆性与产量提升^[85-86]；隆平高科构建国内领先的商业化育种体系和测试体系，在全球多国设立60多个水稻、玉米、蔬菜、谷子和食葵育种站^[87]；舜丰生物自主研发CRISPR Cas SF01和CRISPR Cas SF02基因编辑核心工具，成功培育出增产15%的高产水稻与油酸含量超过80%的高油酸大豆等^[88]；大北农积极布局抗病高产作物品种开发，并与蓝晶微生物等合成生物企业合作加速技术落地^[89]；中农海稻、中农美蔬、中农种源等创新主体持续推动精准育种技术迭代，构建覆盖主粮与经济作物等的育种体系^[90]。

表4 国内农业合成生物学领域的企业及相关产品（示例）

Table 4 Examples of domestic enterprises and related products in the field of agricultural synthetic biology

企业	细分领域	农业合成生物学产品或服务
大北农	生物育种	利用基因编辑育种技术,开发高产、抗病作物品种
昶辉生物	农业与食品	开发生产天然植物提取物
昌进生物	食品	开发微生物蛋白产品,用于替代传统蛋白和乳制品
引航生物	生物制造	生产维生素、 β -烟酰胺核苷酸等饲料添加剂
德默特生物	农业与食品	规模化 and 商业化生产微藻基产品,用于食品和动物营养等领域
艾迪晶生物	生物育种	提供植物基因编辑技术和遗传转化技术平台,服务品种开发
汉和生物	农业与食品	开发绿色功能型肥料产品
黎拓生物	农业与食品	利用先进的基因编辑技术改良传统作物
隆平高科	生物育种	整合合成生物技术优化杂交水稻性状,利用基因编辑技术育种
弥生生物	生物育种	基因编辑技术的精准育种
慕恩生物	生物肥料	利用合成生物技术开发微生物制剂,应用于生物肥料和病虫害防治;布局微生物蛋白产业化
微构工场	生物材料	嗜盐微生物的改造和工程化应用
绿氮生物	合成固氮	开发固氮菌便携式培菌箱和专用培菌机,支持就地发酵培养
瑞普生物	动物营养	利用合成生物技术研发动物保健产品,规模化生产微生物蛋白
播恩集团	饲料产品	通过微生物代谢生产高效生物发酵饲料、幼畜营养产品
富邦股份	生物肥料	布局生物肥料与禾本科固氮、生物农药与根结线虫防治;利用基因编辑技术和合成生物学方法研发微生物菌剂、生物肥料等产品
利民股份	生物农药	利用合成生物技术生产L-草铵膦;通过基因编辑开发生物活性物质,提升农药安全性和有效性
蔚蓝生物	食品	研发饲料用功能性蛋白、食品用甜味剂等
齐禾生科	生物育种	利用基因编辑技术改良主粮作物
舜丰生物	生物育种	利用CRISPR技术开发高产水稻、高油酸大豆、高 γ -氨基丁酸(GABA)番茄等
小藻科技	农业与食品	开发微藻营养素超级工厂
首朗生物	饲料产品	实现人工合成乙醇梭菌蛋白的中试稳定生产
元一生物	农业与食品	构建工程化细胞工厂,开发饲料添加剂
芝诺科技	农业与食品	利用合成生物学、发酵工程技术开发高附加值天然产物
中农美蔬	生物育种	利用全基因组育种设计,研发蔬菜新品种
中农种源	生物育种	农业动物育种
百斯杰生物	饲料产品	生产淀粉酶、蛋白酶等饲料添加剂

微生物技术的应用是农业合成生物学产业的重要方向,有力推动绿色农业的发展及资源的高效利用。作为种业、生物技术的重要环节,农业微生物产业已经纳入国家发展规划,如“十四五”规划纲要明确提出加强种质资源保护利用和种子库建设、培育具有国际竞争力的种业龙头企业。例如,慕恩生物依托功能菌株库,分离并储备了超过22万株农业功能微生物菌株,并开发出土壤修复菌剂及病虫害防治微生物制剂^[91];昌进生物、芝诺科技聚焦微生物发酵蛋白技术,用于替代蛋白及乳制品开发^[92-93];首钢朗泽构建合成生物技术研究平台,开展发酵菌株代谢工程改造,大幅提升菌株的发酵效率、适应性和耐受性^[94]。

在农业投入品的绿色制造领域,《“十四五”全国农业农村科技发展规划》明确强调加强绿色投入品创制,重点开发绿色农药、功能饲料等新型农业投入品,而合成生物学技术正显著增强产品效能与安全性。其中,引航生物通过生物催化生产饲料用维生素^[95];德默特生物研发微藻源类胡萝卜素等营养强化剂^[96];百斯杰生物开发淀粉酶、蛋白酶等饲料添加剂,显著提升动物营养吸收效率^[97];利民控股致力于发展以噬菌体技术与合成生物技术为底层支撑的噬菌体生物农药,其具有靶向性强、安全性高、用药量低、环境友好性等优势^[98];富邦科技则利用CRISPR技术开发抗线虫微生物菌剂及生物肥料,构建绿色植保体系^[99-100]。

同时,生物基材料与装备创新应用持续拓展产业边界。微构工场开发的生物高分子可降解聚羟基脂肪酸酯(PHA)材料,凭借优良的生物相容性和生物降解性,可用于农产品的可持续包装^[101];蔚蓝生物通过研发饲料功能性酶制剂、益生菌、植物提取物及动物保健品,构建系统化的抗生素替代方案^[102];播恩集团则利用微生物发酵技术高效生产生物饲料,成功实现蛋白原料的低成本替代^[103]。在装备领域,绿氮生物研发的便携式培菌设备实现了固氮菌的就地发酵,显著降低了固氮技术的应用门槛^[104];元一生物公司则通过构建酵母高密度发酵平台,并与大北农集团展开深度合作,共同探索和开发农业高价值产品^[105]。这种合作模式协同推动了技术进步与产业升级,

为农业生产注入新动能,有望带动整个农业产业链的变革与发展。

总体来看,农业合成生物学产业近年来在创新领域取得了显著进展,但仍面临多重挑战。例如,通过作物改良以实现更广泛的地理适应性和环境适应性仍有待突破;生物防治剂的稳定性和对复杂生态系统的长期影响需进一步验证,食品创新中新技术的产品安全性与市场接受度仍是亟待解决的问题。此外,行业依赖大型企业投资,但除北美市场较为成熟以外,全球多数地区缺乏有力资本支持。为此,需构建“政策-产业”双向联动机制:一方面,通过专项基金、税收减免等政策工具加速关键共性技术的中试验证与产业化,同时建立跨部门协作平台,推动科研机构、企业与政府在标准制定、监管创新上的深度对接,破解生物安全评估与市场准入壁垒;另一方面,依托示范园区、产学研联合体等载体,打通实验室成果与规模化生产的转化通道,并通过国际合作与本土化政策设计,引导资本流向早期项目,提升中小企业的技术水平。

4 总结与展望

农业合成生物学作为一门新兴的交叉学科,正引领全球农业变革。通过重塑生物系统,其为农业领域的研究和生产带来了前所未有的机遇与挑战。全球主要国家和地区已将其列为战略性技术领域,相继制定并实施了一系列规划和政策。这些政策从基础研究支持到产业应用引导,从监管框架构建到国际合作推动,全方位布局以抢占未来农业生物技术的制高点。我国也在积极构建适应国情的科技规划与政策体系,从早期支持基础研究的科技项目,到近年来将合成生物学纳入国家生物经济发展规划、农业农村科技发展规划等重要文件,政策重点逐渐向产业应用倾斜。同时,我国不断完善生物安全监管与技术标准,既为创新链的技术突破指引了方向,又为产业链的规范落地提供了保障,奠定了“创新-产业”闭环的构建基础。

这种协同效应持续拓展了农业合成生物学的应用场景,涵盖了粮食安全领域的抗旱水稻、高

维生素番茄品种、RNA干扰杀虫剂、微生物肥料的开发，循环经济中的农业废弃物转化，以及细胞农业的替代蛋白等领域。此外，国内外众多企业凭借领先的技术创新和敏锐的市场洞察力，在基因编辑作物、合成生物学农产品、生物农药以及微生物肥料等领域的突破，推动农业合成生物学从“技术概念”迈向“产业现实”，形成“生产-加工-消费”的全链条价值网络，也进一步验证了创新链提供技术内核、产业链完成市场转化，政策在中间搭建桥梁的协同成效。

然而，农业合成生物学领域的大规模应用仍面临多方面挑战，凸显了要进一步强化协同的必要性。微生物肥料效能不稳定、生物农药规模化成本高，反映出创新链的核心技术（如微生物环境适应性改造、发酵技术）与产业链的工业化需求衔接不足；监管审批、市场接受度等问题，则需要政策规划与产业实践更紧密联动——既要平衡生物安全与创新激励，又要通过政策引导提升公众认知。此外，国际监管差异和标准不统一阻碍了全球流通，更需各国在政策协同层面形成共识，为产业链的全球布局扫清障碍。

未来，随着基因编辑、合成生物学等前沿技术的不断发展，以及相关政策支持力度的持续加大和监管体系的逐步完善，农业合成生物学有望展现出更广阔的应用前景。它将对作物基因组的精准操作，显著提升作物的产量和品质，培育出高产、抗病虫害和环境适应性强的新品种；通过构建更加稳定和多样化的生物群落，提高农业系统对环境变化和病虫害的抵抗能力，增强农业生态系统的韧性。此外，农业合成生物学还为缓解农业面源污染提供了新的技术路径，例如通过开发和应用可生物降解的绿色投入品，替代传统化学肥料和农药，降低对环境的负面影响。最终，在政策与产业的持续协同下，将深化革新粮食安全、循环经济等领域，助推全球农业向高效、绿色、可持续转型。

参 考 文 献

- [1] WANG L T, ZANG X, ZHOU J H. Synthetic biology: a powerful booster for future agriculture[J]. *Advanced Agrochem*, 2022, 1(1): 7-11.
- [2] VILLIGER L, JOUNG J, KOBLAN L, et al. CRISPR technologies for genome, epigenome and transcriptome editing [J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2024, 25(6): 464-487.
- [3] RUAN S P, JIANG Y C, WANG A X, et al. Carbon sequestration pathways in microorganisms: advances, strategies, and applications[J]. *Engineering Microbiology*, 2025, 5(2): 100196.
- [4] GALINDO F S, PAGLIARI P H, DA SILVA E C, et al. Impact of nitrogen fertilizer sustainability on corn crop yield: the role of beneficial microbial inoculation interactions[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 268.
- [5] YE X Y, QIN K Z, FERNIE A R, et al. Prospects for synthetic biology in 21st century agriculture[J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2025, 52(8): 967-986.
- [6] ZHU Y G, PENG J J, CHEN C, et al. Harnessing biological nitrogen fixation in plant leaves[J]. *Trends in Plant Science*, 2023, 28(12): 1391-1405.
- [7] GOOLD H D, WRIGHT P, HAILSTONES D. Emerging opportunities for synthetic biology in agriculture[J]. *Genes*, 2018, 9(7): 341.
- [8] PURNICK P E M, WEISS R. The second wave of synthetic biology: from modules to systems[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2009, 10(6): 410-422.
- [9] YASMEEN E, WANG J, RIAZ M, et al. Designing artificial synthetic promoters for accurate, smart, and versatile gene expression in plants[J]. *Plant Communications*, 2023, 4(4): 100558.
- [10] RADIVOJEVIĆ T, COSTELLO Z, WORKMAN K, et al. A machine learning Automated Recommendation Tool for synthetic biology[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4879.
- [11] BROWN D M, PHILLIPS D A, GARCIA D C, et al. Semiautomated production of cell-free biosensors[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2025, 14(3): 979-986.
- [12] CHI H T, WANG X L, SHAO Y, et al. Engineering and modification of microbial chassis for systems and synthetic biology[J]. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 2019, 4(1): 25-33.
- [13] LI G T, AN L N, YANG W N, et al. Integrated biotechnological and AI innovations for crop improvement[J]. *Nature*, 2025, 643(8073): 925-937.
- [14] GAO C X. Genome engineering for crop improvement and future agriculture[J]. *Cell*, 2021, 184(6): 1621-1635.
- [15] XU Y B, ZHANG X P, LI H H, et al. Smart breeding driven by big data, artificial intelligence, and integrated genomic-

- enviromic prediction[J]. *Molecular Plant*, 2022, 15(11): 1664-1695.
- [16] MA Y X, ZHANG Z Y, JIA B, et al. Automated high-throughput DNA synthesis and assembly[J]. *Heliyon*, 2024, 10(6): e26967.
- [17] ZHANG D L, XU F, WANG F H, et al. Synthetic biology and artificial intelligence in crop improvement[J]. *Plant Communications*, 2025, 6(2): 101220.
- [18] ZHAO Z H, FERNIE A R, ZHANG Y J. Engineering nitrogen and carbon fixation for next-generation plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2025, 85: 102699.
- [19] GAO F, LI P, YIN Y, et al. Molecular breeding of livestock for disease resistance[J]. *Virology*, 2023, 587: 109862.
- [20] SOLER-NAVARRO D J, TENZA-PERAL A, JANSSEN M A, et al. Environmental strategies increase the resilience of extensive livestock systems to adverse climate conditions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 388: 126004.
- [21] BELL M J. Breeding a sustainable future for milk production [J]. *NPJ Sustainable Agriculture*, 2024, 2: 18.
- [22] XU R, CHEN J W, YAN N N, et al. High-value utilization of agricultural residues based on component characteristics: potentiality and challenges[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2025, 10(3): 271-294.
- [23] SUDHEER S, BAI R G, USMANI Z, et al. Insights on engineered microbes in sustainable agriculture: biotechnological developments and future prospects[J]. *Current Genomics*, 2020, 21(5): 321-333.
- [24] MAT JALALUDDIN N S, OTHMAN R Y, HARIKRISHNA J A. Global trends in research and commercialization of exogenous and endogenous RNAi technologies for crops[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019, 39(1): 67-78.
- [25] CHEMLA Y, SWEENEY C J, WOZNIAK C A, et al. Design and regulation of engineered bacteria for environmental release [J]. *Nature Microbiology*, 2025, 10(2): 281-300.
- [26] WURTZEL E T, VICKERS C E, HANSON A D, et al. Revolutionizing agriculture with synthetic biology[J]. *Nature Plants*, 2019, 5(12): 1207-1210.
- [27] SHARMA K, SHIVANDU S K. Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture[J]. *Sensors International*, 2024, 5: 100292.
- [28] LI B S, SUN C, LI J Y, et al. Targeted genome-modification tools and their advanced applications in crop breeding[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2024, 25(9): 603-622.
- [29] Synthetic Biology Engineering Research Center (SynBERC). Award abstract #0540879[EB/OL]. (2006-07-14)[2025-08-28]. https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=0540879.
- [30] Policy challenges of accelerating technological change: security policy and strategy implications of parallel scientific revolutions[EB/OL]. (2014-09-01) [2025-06-09]. <https://digitalcommons.ndu.edu/defense-tech-papers/3/>.
- [31] 美国国家科学院研究理事会. 生物工业化路线图: 加速化学品的先进制造[M]. 陈方, 丁陈君, 刘斌, 译. 北京: 科学出版社, 2017.
- United States National Research Council. Industrialization of biology: a roadmap to accelerate the advanced manufacturing of chemicals[M]. CHEN F, DING C J, LIU B, translated. Beijing: Science Press, 2017.
- [32] USDA. Establishing the national bioengineered food disclosure standard[EB/OL]. (2018-12-20) [2025-06-15]. <https://www.usda.gov/about-usda/news/press-releases/2018/12/20/establishing-national-bioengineered-food-disclosure-standard>.
- [33] USDA. Plant genetic resources, genomics and genetic improvement[EB/OL]. (2024-04-11) [2025-06-15]. <https://www.ars.usda.gov/crop-production-and-protection/plant-genetic-resources-genomics-and-genetic-improvement/>.
- [34] SERVIVK K. Trump's agriculture department reverses course on biotech rules [N/OL]. (2017-11-06) [2025-06-16]. <https://www.science.org/content/article/trump-s-agriculture-department-reverses-course-biotech-rules>.
- [35] EBRC. Engineering Biology (2019) A research roadmap for the next-generation bioeconomy [EB/OL]. (2019-06-01)[2025-08-28]. <https://roadmap.ebrc.org/2019roadmap/>.
- [36] OSTP. FACT SHEET: Biden-Harris administration announces new bold goals and priorities to advance American biotechnology and biomanufacturing [EB/OL]. (2023-03-22) [2025-05-15]. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/ostp/news-updates/2023/03/22/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-new-bold-goals-and-priorities-to-advance-american-biotechnology-and-biomanufacturing/>.
- [37] U. S. Senate. Synthetic biology advancement act of 2024[EB/OL]. (2024-05-23)[2025-06-17]. <https://www.govinfo.gov/app/details/BILLS-118s4413is>.
- [38] NSCEB. Charting the future of biotechnology [EB/OL]. (2025-04-10) [2025-06-20]. <https://www.biotech.senate.gov/final-report/chapters/>.
- [39] USDA. National program 301: plant genetic resources, genomics and genetic improvement[EB/OL]. [2025-05-09]. [https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/np301/NP%20301%20Action%20Plan%](https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/np301/NP%20301%20Action%20Plan%20)

- 202018-2022%20FINAL.pdf.
- [40] Executive order on advancing biotechnology and biomanufacturing innovation for a sustainable, safe, and secure American bioeconomy [EB/OL]. (2022-09-12) [2025-06-07]. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/09/12/executive-order-on-advancing-biotechnology-and-biomanufacturing-innovation-for-a-sustainable-safe-and-secure-american-bioeconomy/>.
- [41] EBRC. Engineering biology: a research roadmap for the next-generation bioeconomy[EB/OL]. (2019-06) [2025-06-09]. <https://roadmap.ebrc.org>.
- [42] 118th Congress. S.4413 - Synthetic biology advancement act of 2024 [EB/OL]. (2024-05-23) [2025-06-11]. <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/4413>.
- [43] CALLAWAY E. CRISPR plants now subject to tough GM laws in European Union[J]. *Nature*, 2018, 560(7716): 16.
- [44] Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council of 12 March 2001 on the deliberate release into the environment of genetically modified organisms and repealing Council Directive 90/220/EEC[J]. *Official Journal of the European Communities*, 2001, 44(106): 1-39.
- [45] Regulation (EC) No 1829/2003 on genetically modified food and feed[J]. *Official Journal of the European Union*, 2023, 46(268): 1-23.
- [46] 2007: Landmark European publication behind ‘Knowledge Based Bioeconomy’ in Europe[EB/OL]. (2021-06-18) [2025-04-10]. <https://www.europabio.org/timeline/2007-landmark-european-publication-behind-knowledge-based-bioeconomy-in-europe/>.
- [47] The knowledge based bio-economy (KBBE) in europe: achievements and challenges[EB/OL]. (2010-09-14) [2025-05-15]. <https://www.vlaanderen.be/publicaties/the-knowledge-based-bio-economy-kbbe-in-europe-achievements-and-challenges>.
- [48] ERASynBio. Next steps for European synthetic biology: a strategic vision from ERASynBio [EB/OL]. [2025-04-20]. https://haseloff.plantsci.cam.ac.uk/resources/SynBio_reports/erasynbiostrategicvision.pdf.
- [49] Horizon 2020: the EU’s research and innovation programme (2014-20) [EB/OL]. [2025-06-17]. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/horizon-2020-the-eu-s-research-and-innovation-programme-2014-20.html>.
- [50] A sustainable bioeconomy for Europe-strengthening the connection between economy, society and the environment: updated bioeconomy strategy[EB/OL]. (2018-10-12)[2025-06-15]. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/sustainable-bioeconomy-europe-strengthening-connection-between-economy-society_en.
- [51] Farm to fork strategy: for a fair, healthy and environmentally-friendly food system[EB/OL]. [2025-06-25]. https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en.
- [52] Current and future market applications of new genomic techniques[EB/OL]. (2021-05-05) [2025-06-17]. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/visualisation/new-genomic-techniques_en.
- [53] “Horizon Europe” research programme [EB/OL]. [2025-05-06]. <https://www.eese-hormones.org/what-we-do/research/european-research-funding/funding-programmes/horizon-europe/horizon-europe-programme-overview/>
- [54] EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), MULLINS E, BRESSON J L, et al. Evaluation of existing guidelines for their adequacy for the food and feed risk assessment of genetically modified plants obtained through synthetic biology[J]. *EFSA Journal*, 2022, 20(7): e07410.
- [55] New techniques in biotechnology [EB/OL]. (2023-07-05) [2025-08-01]. https://food.ec.europa.eu/plants/genetically-modified-organisms/new-techniques-biotechnology_en.
- [56] Building the future with nature: boosting biotechnology and biomanufacturing in the EU[EB/OL]. (2023-03-27) [2025-06-18]. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/47554adc-dffc-411b-8cd6-b52417514cb3_en.
- [57] BEIS. Growing the bioeconomy improving lives and strengthening our economy: a national bioeconomy strategy to 2030 [EB/OL]. (2018-12-05) [2025-06-22]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1037343/181205_BEIS_Growing_the_Bioeconomy_Web_SP_pdf.
- [58] UKRI. Overview of the proposed national engineering biology programme[EB/OL]. (2025-05-10) [2025-06-22]. <https://www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/07/BBSRC-010721-Funding-Opp-DevelopingEngineeringBiologyBreakthroughIdeas-Overview.pdf>.
- [59] DSIT. National vision for engineering biology [EB/OL]. (2023-12-05) [2025-06-21]. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/656de8030f12ef07a53e01ac/national_vision_for_engineering_biology.pdf.
- [60] CSIRO. A national syntheticbiology roadmap: identifying commercial and economicopportunities for Australia[EB/OL]. (2021-08) [2025-06-21]. <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Future-Industries/Synthetic-Biology-Roadmap>.

- [61] CSIRO. Synthetic biology national progress report[EB/OL]. (2024-02)[2025-06-21]. <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Future-Industries/Synthetic-Biology-Roadmap>.
- [62] National Engineering Biology Steering Committee. Engineering biology: a platform technology to fuel multi-sector economic recovery and modernize biomanufacturing in Canada[EB/OL]. (2020-11) [2025-05-15]. https://www.ontariogenomics.ca/wp-content/uploads/2023/10/WhitePaper_EngineeringBiology_2020.pdf.
- [63] Government of Canada. Notice to industry-implementation for health Canada's new guidance for novel food regulations focused on plant breeding [EB/OL]. (2022-05-18) [2025-06-15]. <https://inspection.canada.ca/en/food-labels/labelling/2022-05-18>.
- [64] Government of Canada. Canadian genomics strategy [EB/OL]. (2025-02-06) [2025-06-10]. <https://ised-isde.canada.ca/site/genomics/en/canadian-genomics-strategy>.
- [65] 农业农村部科教司. 加拿大发布修订后的种子法规指南以支持基因编辑种子引入市场[EB/OL]. (2023-09-25)[2025-06-10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/ckzl/202309/t20230925_6437177.htm.
Department of Science, Technology and Education, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Canada issues revised seed regulations guideline to support market introduction of gene-edited seeds[EB/OL]. (2023-09-25) [2025-06-10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/ckzl/202309/t20230925_6437177.htm.
- [66] CFIA. Chapter 2 - Data requirements for single ingredient approval and feed registration [EB/OL]. (2024-05-13)[2025-06-22]. <https://inspection.canada.ca/en/animal-health/livestock-feeds/regulatory-guidance/rg-1/chapter-2>.
- [67] 科技部. 科技部关于印发《“十三五”生物技术创新专项规划》的通知[EB/OL]. (2017-05-10) [2025-06-12]. https://most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2017/201705/t20170517_132857.html.
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Issuance notice of the “13th Five-Year” specialized plan for biotechnology innovation by the Ministry of Science and Technology[EB/OL]. (2017-05-10) [2025-06-12]. https://most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2017/201705/t20170517_132857.html.
- [68] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发《“十四五”生物经济发展规划》的通知[EB/OL]. (2021-12-20)[2025-06-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content_5689556.htm.
National Development and Reform Commission. Issuance notice of the “14th Five-Year” bioeconomy development plan by the National Development and Reform Commission [EB/OL]. (2021-12-20) [2025-06-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content_5689556.htm.
- [69] 中国技术市场协会. 合成生物第一部分:农业合成生物技术的创新与应用[S/OL]. (2024-12-30)[2025-06-12]. www.ctm.org.cn/upload/zgjsscsh/file/20250102/1735832708509228.pdf.
Technology Market Association of China. Synthetic biology part I : innovation and application of agricultural synthetic biology technology[S/OL]. (2024-12-30)[2025-06-12]. www.ctm.org.cn/upload/zgjsscsh/file/20250102/1735832708509228.pdf.
- [70] Benson Hill. Tag: CropOS-Benson Hill expands innovation pipeline with advantaged traits for animal feed, soybean oil, and biofuel segments [EB/OL]. (2024-07-16) [2025-06-21]. <https://bensonhill.com/tag/cropos/>.
- [71] Cibus-The Future of Breeding. Our technology[EB/OL]. (2025-06-21) [2025-06-23]. <https://www.cibus.com/our-technology.php>.
- [72] Olive Oil Times. Gene-edited soybean oil touted as Non-GMO [EB/OL]. (2019-03-12) [2025-06-21]. <https://www.oliveoiltimes.com/business/gene-edited-soybean-oil-touted-as-non-gmo/67263>.
- [73] Non-GMO plant transformation[EB/OL]. [2025-06-21]. <https://www.gflas.com/en/crispr/noneGMO.php>.
- [74] ISAAA Inc. Gene-edited rice may grow in the ocean [EB/OL]. (2023-09-13) [2025-06-21]. <https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/ged/article/default.asp>ID=20412>.
- [75] Pivot Bio. Pivot Bio PROVEN® 40 [EB/OL]. [2025-06-21]. <https://www.pivotbio.com/product-proven40-corn>.
- [76] AgBiome and Genective collaborate to create novel insect-resistant crops[EB/OL]. (2015-07-01) [2025-06-21]. <https://www.biospace.com/b-agbiome-b-and-b-genective-b-collaborate-to-create-novel-insect-resistant-crops>.
- [77] GreenLight Biosciences. RNA Biocontrol & platform [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.greenlightbiosciences.com/platform>.
- [78] Oxitec. Oxitec's Friendly™ mosquito technology receives U.S. EPA approval for pilot projects in U.S.[EB/OL]. (2020-05-01) [2025-06-22]. <https://www.oxitec.com/en/news/oxitecs-friendly-mosquito-technology-receives-us-epa-approval-for-pilot-projects-in-us>.
- [79] 刘晓, 毛开云, 熊霞, 等. 合成生物学在未来食品领域的发展趋势与展望[J]. 生命科学, 2025, 37(1): 77-85.
LIU X, MAO K Y, XIONG X, et al. Development trends and

- prospects in synthetic biology for future food[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2025, 37(1): 77-85.
- [80] The Better Meat Co. receives GRAS no questions letter from FDA for Rhiza mycoprotein[EB/OL]. (2024-07-11) [2025-07-23]. <https://agfundernews.com/the-better-meat-co-receives-gras-no-questions-letter-from-fda-for-rhiza-mycoprotein>.
- [81] Apeel. Product Information[EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.apeel.com/product-information>.
- [82] Nature's Fynd. Frequently asked questions—What is Fy™? [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.naturesfynd.com/faq#collapsible-panel-152400>.
- [83] Agrivida. What's in it? [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://agrivida.com/>.
- [84] Calysta. FeedKind® is a family of feed ingredients for use across aquaculture and livestock species[EB/OL]. [2025-06-22]. <https://calysta.com/fish-and-livestock/>.
- [85] Qi Biodesign. Qi-biodesign has been granted a safety certificate for gene-edited high-yield wheat resistant to powdery mildew [EB/OL]. [2025-06-22]. <http://www.qi-biodesign.com/#/newsDetail?id=17>.
- [86] Qi Biodesign. Qi-biodesign's high oleic acid soybeans have been granted an exemption by the USDA [EB/OL]. [2025-06-22]. <http://www.qi-biodesign.com/#/newsDetail?id=16>.
- [87] 隆平高科. 科研体系[EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.lpht.com.cn/leader.html#page3>.
Yuan Long Ping High-Tech Agriculture Co., Ltd. Scientific research system [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.lpht.com.cn/leader.html#page3>.
- [88] 舜丰生物. 成果介绍[EB/OL]. [2025-06-22]. <http://bellagen.cn/index.php?catid=39>.
BellaGen. Achievements introduction [EB/OL]. [2025-06-22]. <http://bellagen.cn/index.php?catid=39>.
- [89] 蓝晶微生物与大北农集团签署合作[EB/OL]. (2024-08-06) [2025-06-22]. <https://zshq.zuiyouliao.com/zixun/detail-ac28cdfd19ad4800ba12a37c813cb7ea.html>.
Bluepha and Dabeinong Group signed cooperation agreement [EB/OL]. (2024-08-06) [2025-06-22]. <https://zshq.zuiyouliao.com/zixun/detail-ac28cdfd19ad4800ba12a37c813cb7ea.html>.
- [90] 中国农业科学院深圳农业基因组研究所. 企业孵化[EB/OL]. [2025-06-22]. <https://agis.caas.cn/cy fz/qyfh/index.htm>.
Shenzhen Agricultural Genomics Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Enterprise incubation[EB/OL]. [2025-06-22]. <https://agis.caas.cn/cy fz/qyfh/index.htm>.
- [91] 慕恩生物. 生物制剂的先行者 - 植物微生物组 [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.moonbio.com/bioAg>.
MoonBiotech. Pioneer in biological agents - plant microbiome [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.moonbio.com/bioAg>.
- [92] 昌进生物. 人类需要优质蛋白,只能依托于传统的动、植物吗?[EB/OL]. [2025-06-22]. <http://chgbio.com/>.
Changing Bio. Does humanity need high-quality protein only from traditional animal and plant sources?[EB/OL]. [2025-06-22]. <http://chgbio.com/>.
- [93] 芝诺科技. 核心研究 [EB/OL]. [2025-06-22]. <http://www.zenobiotech.cn/sy>.
Beijing Zhinuo Technology Development Co., Ltd. Core research [EB/OL]. [2025-06-22]. <http://www.zenobiotech.cn/sy>.
- [94] 首钢朗泽. 技术竞争优势 [N/OL]. [2025-08-22]. http://www.beijingreview.com.cn/caijing/hyzz/202507/t20250716_800408499.html.
Shougang LangzeTech. Technological competitive advantages [N/OL]. [2025-08-22]. http://www.beijingreview.com.cn/caijing/hyzz/202507/t20250716_800408499.html.
- [95] 引航生物. 25-羟基维生素 D₃ 聚焦原料竞争力 [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.leadsynbio.com/qjwssd3.html>.
Leadsynbio. 25-Hydroxy vitamin D₃: emphasizing raw material competitiveness[EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.leadsynbio.com/qjwssd3.html>.
- [96] 德默特. 实现海洋硅藻多管线联产[EB/OL]. [2025-06-22]. <http://dmtbiotech.com/info/8.html>.
DMT Biotech. Achieving multi-pipeline co-production of marine diatoms[EB/OL]. [2025-06-22]. <http://dmtbiotech.com/info/8.html>.
- [97] 百斯杰. 动物营养与健康 [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.bestzyme.com.cn/Home/application?typeId=3>.
Bestzyme. Animal nutrition and health[EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.bestzyme.com.cn/Home/application?typeId=3>.
- [98] 利民控股. 合作开发噬菌体生物农药——合成生物战略落地的又一举措 [EB/OL]. (2024-10-21) [2025-06-22]. https://www.chinalimin.com/new_detail/id/2169.html.
Limin Group. Collaborative development of bacteriophage biopesticides—another step in implementing the synthetic biology strategy [EB/OL]. (2024-10-21) [2025-06-22]. https://www.chinalimin.com/new_detail/id/2169.html.
- [99] 富邦科技. 产品展示-微生物菌剂 [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.forbon.com/Product/20.html>.
Forbon Technology. Product showcase-microbial inoculants [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.forbon.com/Product/20.html>.
- [100] 富邦科技. 产品展示-作物营养 [EB/OL]. [2025-06-22]. https://www.forbon.com/Product/6.html#c_static_001-1705631908362.
Forbon Technology. Product showcase-crop nutrition[EB/OL].

- [2025-06-22]. https://www.forbon.com/Product/6.html#_static_001-1705631908362.
- [101] 微构工场. PHAbrary 精准定制、AI 协同的应用解决方案 [EB/OL]. [2025-06-22]. https://www.phabuilder.com/PHAbrary_Compound#page106.
Phabuilder. PHAbrary: precisely customized and AI-coordinated application solutions [EB/OL]. [2025-06-22]. https://www.phabuilder.com/PHAbrary_Compound#page106.
- [102] 蔚蓝生物. 饲料酶 [EB/OL]. [2025-06-22]. <http://vlandgroup.com/about/38.html>.
Qingdao Vland Biotech INC. Feed enzymes [EB/OL]. [2025-06-22]. <http://vlandgroup.com/about/38.html>.
- [103] 播恩集团. 向微生物要蛋白:播恩两大生物饲料新品齐发,力求降本、增效出众 [EB/OL]. (2022-04-11)[2025-06-22]. <http://www.bo-en.com/?p=2901>.
Boen Group. Obtain protein from microorganisms: Boen launches two new biofeed products, aiming for significant cost reduction and efficiency improvement [EB/OL]. (2022-04-11) [2025-06-22]. <http://www.bo-en.com/?p=2901>.
- [104] 绿氮生物. DME 技术与产品 [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.agreenbio.com/DME-TP/>.
AGreenBio. DME technology and products [EB/OL]. [2025-06-22]. <https://www.agreenbio.com/DME-TP/>.
- [105] 元一生物. 元一生物与大北农集团签署战略合作协议 [EB/OL]. (2023-12-07) [2025-06-22]. <https://www.yuanyibio.com/news/42.html>
Ueny. Ueny and Dabeinong Group signed Strategic

Cooperation Agreement [EB/OL]. (2023-12-07) [2025-06-22]. <https://www.yuanyibio.com/news/42.html>



通讯作者: 熊燕(1967—),女,博士,研究员。研究方向为合成生物学领域的战略研究。

E-mail: yxiong@sinh.ac.cn



共同通讯作者: 陈大明(1982—),男,硕士,研究员。研究方向为生命科学及其交叉学科的科技情报研究。

E-mail: chendaming@sinh.ac.cn



第一作者: 张学博(1983—),女,博士,馆员。研究方向为生命科学与生物技术领域的科技情报研究。

E-mail: xbzhang@sinh.ac.cn