

生物科学技术与合成生物学融合发展的现状、挑战及未来趋势探析

李东洲 张绮平

东莞市和活源生物科技有限公司 广东东莞 523000

摘要：生物科学技术与合成生物学的融合是现代生物技术发展的重要方向，二者的交叉推动了生命科学研究范式的转变，在医药、能源、环境等领域展现出广阔应用前景。当前融合发展已取得阶段性成果，但面临技术伦理边界模糊、底层技术瓶颈、产业化转化困难等挑战。本文梳理二者融合发展的现状，剖析关键挑战，结合技术演进逻辑展望未来趋势，为推动融合发展的规范化、高效化提供理论参考。

关键词：生物科学技术；合成生物学；融合发展；技术演进趋势

引言

生物科学技术聚焦于对生命现象的认知与解析，合成生物学则强调从工程化视角改造、设计生命体，二者的融合打破了传统生命科学研究边界。随着基因编辑、代谢工程等技术的进步，融合发展正从实验室研究逐步走向产业应用，但同时也带来了技术风险、伦理争议等新问题。深入探讨二者融合的现状与挑战，明确未来发展方向，对于引导技术正向应用、推动生物技术产业升级具有重要意义。

一、生物科学技术与合成生物学融合的核心逻辑

（一）认知逻辑：从解析生命到设计生命的研究范式延伸

生物科学技术的核心是通过观测与实验，拆解生命系统的组成结构与运行规则，实现对生命现象的深度认知。这种研究范式以还原论为基础，聚焦对现有生命形式的解读，回答生命“是什么”的问题。合成生物学依托这种认知成果，将生命系统视作可编辑的模块化结构，通过人工干预构建新的生命体系，探索生命“可以是什么”的可能性^[1]。二者的融合推动研究视角从被动解析转向主动构建，延展了生命科学研究边界。

认知逻辑的延伸重塑了生命科学研究目标。传统生物科学以揭示生命本质为核心，合成生物学则将认知转化为改造生命的实践能力。融合过程中，对生命运行规则的解析成果成为人工设计的底层依据，而人工构建的生命系统又反向验证并补充对生命规律的认识，形成从解析到设计的双向循环，让生命科学研究跳出对现有生命的解读，进入主动创造生命形态的新领域。

（二）技术逻辑：基础研究工具与工程化方法的相互支撑

生物科学技术长期积累的观测、测序与分析工具，为合成生物学提供了精准解析生物分子结构与功能的手段，帮助合成生物学完成对生命组件的精准识别与特性验证。这些工具能够捕捉基因表达、蛋白质互作等微观过程，为人工组件的筛选与设计提供数据支撑，让合成生物学的工程化操作建立在精准认知的基础上。

合成生物学的工程化方法反向推动生物科学技术工具的迭代升级。工程化对精准度、效率的需求，促使生物科学技术开发更高通量的测序设备、更精准的基因编辑工具，以适配人工合成生命组件的大规模筛选与编辑。二者的技术优势相互渗透，基础工具提升工程化操作的精准性，工程方法倒逼工具性能优化，形成技术迭代的正向循环，为融合发展提供了技术底座。

（三）应用逻辑：从单一功能实现到系统解决方案的升级

传统生物科学技术的应用多聚焦单一生物功能的开发，通过调控特定基因或蛋白质实现目标功能，应用场景局限于单一环节的需求满足。合成生物学通过模块化组装与系统设计，将分散的生物功能整合为协同运行的人工生命系统，能够针对复杂需求提供综合性解决方案，突破单一功能应用的场景限制。

应用逻辑的升级拓展了生命科学技术的产业价值。融合后的技术体系不再局限于解决单点问题，而是能够构建完整的生物合成路径，为医药、农业、环保等领域提供系统性方案。例如通过构建人工代谢通路实现目标产物的可持续合成，替代传统化学合成路径。

二、二者融合发展的现状特征

(一) 交叉研究深化：在基因回路设计、人工代谢途径构建等领域突破

生物科学技术提供的基因测序、蛋白质结构解析能力，让合成生物学精准获取基因元件的功能特性，为基因回路的模块化设计提供数据基础。研究人员依托这些数据，将不同功能的基因元件按逻辑关系组装，构建出可响应特定信号的基因调控网络，实现对细胞行为的精准控制。

交叉研究的突破体现在技术精度与复杂度的同步提升。早期基因回路仅能实现简单的开关功能，依托生物科学技术对基因互作机制的深度解析，当前已能构建包含多层信号反馈的复杂回路，模拟天然生命系统的调控逻辑。人工代谢途径从单一反应步骤拓展为多步骤串联的完整通路，实现从基础底物到目标产物的定向转化，交叉研究逐步从简单元件组装转向复杂生命系统的人工构建。

(二) 应用场景拓展：覆盖医药合成、生物能源生产等多个领域

医药合成领域，二者融合实现了天然活性成分的人工合成。生物科学技术解析天然产物合成通路的关键酶与调控机制，合成生物学在此基础上重构代谢途径，在微生物底盘细胞中异源表达合成通路，实现活性成分的规模化生产，降低依赖天然提取的成本与资源消耗^[2]。生物能源生产中，融合技术改造微生物代谢通路，提升糖类物质向生物燃料的转化效率，为可再生能源开发提供新路径。

应用场景的拓展从实验室走向产业化落地。早期融合技术的应用停留在实验室验证阶段，随着技术成熟度提升，部分成果进入中试与规模化生产环节。医药领域的人工合成活性成分已实现批量生产，生物能源项目进入商业化运营阶段，融合技术逐步从科研成果转化为产业生产力，覆盖的领域从前期的基础科研延伸至实体经济的多个板块。

(三) 学科边界消融：催生合成生物医学、合成生物能源等交叉学科方向

生物医学与合成生物学融合形成合成生物医学，将工程化设计思路引入疾病诊疗。生物科学技术对疾病分子机制的解析成果，成为合成生物医学设计诊疗工具的依据，通过构建人工基因回路实现对疾病相关基因的精准调控，为遗传病、癌症等疾病提供新型治疗方案。合成生物能源则结合生物能源技术与合成生物学方法，针对能源生产需求改造微生物与代谢通路，提升能源转化效率与可持续性。

学科边界消融推动研究团队的跨领域协作。传统生物医学团队聚焦疾病机理研究，合成生物学团队擅长工程化设计，融合过程中两类团队逐步形成固定协作模式，共享技术工具与研究思路。新的交叉学科方向不再局限于单一学科的理论框架，而是整合多学科的方法与目标，形成独立的研究范式与人才培养体系，推动生命科学领域的学科结构重构^[3]。

三、融合发展面临的关键挑战

(一) 技术瓶颈：生命体系统复杂性导致设计与调控精度不足

天然生命体存在大量未知的互作关系，生物科学技术仅能解析部分核心调控机制，难以覆盖全部微观互作网络。合成生物学进行人工设计时，往往基于已知的简化模型，忽略潜在的隐性互作，导致人工构建的系统在运行中出现不可预测的偏差，无法完全按照预设逻辑实现功能。即使是经过精准设计的基因回路，在复杂的细胞内环境中也可能因未知的信号干扰，出现表达效率波动或功能失效的情况。

生命体的动态适应性进一步加剧设计与调控的难度。人工构建的系统植入细胞后，细胞会启动天然的应激与调控机制，对人工元件进行修饰或抑制，削弱人工系统的功能稳定性。当前技术手段无法完全预测细胞的适应性变化，也难以构建能够对抗这种天然调控的人工系统，导致人工生命体的运行状态无法长期保持预设精度，限制了融合技术在复杂场景下的应用。

(二) 伦理风险：人工改造生命体可能引发生态与社会伦理问题

人工改造的生命体若进入自然环境，可能凭借人工赋予的代谢优势抢占生态位，挤压天然物种的生存空间，打破原有生态平衡。现有监测与控制技术难以完全追踪人工生命体在环境中的扩散路径与演化趋势，一旦出现不可控的变异，可能引发难以逆转的生态破坏。

社会层面的伦理争议聚焦人工改造生命的边界问题。对人类基因进行人工编辑的研究突破，引发关于“定制生命”的伦理讨论，若技术应用超出疾病治疗范畴，可能改变人类基因库的自然演化进程，引发社会公平与人类身份认同的争议。公众对人工生命体的认知存在信息差，部分研究成果的应用可能引发公众对生命安全的担忧，影响社会对融合技术的接受度。

(三) 转化障碍：实验室成果向产业应用的落地成本高、周期长

实验室研究多采用标准化的模式生物进行验证，而产业应用需要适配低成本、高稳定性的工业微生物底盘。

从模式生物到工业底盘的转化，需要重新进行元件适配与系统优化，过程涉及大量的筛选与测试工作，时间成本与资金投入远超实验室阶段。

产业配套体系的不完善加剧转化障碍。融合技术的产业化需要专门的发酵设备、分离纯化工艺与质量控制体系，现有传统生物产业的配套设施难以完全适配人工生命体的生产需求，需要投入资金改造或新建生产线。部分领域缺乏针对人工生命体产品的质量检测标准与监管规范，产品上市前的审批流程复杂，进一步抬高了转化的时间与资金门槛，导致大量实验室成果难以走出实验室实现规模化应用。

四、融合发展的未来趋势

(一) 技术升级：精准基因编辑与智能生物设计工具的迭代

基因编辑技术将向更高精度与更广适用范围升级。现有编辑工具存在脱靶风险，未来技术通过优化靶向识别机制，实现对特定基因序列的零脱靶编辑，同时拓展可编辑基因的类型，覆盖非编码区基因与复杂结构的基因组区域。编辑效率持续提升，从单次编辑单个位点升级为多位点同步编辑，缩短复杂生命体系统的构建周期。

智能生物设计工具将依托生物大数据实现自动化设计。生物科学技术积累的基因功能、代谢通路、蛋白质互作等数据，将整合入智能设计平台，平台通过算法解析生命系统的运行规律，自动生成人工元件组合与系统设计方案。设计方案将结合模拟仿真技术，提前预测人工系统在不同环境下的运行状态，减少后续实验验证的次数，让复杂生命体的设计从经验驱动转向数据与算法驱动^[4]。

(二) 应用聚焦：面向碳中和、疾病治疗等重大需求的定向突破

碳中和领域，融合技术将聚焦碳循环调控。通过构建人工光合系统，模拟天然光合作用的核心机制，提升二氧化碳固定效率，将大气中的二氧化碳转化为可利用的有机物质，减少工业碳排放。改造微生物的代谢通路，使其能够利用二氧化碳合成生物塑料、生物燃料等产品，实现碳排放的资源化利用，推动工业生产向低能耗、低排放模式转型。

疾病治疗领域，定向突破将集中于难治性疾病的新疗法。针对遗传病，利用精准基因编辑技术修复致病基因，实现一次性治愈；针对癌症，设计可识别肿瘤细胞的人工基因回路，在体内精准识别并杀伤肿瘤细胞，降低治疗对正常组织的损伤。治疗方案将从单一基因调控升级为多基因协同调控，模拟天然生命系统的复杂调控逻辑，提升治疗效果的稳定性与持久性。

(三) 治理完善：技术伦理规范与监管体系的协同建立

技术伦理规范将覆盖融合发展的全流程。针对实验室研究阶段，制定人工生命体的设计边界，明确禁止可能引发生态与社会风险的研究方向；针对产业化应用阶段，建立人工生命体产品的安全评估标准，明确生产、运输、使用各环节的风险控制要求。伦理规范将结合公众参与机制，定期收集社会对技术应用的反馈，动态调整规范内容，让伦理要求贴合社会认知与需求^[5]。

监管体系将实现跨部门协同覆盖。整合生物安全、产业监管、环境监测等多个部门的监管职能，建立统一的融合技术监管平台，对人工生命体的研发、生产、应用全流程进行动态追踪。监管技术同步升级，利用基因测序、大数据分析等手段，实时监测人工生命体的环境扩散与演化情况，及时发现并处置潜在风险，形成从研发到落地的全链条监管网络，保障融合技术的健康发展。

结语

生物科学技术与合成生物学的融合是生命科学领域的重要变革方向，既为解决人类面临的医药、能源、环境等问题提供了新路径，也对技术治理与伦理监管提出了更高要求。当前融合发展处于从基础研究向产业应用过渡的关键阶段，技术精度、伦理边界与转化效率仍是制约其发展的核心问题。未来，随着技术工具的持续迭代、应用场景的精准聚焦以及治理体系的不断完善，二者的融合将朝着更可控、更高效的方向发展，为生命科学进步与社会发展创造更大价值，推动生物技术产业进入全新发展阶段。

参考文献

- [1] 武志强, 戴俊彪, 林敏, 等. 以合成生物学创新, 赋能未来农业发展[J]. 合成生物学, 2025, 6(05): 987-991.
- [2] 刘龙, 路福平, 陈坚. 合成生物学与未来食品[J]. 生物技术通报, 2025, 41(11): 1-3.
- [3] 王陶靖, 侯文军. 德育引领下生物科学专业人才培养创新能力培养模式研究[J]. 大学教育, 2025, (16): 152-157.
- [4] 周海, 刘振兰, 朱丽雅. 高等农林院校生物科学和生物技术本科专业《基因工程》课程思政改革探索[J]. 绿洲农业科学与工程, 2025, 10(03): 163-168.
- [5] 郭春燕, 武玉珍. 应用型本科院校生物科学专业交叉学科人才培养模式探索[J]. 高教学刊, 2025, 11(26): 165-168.