

· 序 言 ·

王钦宏 研究员，博士生导师。2003 年在中国科学院微生物研究所获博士学位，2004–2009 年先后在美国奥克拉荷马大学和加州理工学院从事博士后研究，2009 年至今在中国科学院天津工业生物技术研究所工作。主要从事工业生物进化与代谢工程研究。设计构建了系列微生物细胞工厂，研制了多套液滴微流控微生物高通量操作与筛选系统，推进生物制造产业应用，相关成果入选国家“十三五”科技创新成就展以及 2021 年度中国科学十大进展等。在 *Science*、*Biotechnology Advances*、*Trends in Biotechnology*、*Metabolic Engineering* 等期刊发表论文 160 余篇，申请专利 80 余项，获授权专利 50 余项。曾任中国科学院天津工业生物技术研究所副所长，现任天津市青年科技工作者协会常务副会长、《生物工程学报》副主编及 *mLife*、《合成生物学》《微生物学报》等学术期刊编委。获得国务院政府特殊津贴、天津市五一劳动奖章获得者等荣誉。



马红武 研究员，博士生导师。2001 年毕业于天津大学化工学院，获生物化工博士学位，曾先后在德国生物技术研究中心(GBF)和英国爱丁堡大学信息学院从事研究工作。现任中国科学院天津工业生物技术研究所生物设计中心主任。主要研究方向包括代谢网络分析和途径设计、代谢工程及合成生物学、计算生物学软件工具开发、人工智能生物功能预测和设计等，发表 SCI 论文 100 余篇，引用 5 000 余次。曾获科睿唯安“全球高被引科学家奖”和天津市自然科学奖特等奖。



夏建业 研究员，博士生导师。中国微生物学会生化过程模型化与控制专委会副主任委员，现任中国科学院天津工业生物技术研究所智能生物制造中试平台主任。2008 年博士毕业于华东理工大学，师从张嗣良教授。提出基于反应器流场和细胞生理相结合的发酵过程优化放大方法，在国内多家生物制造企业获得成功应用。曾获国家科技进步奖二等奖 1 项、上海市科技进步奖一等奖 1 项、中国轻工业联合会科技进步奖二等奖 1 项。在 *Cell*、*Nature Communications*、*Biotechnology and Bioengineering*、*Trends in Biotechnology* 等期刊发表研究论文 30 余篇，授权专利 5 项。



AI 驱动生物制造专刊序言

王钦宏^{1,2*}，马红武^{1,2*}，夏建业^{1,2*}

1 中国科学院天津工业生物技术研究所 低碳合成工程生物学全国重点实验室，天津 300308

2 国家合成生物技术创新中心，天津 300308

*Corresponding authors. E-mail: WANG Qinrong, wang_qh@tib.cas.cn; MA Hongwu, ma_hw@tib.cas.cn; XIA Jianye, xiajy@tib.cas.cn
Received: 2025-03-06

王钦宏, 马红武, 夏建业. AI 驱动生物制造专刊序言[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): I-VIII.

WANG Qinhong, MA Hongwu, XIA Jianye. Preface for special issue on AI-driven biomanufacturing[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): I-VIII.

摘要: 生物制造是可持续发展重大战略方向, 我国高度重视生物制造产业的发展, 国家和地方相继出台生物制造专项政策, 大力发展生物制造已成不可阻挡之势。当前, 随着系统生物学、合成生物学的不断发展, 生物大数据、信息技术正快速与生物技术融合, 为生物体系设计、创制及应用提供新理论、新方法、新技术, 推动生物制造发展进入人工智能驱动时代。为了把握 AI 驱动生物制造创新发展脉络, 本刊特组织出版专刊, 邀请国内多家单位的专家学者, 分别从 AI 驱动底层技术、生物元器件智能设计合成、人工细胞智能设计再造和智能生物过程控制优化 4 个方面阐述 AI 驱动生物制造的机遇和挑战、发展现状, 展望未来的发展趋势, 为更好推动生物制造领域的技术创新和产业发展提供参考。

关键词: 人工智能; 大数据; 合成生物学; 生物制造; 可持续发展

Preface for special issue on AI-driven biomanufacturing

WANG Qinhong^{1,2*}, MA Hongwu^{1,2*}, XIA Jianye^{1,2*}

1 State Key Laboratory of Engineering Biology for Low-Carbon Manufacturing, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China

2 National Center of Technology Innovation for Synthetic Biology, Tianjin 300308, China

Abstract: Biomanufacturing is one of important strategies for sustainable development, China places significant emphasis on the development of biomanufacturing, and the national and local governments have successively introduced special policies for biomanufacturing, and vigorously developing biomanufacturing has become an unstoppable trend. At present, with the rapid development of systems biology and synthetic biology, biological big data and information technology are deeply integrating with biotechnology. Novel theories, methods and technologies for the design, creation and application of biological systems are constantly emerging, which promoted the development of biomanufacturing into the era of artificial intelligence (AI). In order to grasp the innovation and development of AI-driven biomanufacturing, we publish this special issue to review the opportunities, challenges, and development status of AI-driven biomanufacturing from aspects such as AI-driven enabling technologies, intelligent design and construction of biological parts, circuits and artificial cells, as well as intelligent bioprocess control and optimization, and look forward to the future developments. This will provide valuable references for effectively promoting technological innovation and industrial development in the field of biomanufacturing.

Keywords: artificial intelligence (AI); big data; synthetic biology; biomanufacturing; sustainable development

生物制造是以微生物、植物、动物细胞等生物体或其组成成分为工具,通过工业生物技术规模化生产医药、食品、材料、能源等产品的战略性新兴产业^[1-3]。麦肯锡研究表明,60%人类需求的物质产品可以通过生物制造^[4];世界经济组织报告预测,至2030年,生物制造的经济和环境效益将超过生物农业和生物医药,在生物经济中的贡献率达到39%^[5]。生物制造正推动全球制造业向绿色低碳转型,为应对气候变化和能源安全、提高产业链供应链韧性、创新粮食和农业生产、促进人民生命健康、保护绿色生态环境等提供重要解决方案。生物制造有望改变世界工业格局,开创一个财富绿色增长新纪元,是实现工业可持续发展最有希望的领域之一,是全球发达国家实现再工业化战略和抢占未来产业竞争制高点的关键。

生物制造已成为全球科技竞争的关键赛道,是经济社会可持续发展的重要路径,我国高度重视生物制造发展,将其视为推动经济高质量发展和提升国际竞争力的关键领域^[6-7]。通过颁布《国家创新驱动发展战略纲要》《国家生物技术发展战略纲要》和《“十四五”生物经济发展规划》等多项政策和规划,明确了生物制造的战略地位,加大了对生物制造研发的投入,鼓励企业、高校和科研机构合作,推动关键技术的突破,旨在推动其在医药、农业、能源、工业等领域的应用。2022年、2023年两次中央经济工作会议以及2023年全国两会政府工作报告连续强调要发展生物制造,生物制造创新发展关乎我国在国际产业经济中的位势。

科技创新是生物制造发展的基石,可以有效增加技术供给,推动产业的快速进步和广泛应用。当前,随着系统生物学、合成生物学的不断发展,生物大数据的积累和大数据技术的不断进步,高性能智能计算设计等信息技术正

快速与生物技术融合,为生物体系设计、创制及应用提供新理论、新方法、新技术,推动生物制造发展进入人工智能(artificial intelligence, AI)驱动时代,生物制造的研发与产业发展的智能化、自动化程度快速提升^[8-11]。利用AI技术, DNA合成、蛋白质设计、基因编辑、数字细胞等底层技术快速突破和演进,不断拓展对生物体进化演化、功能调控的认知;AI通过机器学习和数据分析,可以对生物体进行可预测的编程,生物系统的元件、线路、途径、网络的可预测、可调控、可再造正逐渐成为现实;AI通过快速筛选分析大量生物体样本和生物数据,优化实验设计,大大缩短研发周期;AI驱动的自动化实验平台可以执行高通量实验,减少人为误差,提高实验的重复性和可靠性;AI能够处理和分析海量生物数据,给出更合理的策略,优化生物工艺流程,实现生物工程的智能监测和智能控制,大幅度提升生物制造的生产效率和产品质量,推进生物制造将朝着更高效、更绿色、更精准的方向发展,为人类社会带来更多福祉。

为了准确把握AI驱动生物制造创新发展脉络,本期专刊以“AI驱动生物制造”为主题,邀请了国内多家单位的专家学者,分别从AI驱动底层技术、生物元器件智能设计合成、人工细胞智能设计再造和智能生物过程控制优化4个方面阐述AI驱动生物制造的机遇和挑战、发展现状,展望未来的发展趋势,推动相关研究领域发展和成熟,以更好地推动生物制造领域的技术创新和产业发展。

1 AI 驱动底层技术

底层技术是支撑生物制造研发和应用的核心技术体系,涵盖了从基因操作到生物系统设计的多个层面,AI的快速发展提供了强大的工具和方法,正在深刻改变生物制造相关的底层

技术,推动了从数据库、知识库、大模型、计算模拟、蛋白从头设计、基因精准编辑等方面的全面创新发展,显著提升了生物制造领域的研发效率和应用潜力。数据库、知识库与大模型是支撑生物制造研发和应用的重要基础设施,中国科学院天津工业生物技术研究所马红武团队全面梳理了面向生物制造的数据库、知识库与大语言模型的最新研究进展、发展方向、难点以及新兴技术,探讨了如何整合现有数据库,构建知识库,特别是通过大模型实现生物制造相关知识的获取和生成,特别指出通过持续的技术创新和跨学科合作,利用高质量的数据库、知识库和大模型技术,可以实现知识驱动的更智能化、自动化的生物制造过程^[12]。计算模拟驱动的生物元件、代谢网络乃至细胞系统的机理解析、定向改造和按需设计,可为解决不同层次的生物学问题提供新的技术方案,中国科学院天津工业生物技术研究所盛翔团队结合近年来高性能 AI 模型的快速发展,在介绍基于物理原理的传统蛋白计算模拟方法及其应用基础上,系统梳理了融合 AI 和物理原理的最新计算模拟技术,进而提出在 AI 模型中结合严谨的化学知识和既定的物理原理,可有效提升数据处理和模式识别能力,从而提高计算效率和预测准确性^[13]。蛋白质突变效应预测旨在评估蛋白质序列中单个或多个氨基酸突变对其结构、功能和稳定性的影响,是进行蛋白质精准设计的前提,上海交通大学洪亮团队综述了蛋白质语言模型在蛋白质突变效应预测中的应用,重点讨论了基于序列的模型、基于结构的模型以及结合序列和结构信息的模型 3 类模型的原理、优势和局限性,并探讨了无监督学习和监督学习在模型训练中的应用以及当前相关研究面临的高质量数据集的获取、数据噪声的处理等主要挑战,还展望了多模态融合、少样本学习

等新兴技术的应用前景,为相关研究者提供一个全面的视角来审视蛋白质突变效应预测领域状况^[14]。基因编辑,尤其是 CRISPR-Cas 基因编辑可以对生物体的基因组进行精准修改以实现基因功能的调控、修复或改造, AI 的发展进一步提升了基因编辑的能力和效率,中国科学院天津工业生物技术研究所王猛团队综述了 AI 技术在 CRISPR-Cas 系统设计、挖掘与改造中的应用进展, AI 技术可以更好地助力分析高通量测序数据,优化 sgRNA 设计,提升编辑效率,预测脱靶效应,提高了基因编辑的效率和精确性,同时借助自动化设施,基因编辑的全流程将实现高通量并行操作,为实现智能化、精准化的高通量基因组编辑奠定了基础^[15]。

2 生物元器件智能设计合成

生物元器件包括核酸元件、酶蛋白元件、转运与调控蛋白元件以及处理逻辑运算、信号感知与代谢调控等功能的基因线路,是生物体的基本功能单元,类似于电子工程中的标准化元件,可以被组装成更复杂的、具有特定功能的生物系统,从而提升生物制造的能力和效率。结合 AI 技术,通过智能设计合成,能够显著提高生物元器件的设计效率和功能性,不断提升生物制造应用能力。核酸元件是在各种生物过程中发挥重要作用的功能性核酸(DNA 或 RNA)序列,是生物体生命活动的基础,也是生物制造高效生产的关键。中国科学院天津工业生物技术研究所孙喆、张学礼团队系统总结了应用于生物制造的各种 DNA 和 RNA 核酸元件,分析了基于人工智能算法构建的核酸元件预测和设计工具及人工智能技术在生物制造中的应用案例,探讨了由于生物系统的复杂性和高质量训练数据不足等问题造成的核酸元件智能设计在生物制造中的应用较为单一等现象,指出进

一步整合人工智能技术、合成生物学和高通量技术等,有望开发更高效准确的核酸元件设计方法,加速其在生物制造中的应用^[16]。酶作为生物催化剂,在生物制造中发挥着关键作用;针对天然酶蛋白难以满足工业生产的需求,挖掘和设计改造酶蛋白以适应特定的生物制造过程至关重要;中国科学院天津工业生物技术研究所廖小平团队系统总结了近年来 AI 技术在酶蛋白挖掘、评估、改造和从头设计方面的相关进展,指出 AI 技术可通过机器学习和深度学习算法,分析大量生物信息学数据,预测蛋白的功能和特性,从而加速蛋白的发现和优化过程;AI 还可以通过模拟和预测酶蛋白在不同条件下的性能,为酶蛋白的精准设计提供指导^[17]。转录调控蛋白是一类能够与 DNA 结合并调控基因转录的蛋白质,其在基因表达调控中起着核心作用,近年来利用转录调控蛋白构建生物传感器,在生物制造的工程菌株构建优化、动态调控、高通量筛选等方面实现了广泛应用。中国科学院微生物研究所唐双焱团队梳理了近年来在计算机模拟和人工智能技术辅助下,采用蛋白质工程手段,智能设计、改造转录调控蛋白以提升其性能的相关研究进展,指出计算机模拟和人工智能辅助技术可实现对转录调控蛋白更精准快捷地设计构建,正在快速推动新型生物传感器的创制研发,满足实际应用的需求^[18]。基因线路由一系列核酸元件、蛋白元件、调控元件等生物元件组成,能够执行特定的逻辑功能或调控基因表达来实现特定的生物行为,在生物制造中发挥必不可少的作用。浙江大学王宝俊团队概述了基因线路设计中常用的机器学习算法,分析了机器学习如何在合成启动子、RNA 调控元件、转录因子等生物元件及简单基因线路的智能设计中突破传统方法的局限,探讨了智能化设计当前面临的主要挑战及

其潜在解决方案,并展望了机器学习与生物系统设计未来的融合趋势,强调了跨学科合作在这一进程中的重要性^[19]。

3 人工细胞智能设计再造

人工细胞(或工程细胞)是指通过合成生物学等手段构建的具有生命基本特征和特定功能的细胞或类细胞系统,可以基于天然细胞,通过基因编辑、代谢工程等手段改造获得,也可以利用脂质、核酸、蛋白质等非生命物质从头合成构建。结合 AI 技术,智能设计再造正在显著提升人工细胞的构建效率和功能性,从而在生物制造中发挥更大作用。高效设计、构建人工细胞需要精准、全面的数字细胞模型,而近年来多学科的发展和融合可以更精确地测量细胞组分动态变化,快速获取海量生物数据,使得细胞过程数理模型的精确构建日益可行。中国科学院天津工业生物技术研究所朱岩团队整理归纳了细胞生命过程数学建模的技术体系,详细阐述了单一细胞生命过程的数学模型,进一步总结了多过程模型以及全细胞模型的相关方法,系统评述了相关数学模型在解析细胞运作规律、工程细胞设计中的具体应用,并进一步指出了数学建模的当前挑战,探讨了可能的解决方案,旨在推动该领域的研究进展和技术革新,加速人工细胞创制迭代,实现高效可持续的绿色生物制造^[20]。蛋白质表达是一个涵盖转录、翻译、折叠、转运与翻译后修饰等精密调控的复杂过程,是实现生物制造的关键环节,结合蛋白表达数据构建其模型对理解蛋白表达的各种细胞因素和调控机制具有重要意义。中国科学院天津工业生物技术研究所马红武团队评述了近年来蛋白表达过程机理模型构建和通过人工智能方法分析各种因素对蛋白表达的影响方面的进展,明确数据驱动的人工智能模型

主要研究目标蛋白的氨基酸序列和相应基因及调控区核苷酸序列对蛋白表达的影响,而机理模型则侧重表达底盘细胞中关键组分如氨酰 tRNA 合酶等对蛋白表达的影响;提出将机理模型和人工智能模型相结合,综合考虑胞内因素和表达序列特征的影响,有望进一步加深对蛋白表达系统的理解,为提升生物制造效率提供理论指导和技术支持^[21]。能量代谢既可以通过改变物质代谢流分配提升生产效率,也可以通过改变酶催化反应的热力学参数,影响反应平衡减少能量消耗,从而降低生物制造的效率和生产成本。中国科学院深圳先进技术研究院于涛团队梳理了底物水平磷酸化和氧化磷酸化这 2 类能量代谢调控对物质代谢以及生物制造的影响,探讨了如何通过合成生物学,尤其是通过 AI 辅助的计算设计优化能量代谢,改善人工细胞性能,增加生物制造目标产品产量和转化率^[22]。细胞中由自发或由酶催化的代谢反应组成了高度复杂的代谢网络与细胞生理代谢活动运作密切相关,因此,细胞生理代谢网络模型的重构有助于从系统层面上解析基因型与生长表型之间的关联,为细胞生理代谢活动精准刻画与生物绿色制造等研究提供重要的计算生物学工具。上海交通大学鲁洪中团队系统介绍全基因组规模代谢网络模型、动力学模型、酶约束代谢模型等不同类型细胞生理代谢网络模型发展与应用的最新研究进展,指出最近的人工智能技术为高精度细胞生理代谢网络模型构建提供了全新机遇,并总结了其在动力学模型和酶约束模型构建等领域的具体应用案例,相关研究为高性能人工细胞的创制提供了强大计算支撑^[23]。

4 智能生物过程控制优化

生物制造过程既包含复杂的细胞生命过程又包含复杂的环境混合、传质过程,是细胞与

外部环境动态相互作用结果的体现。智能生物过程控制优化是利用 AI、大数据和自动化技术,对生物过程中的环境条件、细胞代谢特性参数等进行智能感知,在感知基础上对生物过程进行实时监控、分析和优化,以提高生产效率、降低成本并确保产品质量。AI 等跨学科的融合发展正在推动生物制造过程向智能化、精准化和高效化方向发展。感应代谢与环境变化并做出自适应调控是细胞生命活动的关键,揭示细胞代谢与环境适应的调控机制,不仅有助于理解生命活动的基本规律,还为优化和提升生物制造过程效率提供了新思路。江南大学刘立明团队从细胞如何通过膜上的感受器和胞内的信号传导通路感应代谢和环境的差异性变化,细胞自适应调控以应对不断变化的代谢和环境差异的方式有哪些,以及如何利用已知的细胞感知和适应调控机制这 3 个方面对细胞代谢与环境适应调控的研究进行了总结,并从动态调控、理性代谢工程改造和适应性进化 3 个方面探讨了基于细胞自适应调控的生物制造应用场景及未来的发展方向^[24]。生物制造过程本身固有的时空异质性、复杂性以及动态性,给生物过程系统认知、优化调控带来了重大挑战,利用系统生物学定量检测生物过程中细胞内外组分的动态变化,解析生物系统与环境间的动态互作原理,挖掘海量组学数据,建立机理或数据驱动的数学模型,可以实现生物过程计算模拟,从而可以预测环境条件变化、基因调控或外源干扰对细胞功能的影响,为优化生物过程与控制策略提供可能。中国科学院天津工业生物技术研究所孙际宾团队梳理了生物过程多组学数据获取及分析以及基于多组学数据的生物过程建模方法,探讨了多组学和建模在过程参数调整、发酵控制、环境应变应答、营养优化以及实时监测与调整等关键环节的实际应用,多组

学数据整合及模型化在提升生物过程操作精度方面的巨大潜力,讨论了目前生物过程优化所面临的挑战及可能的解决策略,指出通过解决相关问题,可以更好地理解和控制复杂的生物过程,从而推动生物制造领域的快速发展^[25]。生物发酵过程优化效率低已成为限制生物制造创新成果产业化的瓶颈,而生物发酵过程的数字化、智能化为突破这一瓶颈提供了新路径。中国科学院天津工业生物技术研究所夏建业团队针对发酵过程实时智能感知与优化控制的创新发展,梳理了常规检测技术、高级检测技术、实时智能感知技术在生物发酵优化过程中的应用,同时分析对比了传统生物过程优化控制技术、多参数发酵优化控制技术,以及实时智能感知支持下的过程优化控制技术的差异和优劣,并对未来智能发酵优化控制技术进行展望,指出基于数字孪生的过程优化与智能控制,将提升生物发酵过程的自主适应能力,为生物制造的智能化和可持续发展提供强大支持^[26]。生物过程具有生命体系与物质转化体系双重属性,其多层次多尺度间的复杂关联导致生物过程优化十分困难,深入认识介尺度机理是了解生物过程动态变化和梳理多尺度复杂关系的关键之一。近年来 AI 优化与介尺度模拟的结合为生物过程优化注入了新的活力,中国科学院过程工程研究所杨超团队梳理生物过程中基于群体平衡模型/格子玻尔兹曼方法的介尺度模拟仿真、机器学习方法的 AI 优化、AI 与分子动力学模拟/计算流体动力学,提出生物过程中的介尺度模拟需要由颗粒间的作用向亚颗粒尺度(如界面问题)深入,呈现更多时空变化的细节,进而建立介尺度范围内不同物理空间尺度和不同时间尺度问题的耦合方法,厘清生物过程的动态关联特征,解析多尺度间的耦合机制,为优化生物过程提供参考^[27]。

尽管结合 AI 的强大计算能力、数据挖掘能力和自动化技术,生物制造正朝着更高效、更精准、更可持续的方向发展,但是 AI 驱动生物制造的未来仍然充满大量挑战,需要进一步加强生物学、工程学和计算机科学的跨学科合作,促进 AI 驱动生物制造不断创新,拓展应用,为人类面临的能源、资源和环境问题提供全新解决方案。此外,本专刊内容上或会存在一些问题,希望各位同行和广大读者进一步批评指正。

REFERENCES

- [1] ASIN-GARCIA E, FAWCETT JD, BATIANIS C, MARTINS dos SANTOS VAP. A snapshot of biomanufacturing and the need for enabling research infrastructure[J]. *Trends in Biotechnology*, 2024, DOI: 10.1016/j.tibtech.2024.10.014.
- [2] CLOMBURG JM, CRUMBLEY AM, GONZALEZ R. Industrial biomanufacturing: The future of chemical production[J]. *Science*, 2017, 355(6320): aag0804.
- [3] SCOWN CD, KEASLING JD. Sustainable manufacturing with synthetic biology[J]. *Nature Biotechnology*, 2022, 40(3): 304-307.
- [4] The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives[EB/OL]. [2025-03-04]. <https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/the-bio-revolution-innovations-transforming-economies-societies-and-our-lives>.
- [5] The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda, Main Findings and Policy Conclusions[R]. 2010, Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.
- [6] 欧阳平凯. 我国工业生物技术的发展回顾及展望. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 3991-4000. Ouyang PK. The industrial biotechnology in China: development and outlook[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(11): 3991-4000.
- [7] 王婉莹, 周颖喆, 刘华娟, 蒋国强. 我国生物制造领域竞争优势劣势分析. *化工进展*, 2024, 43(S1): 662-666. Wang WY, Zhou YZ, Liu HJ, Jiang GQ. Analysis of competitive advantages and disadvantages in China's biomanufacturing field[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(S1): 662-666 (in Chinese).
- [8] SHI ZK, LIU P, LIAO XP, MAO ZT, ZHANG JQ, WANG QH, SUN JB, MA HW, MA YH. Data-driven synthetic cell factories development for industrial biomanufacturing[J]. *Biodesign Research*, 2022, 2022: 9898461.
- [9] 李玉雪, 王波, 宁康. 生物信息学与生物制造: 论生物大数据及其数据挖掘在生物制造中的重要性. *生命科学*, 2024, 36(11): 1339-1348. Li YX, Wang B, Ning K. Bioinformatics and biomanufacturing: the importance of big biodata and its data mining in biomanufacturing. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2024, 36(11): 1339-1348 (in Chinese).

- [10] Artificial Intelligence and Automated Laboratories for Biotechnology: Leveraging Opportunities and Mitigating Risks: A Workshop[EB/OL]. [2025-03-06] <https://nap.nationalacademies.org/catalog/27469/artificial-intelligence-and-automated-laboratories-for-biotechnology-leveraging-opportunities-and-mitigating-risks>.
- [11] 朱华伟, 李寅. 合成生物制造 2025[J]. 生物工程学报, 2025, 41(1): 1-78.
Zhu HW, Li Y. Biomanufacturing driven by engineered organisms[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(1): 1-78 (in Chinese).
- [12] 毛志涛, 廖小平, 马红武. 面向生物制造的数据库、知识库与大模型[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 901-916.
MAO Zhitao, LIAO Xiaoping, MA Hongwu. Databases, knowledge bases, and large models for biomanufacturing[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 901-916 (in Chinese).
- [13] 刘保艳, 李帅, 苏浩, 盛翔. 人工智能与物理原理融合驱动的蛋白计算模拟技术[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 917-933.
LIU Baoyan, LI Shuai, SU Hao, SHENG Xiang. Artificial intelligence-enhanced physics-based computational modeling technologies for proteins[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 917-933 (in Chinese).
- [14] 张良, 谈攀, 洪亮. 基于蛋白质语言模型的突变效应预测研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 934-948.
ZHANG Liang, TAN Pan, HONG Liang. Research progress in mutation effect prediction based on protein language models[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 934-948 (in Chinese).
- [15] 毛雨丰, 储光芸, 梁庆玲, 刘叶, 杨毅, 廖小平, 王猛. 基于人工智能的CRISPR-Cas系统的设计、挖掘与改造[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 949-967.
MAO Yufeng, CHU Guangyun, LIANG Qingling, LIU Ye, YANG Yi, LIAO Xiaoping, WANG Meng. Artificial intelligence-assisted design, mining, and modification of CRISPR-Cas systems[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 949-967 (in Chinese).
- [16] 王金盛, 孙喆, 张学礼. 生物制造中核酸元件的智能设计[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 968-992.
WANG Jinsheng, SUN Zhe, ZHANG Xueli. Intelligent design of nucleic acid elements in biomanufacturing[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 968-992 (in Chinese).
- [17] 刘翠, 史振坤, 马红武, 廖小平. 蛋白元件的智能挖掘、改造和从头设计[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 993-1010.
LIU Cui, SHI Zhenkun, MA Hongwu, LIAO Xiaoping. Intelligent mining, engineering, and *de novo* design of proteins[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 993-1010 (in Chinese).
- [18] 梁朝宁, 向腊, 唐双焱. 基于转录调控蛋白的生物传感器的智能设计构建[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1011-1022.
LIANG Chaoning, XIANG La, TANG Shuangyan. Intelligent design of transcription factor-based biosensors[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1011-1022 (in Chinese).
- [19] 毛瑞超, 王宝俊. 合成生物元件与线路的智能设计[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1023-1051.
MAO Ruichao, WANG Baojun. Machine learning-aided design of synthetic biological parts and circuits[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1023-1051 (in Chinese).
- [20] 朱岩, 孙际宾. 细胞生命过程数学刻画建模[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1052-1078.
ZHU Yan, SUN Jibin. Mathematical modelling for cellular processes[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1052-1078 (in Chinese).
- [21] 杨毅, 杜军, 杨春贺, 马红武. 蛋白表达系统的机理模型和人工智能模型研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1079-1097.
YANG Yi, DU Jun, YANG Chunhe, MA Hongwu. Research progress in mechanism models and artificial intelligence models for protein expression systems[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1079-1097 (in Chinese).
- [22] 杨一群, 刘清清, 田硕, 于涛. 细胞工厂能量代谢设计研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1098-1111.
YANG Yiqun, LIU Qingqing, TIAN Shuo, YU Tao. Research progress in energy metabolism design of cell factories[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1098-1111 (in Chinese).
- [23] 肖陆驰, 鲁洪中. 细胞生理代谢网络模型重构和优化的进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1112-1132.
XIAO Luchi, LU Hongzhong. Advances in reconstruction and optimization of cellular physiological metabolic network models[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1112-1132 (in Chinese).
- [24] 刘源, 胡贵鹏, 李晓敏, 刘佳, 高聪, 刘立明. 微生物细胞代谢与环境适应调控研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1133-1151.
LIU Yuan, HU Guipeng, LI Xiaomin, LIU Jia, GAO Cong, LIU Liming. Advances in the regulation of microbial cell metabolism and environmental adaptation[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1133-1151 (in Chinese).
- [25] 朱岩, 张志丹, 覃培斌, 申杰, 孙际宾. 数据驱动的生物制造过程多组学分析与建模[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1152-1178.
ZHU Yan, ZHANG Zhidan, QIN Peibin, SHEN Jie, SUN Jibin. Data-driven multi-omics analyses and modelling for bioprocesses[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1152-1178 (in Chinese).
- [26] 夏建业, 龙东娇, 陈敏, 陈安祥. 智能生物制造之发酵过程优化: 在线检测、人工智能与数字孪生技术[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1179-1196.
XIA Jianye, LONG Dongjiao, CHEN Min, CHEN Anxiang. Optimization of fermentation processes in intelligent biomanufacturing: on online monitoring, artificial intelligence, and digital twin technologies[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1179-1196 (in Chinese).
- [27] 王智慧, 王聪, 张庆华, 夏建业, 丛威, 杨超. 生物过程的介尺度模拟仿真与 AI 优化[J]. 生物工程学报, 2025, 41(3): 1197-1218.
WANG Zhihui, WANG Cong, ZHANG Qinghua, XIA Jianye, CONG Wei, YANG Chao. Mesoscale simulation and AI optimization of bioprocesses[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(3): 1197-1218 (in Chinese).