

序 言

P R E F A C E

1949年11月1日，中国科学院成立，肩负起领导和推动全国科技事业发展、服务国家工农业和国防现代化建设的历史使命。1955年，党中央决定成立中国科学院学部，其目的在于遴选和汇聚全国各领域最优秀的科学家，在国家科技发展的重大决策中发挥学术领导和战略咨询的核心作用。70多年来，国家科技体制不断完善，中国科学院作为国家战略科技力量，始终把服务国家、造福人民作为根本宗旨，始终践行把握科技发展大势、前瞻研判未来方向、支撑国家科技决策的使命担当。以今天中国数字经济的奔腾算力和现代工业体系的智能控制为例，其最核心的技术原点与产业基石，可追溯至1956年中国科学院学部委员和领域专家研讨提出的发展计算技术、半导体技术、无线电电子学、自动化技术“四大紧急措施”。世纪之交，在全球知识经济浪潮兴起、中国实施“科教兴国”的战略背景下，中国科学院决定持续发布《科学发展报告》《高技术发展报告》《中国可持续发展报告》三大报告，向政府和决策层系统报告世界和中国科技发展的情况，为决策提供科技发展的背景资料和依据，向公众系统传播最新最前沿的知识。“三大报告”对国家、地方及产业界的发展理念、政策制定、发展重点选择产生了深远的影响。

当前，我国正处在为2035年基本实现社会主义现代化目标而

接续奋斗的关键节点，加快高水平科技自立自强，引领发展新质生产力，已成为我们必须回答好的时代命题；与此同时，新一轮科技革命和产业变革深度交织，科技创新成为大国博弈的主战场，科学、技术与社会之间的互动关系正在经历深刻重构。在这一历史方位下，中国科学院落实“国家科学技术界最高学术机构、国家科学技术思想库、自然科学基础研究与高技术综合研究的国家战略科技力量”使命定位，发挥学部的组织领导作用，发挥院士群体凝聚引领全国科学家的作用，发挥专业研究支撑平台和团队的作用，系统凝练思想库成果产出，聚焦“决策咨询系列”“学术引领系列”“科学文化系列”“科学普及系列”，打造优质、特色、体系化的一流思想库系列成果品牌，支撑国家科学技术思想库建设。

其中，“学术引领系列”策划推出新版《科学发展报告》《高技术发展报告》《可持续发展报告》《科技基础能力发展报告》四个报告，由中国科学院6个专业学部常务委员会和学部学术与出版工作委员会负责，组织各领域中国科学院院士及团队、中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报机构等多支专业力量共同编纂。四个报告的体系结构完整、互为支撑，以科学报告提供认知依据，以高技术报告支撑能力跃迁，以科技基础能力报告强化系统韧性，以可持续发展报告锚定长远价值导向，从影响国家长远发展和人类共同未来的根本性、战略性科技问题出发，进行前瞻性的战略研判和发展比较分析，以期搭建科技界与决策层、社会公众之间持续沟通的桥梁。

《可持续发展报告》源自1999年推出的“中国可持续发展战略报告年度系列”，由中国科学院生命科学和医学学部常务委员

会、地学部常务委员会牵头组织，面向经济社会发展和人民生命健康、面向国家可持续发展战略需求和重大实践问题，围绕绿色技术与创新、食物与营养安全、资源安全与可持续利用、环境污染与气候变化、自然灾害防治、生物多样性保护与同一健康、可持续发展战略与管理、政策及评估等领域，综合运用多学科交叉的理论、方法和研究手段开展研究，旨在为推动实现联合国可持续发展目标和中国“双碳”目标、应对我国可持续发展重大战略问题以及参与全球环境治理提供科学依据、技术支撑、解决方案。

《2025 可持续发展报告》以“面向生命健康与绿色发展的前沿科技进展与展望”为主题。人与自然是生命共同体，因此，生命健康与绿色发展之间相互联系、相互作用、密不可分。保障生命健康是绿色发展的应有之义和根本诉求之一，而实现绿色发展才能为生命健康创造优良的环境条件。技术扮演着调节人与自然关系的中介角色。其与环境之间存在着一种对立统一的辩证关系：技术既是造成环境变化的源泉，又是应对环境变化、解决和治理环境问题的工具和途径。要在科技向善理念的引领下，充分发挥科技对生命健康和绿色发展的保障支撑作用。

本报告分为上下两篇，上篇分可持续发展展望和领域新进展两个板块，由两个专业学部常务委员会组织相关领域院士专家撰写完成；下篇分国内外可持续发展态势观察与绿色发展评估两个板块，由中国科学院科技战略咨询研究院可持续发展领域研究团队撰写完成。展望板块主要对国内外可持续发展动向进行回顾、总结和展望，包括《人工智能驱动生命科学创新的研究进展》和《面向“双碳”目标的前沿科技进展与展望》两篇综述性文章。领

域新进展板块分别围绕代谢生物学、中西医结合诊疗范式、口腔稳态、新发突发传染病监测预警、地热能开发利用与储能、陆地生态系统碳循环、气候变化对病原微生物的影响、海洋碳汇与负排放等主题，剖析相关领域研究进展和存在问题，凝练出相应的科学问题，并提出应对之策或技术方案。态势观察板块主要就气候变化应对、生物多样性保护、常规污染物和新污染物治理、循环经济、数智化绿色化转型、绿色低碳政策、生命科学基础研究等热点议题的国内外动态进行分析评述。绿色发展评估板块则采用前中国科学院可持续发展研究组开发的系列方法，对全球和“一带一路”的绿色发展开展评估。

在报告撰写的过程中，特别感谢康乐和郭正堂对报告的结构安排和稿件质量严格把关；感谢王会军、马克平、陶澍、傅伯杰、李亚栋、樊杰、朱永官和方精云等专家学者对稿件进行仔细审读，提出宝贵意见。

中国科学院生命科学和医学学部第十七届常务委员会主任



中国科学院地学部第十七届常务委员会主任



2026年5月

目 录

C O N T E N T S

序言

上篇 科技态势与进展

第一章	可持续发展展望	/ 003
1.1	人工智能驱动生命科学创新的研究进展 韩 斌 陈大明	/ 004
1.2	面向“双碳”目标的前沿科技进展与展望 于贵瑞 朴世龙 朱剑兴 等	/ 026
第二章	领域新进展	/ 047
2.1	国内外代谢生物学研究热点与前沿进展 宋保亮 史熊杰	/ 048
2.2	中西医结合诊疗范式创新：前沿问题与发展战略布局 全小林 侯凡凡 赵林华 等	/ 061

- 2.3 口腔稳态与全身健康的研究前沿、挑战与未来发展方向**
王松灵 胡 磊 周 建 等 / 075
- 2.4 新发突发传染病监测预警的研究进展、面临的挑战与应对之策**
王福生 陈威巍 杨 露 等 / 087
- 2.5 地热能开发利用与储能的研究态势、关键科学问题与未来突破方向**
汪集暘 庞忠和 孔彦龙 等 / 106
- 2.6 陆地生态系统碳循环研究进展与展望**
朴世龙 袁文平 王旭辉 / 121
- 2.7 气候变化对病原微生物的影响及其监测预警技术体系研究进展**
黄建平 连鑫博 王丹凤 / 134
- 2.8 海洋碳汇与负排放技术前沿及研究进展**
焦念志 肖喜林 / 152

下篇 科技政策与观察

- 第三章 国内外可持续发展态势观察** / 173
- 3.1 国际生命科学基础研究政策体系的演进及我国的应对之策**
李 林 陈大明 张学博 / 174
- 3.2 气候变化减缓与适应态势观察**
王 溥 / 190
- 3.3 生物多样性保护态势观察**
黄宝荣 张 智 / 203

3.4	常规污染物与新污染物治理态势观察	
	张丛林 邹秀萍	/ 218
3.5	循环经济与“无废城市”建设态势观察	
	孟小燕 周道静	/ 231
3.6	数智化绿色化转型发展态势观察	
	汪明月 王悦颖 曹湘杰 等	/ 246
3.7	绿色低碳发展政策和制度建设态势观察	
	苏利阳 刘梅影 程多威 等	/ 257
第四章	全球和“一带一路”绿色发展评估： 1992—2023	/ 271
	陈劭锋 刘 扬 张舒甜 等	
第五章	报告总览	/ 387
	陈劭锋 苏利阳 王 溥	

CONTENTS

Preface

Part I Trends and Advances in Science and Technology

Chapter 1 Outlook on Sustainable Development / 003

- 1.1 Advances in Artificial Intelligence-Driven Life Science Innovations / 024
- 1.2 Toward Carbon Peaking and Neutrality: Advances and Outlook in Frontier Technologies / 044

Chapter 2 Frontiers in the Relevant Fields / 047

- 2.1 Global Research Hotspots and Frontiers in Metabolic Biology / 059
- 2.2 Paradigm Innovation in Integrative Chinese and Western Medicine: Frontier Challenges and Strategic Directions / 074
- 2.3 The Advances, Challenges and Future Trends of Oral Homeostasis and Systemic Health / 086
- 2.4 Research Progress, Challenges, and Responses in the Surveillance and Early Warning of New and Emerging Infectious Diseases / 095
- 2.5 Geothermal Energy Development and Utilization with Energy Storage: Current Status, Scientific Challenges, and Future Pathways / 119
- 2.6 Advances and Prospects in Terrestrial Ecosystem Carbon Cycle Research / 133
- 2.7 Research Progress on the Impact of Climate Change on Pathogenic Microorganisms and Its Monitoring and Early Warning Technology System / 150

2.8	Ocean Carbon Sink and Ocean Negative Carbon Emissions Approaches	/ 168
-----	--	-------

Part II Science and Technology Policy and Observation

Chapter 3 Observation of Sustainable Development Trends / 173

3.1	Evolution of the International Policy Framework for Basic Research in the Life Sciences and China's Strategic Responses	/ 189
3.2	Observation of the Latest Trends in Climate Change Mitigation and Adaptation	/ 201
3.3	Observation of Biodiversity Conservation	/ 216
3.4	Observation of the Governance of Conventional Pollutants and Emerging Contaminants	/ 229
3.5	Observation on Circular Economy Development and "Zero-Waste City" Construction	/ 244
3.6	Observation of the Development Trends in Synergistic Transformation Toward Digitalization-Intelligence and Green Development	/ 255
3.7	The Policy and Institutional Landscape of Green and Low-Carbon Development	/ 268

Chapter 4 Global and "the Belt and Road" Green Development Assessment: 1992-2023 / 271

Chapter 5 An Overview of the Report / 387

上 篇

科技态势与进展

Trends and Advances in Science and
Technology





第一章

可持续发展 展望

Outlook on Sustainable
Development

1.1 人工智能驱动生命科学创新的研究进展

韩 斌¹ 陈大明²

(1. 中国科学院国家基因研究中心, 中国科学院分子植物科学卓越创新中心;
2. 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)

进入 21 世纪以来, 生命科学已转向对多尺度调控机制的精准解析与对复杂生命活动过程的主动干预, 但生命系统复杂性带来的“维数灾难”使得传统的实验科学必须借助人工智能强大的数据处理、模式识别与模型构建能力, 推动生命科学智能重构。人工智能与生命科学的融合经历了早期探索、数据积累和范式变革三个阶段, 并已形成从底层技术支撑、中层研究范式创新到顶层应用落地的完整创新生态系统。底层人工智能技术实现生物数据解析、动态调控等功能, 中层拓展出认识生命、改造生命、合成生命、设计生命四大研究方向, 顶层聚焦数字健康、智能诊疗、可持续农业等场景, 服务生命健康与可持续发展。当前, 该领域已经取得一系列里程碑式进展: 分子层级实现了从预测到生成设计的跨越, 细胞层级迈向通用基础模型与动态模拟, 组织与器官层级构建了数字孪生系统, 个体层级涌现了通用医疗大模型。在国际层面, 美国、欧洲及中国已形成差异化的发展路径和竞争格局。与此同时, 该领域还面临着“数据孤岛”、算法可解释性不足、跨学科人才短缺、伦理法规滞后及生物安全威胁等系列问题和挑战。未来 5—10 年, 生命科学智能融合将围绕核心科学问题, 寻求核心技术突破, 有望实现从智能辅助到智能主导的范式转变, 为全球生命健康与可持续发展提供有力的科技支撑。

进入 21 世纪以来,生命科学研究已从宏观现象描述,逐步转向遗传信息表达、信号转导网络、细胞命运决定机制、器官功能整合以及生物体应激反应等多层次、多尺度调控机制的精确解析与主动干预。然而,生命系统固有的复杂性却成为传统实验科学难以逾越的障碍。生命系统由基因、蛋白质、代谢物、细胞器等众多组分构成,这些组分通过高维度、非线性、动态性且富含反馈的调控机制相互作用,进而涌现出生长、繁殖、感知、学习等复杂功能。这种“维数灾难”导致变量间的交互关系维度呈指数级增长,从而导致物理层面上穷尽所有可能性的验证已变得无法实现。在此背景下,人工智能(artificial intelligence, AI)凭借其卓越的数据处理能力、模式识别能力以及模型构建能力,为破解生命系统的复杂性提供了全新的、系统性的解决方案^[1]。AI 不再仅仅是辅助性的计算工具,而是推动整个生命科学体系智能重构、知识涌现与价值创造的重要驱动力。其深远影响不仅体现在基础研究的突破中,更落脚在生命健康与可持续发展这两大关乎人类文明存续的核心议题上。

一、演变阶段与特征

AI 与生命科学的融合并非一蹴而就,而是经历了早期探索、数据积累和范式变革三个阶段的演变过程。

在早期探索阶段, AI 的复杂系统建模思路为理解基因调控网络提供了新的视角,但受限于计算能力与数据规模,应用仅停留在简单的基因序列比对层面。

在数据积累阶段,组学革命与深度学习的突破实现了历史性交汇。人类基因组计划的完成标志着生物大数据时代的开启,而深度学习概念的复兴则让 AI 具备了处理高维异构生物数据的能力。该阶段的 AI 作为核心计算工具,切入基因组分析、药物靶点筛选等场景,展现出初步的变革潜力。

在范式变革阶段,即从 21 世纪第 2 个 10 年末至今,以 AlphaFold 系列模型为代表的技术突破彻底改写了研究范式,实现了研究逻辑从“假设—验证”向“数据—模型—涌现”的智能发现跃迁。AI 不再仅作为辅助实验的工具,而是成为主动生成科学假设、挖掘生命规律的重要引擎。

与此同时，AI 对生命科学的驱动呈现出清晰的层级化特征，即从基础技术支撑到科学研究方法创新，再到应用场景的全面落地，形成了一个完整的创新生态系统（图 1）。

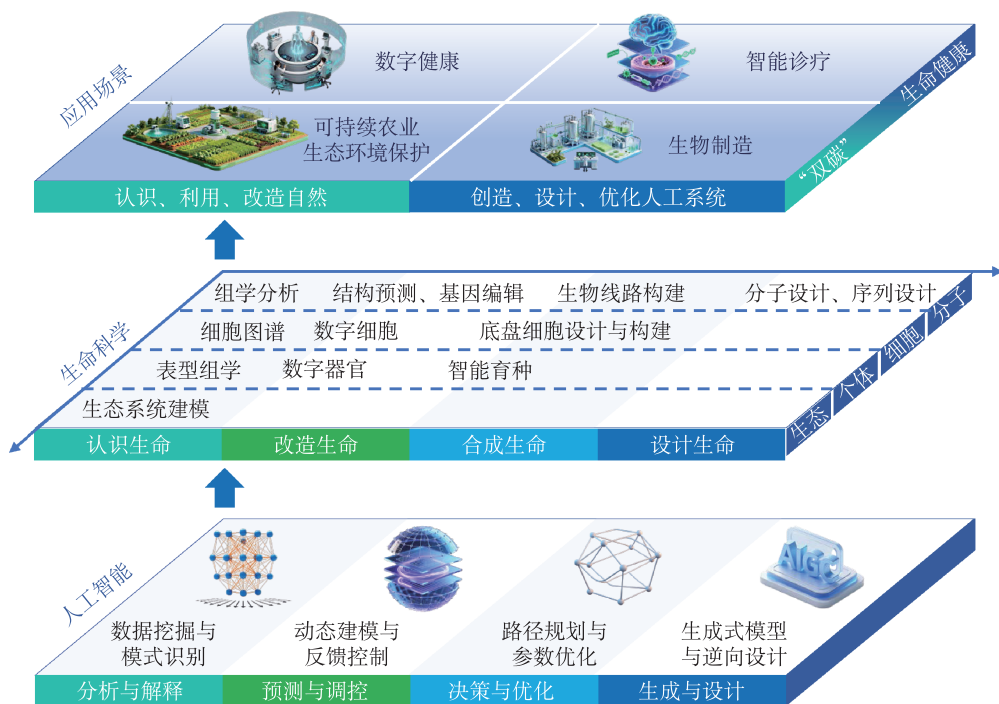


图 1 AI 赋能生命科学的创新生态系统

在系统的底层，AI 借助数据挖掘与模式识别技术，实现了海量生物数据的深度解析与智能阐释，为生命科学研究提供了强大的计算支持。动态建模与反馈控制技术使研究者能够预测生命系统的动态变化规律，可以精准调控生物过程。路径规划与参数优化技术为复杂生物实验设计提供了科学支撑，显著提高了研究效率。生成式模型与逆向设计技术更是开创了生命科学研究的全新范式，推动实现从数据到知识、从知识到设计的智能化跃迁。

当这些底层能力融入生命科学领域，便在中层引发了研究范式的深刻变革，从而拓展出生命科学研究的四个关键方向。其一为“认识生命”方向，即深入增进对生命现象的理解。例如，借助生态系统建模剖析生物与环境的交互作用机制，

通过细胞图谱揭示个体发育与疾病发生的基础。其二为“改造生命”方向，即对现有生命系统实施精准干预。例如，运用数字器官和数字细胞平台开展虚拟实验，通过结构预测与基因编辑技术精确操控分子层面的信息。其三为“合成生命”方向，即构建具备特定功能的人工生物系统。例如，通过智能育种培育优良作物品种，或通过生物线路构建和底盘细胞设计实现合成生物学的工程化应用。其四为“设计生命”方向，即依据预定目标从头设计全新的生命形式或功能分子。这标志着生命科学迈入了主动创造的新纪元。

这些中层的技术创新最终汇聚于顶层的“应用场景”，直接服务于人类社会的重大需求。当前，其应用主要聚焦于数字健康、智能诊疗、可持续农业和生物制造等领域，并共同指向了生命健康与可持续发展两大终极目标。在数字健康与智能诊疗中，AI 通过数据挖掘与模式识别分析患者多维数据，实现个性化医疗与精准诊疗，显著提高了疾病预防、诊断和治疗的效率与准确性。在可持续农业与生物制造中，AI 通过路径规划与参数优化，赋能智能育种技术，培育抗逆、抗旱、高产的作物品种，并优化生物制造过程，提高资源利用效率，为应对气候变化、发展生物经济和促进人类社会可持续发展提供了全新的技术路径。

目前，AI 正驱动着生命科学从分子到生态系统的多层级创新。在分子层面，生成式 AI 模型被广泛用于组学分析、蛋白质结构预测、药物靶点识别与虚拟筛选。在细胞与个体层面，AI 通过整合基因组、表型组、代谢组等多组学数据，构建细胞图谱与疾病模型，助力癌症早筛、免疫治疗响应预测以及罕见病诊断。在生态系统层面，AI 支持生态建模与环境监测，为保障粮食安全、保护生态环境等提供支持^[2]。

二、研究进展

AI 技术正以前所未有的速度重塑生物学的研究范式，推动生命科学从描述性科学向预测性科学转变，并在分子、细胞、器官和个体四个生物学层级上均取得了显著突破，不仅加速了基础研究进程，也为应用场景的智能化研发开辟了新路径。

1. 分子层级：转向全原子、多模态、可编程的通用生成设计

近年来，AI 强力推动生物分子研究范式发生根本性变革，核心发展趋势从单一、孤立的预测任务转向全原子、多模态、可编程的通用生成设计。这一发展进程是由一系列具有里程碑意义的模型推动的，标志着生物医学研究进入全新的“创造时代”。

早期的重大突破以 DeepMind 开发的 AlphaFold 模型为典型范例^[3]。该模型借助扩散模型技术，实现了对蛋白质、核酸等生物分子结构的原子级精度预测，为深入探究生命的基本构成单元提供了变革性研究手段。此后，研究范围持续拓展，如 EvolutionaryScale 的 ESM3 模型，凭借其跨序列、结构与功能的联合推理能力，被誉为“进化模拟器”^[4]；华盛顿大学 David Baker 团队研发的 RFdiffusion 系列模型，运用扩散生成技术，能够从零开始设计出具有特定功能的蛋白质单体乃至复合物^[5]。这些进展体现了 AI 从“理解”生命分子到“创造”功能分子的重大跨越。

分子层级的研究前沿正迅速从预测转向主动设计。基于扩散模型的生成式 AI 成为主流工具，例如 RFdiffusion 能自主生成具有特定功能的蛋白质骨架，而 GeoFlow V2 等模型则更进一步，在统一框架内能够同时完成蛋白质结构的预测与序列的从头设计^[6]。这种设计能力已高度专业化，出现了 RFantibody^[7]、IgGM^[8]等专注于抗体设计的模型，以及 ChemGPT 这类擅长化学逆合成与分子生成的专业模型。

该领域的研究范畴已从单一的蛋白质拓展至整个生命分子图谱。由谷歌 DeepMind 发布的基因组基础模型 AlphaGenome，能够预测 DNA 序列变异对不同生物过程的影响，进而可用于阐释遗传疾病的机制、优化基因检测方法，并为新型治疗策略的开发提供支持^[9]。Arc Institute、英伟达和斯坦福大学的 Evo 2^[10]，能够处理长达百万碱基对的上下文，实现了整个染色体或基因组的序列生成与功能预测，并且整合了 DNA、RNA 和蛋白质的多模态认知。华大生命科学研究院与之江实验室发布的 Genos 也支持百万碱基对级别的超长序列分析，成功实现单碱基分辨率的精准识别。此外，全原子基础模型（如 PharMolix-FM）致力于统一处理小分子、肽和蛋白质等多模态数据，而 ODesign 等前沿模型甚至能在单一架构

内可控生成蛋白质、核酸、小分子等多种模态的结合分子。

与此同时，简化架构与降低计算门槛成为重要的研究方向。苹果公司的 SimpleFold 证明无需复杂的多序列比对（multiple sequence alignment, MSA），仅利用 Transformer 架构和流匹配即可实现高效的蛋白质结构预测^[11]。模型的应用也愈发深入细分领域，如 SYMPLEX 专门为合成生物学设计，能够从海量文献中自动挖掘功能基因元件^[12]。

AI 驱动的生物分子研究已形成一套强大的“分子编程”工具集（表 1），实现了从原子到基因组尺度、从静态结构到动态功能、从对自然的理解到新物质创造的系统性突破，正重塑药物研发、精准医疗、分子育种等领域的创新过程。这些模型不仅显著提升了预测精度，更在设计效率与功能多样性方面展现出前所未有的潜能。同时，这些工具能够探索化学空间以往难以触及的区域，为发现具有全新作用机制的分子提供了可能。在分子育种领域，通过模拟并优化基因序列与蛋白质功能的关联，能够更高效地设计出具备抗病、耐旱等优良性状的作物品种，推动农业可持续发展。

表 1 AI 驱动生物分子研究的模型进展

模型	开发主体	模型特点
AlphaFold	DeepMind	预测蛋白质、核酸、配体等生物分子结构及相互作用，精度达原子级别；用扩散模型直接预测原子坐标，支持多分子复合物结构
HelixFold	百度	复现 AlphaFold 能力，支持 RNA 结构预测、共价修饰和抗原抗体场景
Evo 2	Arc Institute、英伟达、斯坦福大学	支持处理百万碱基对超长上下文，可从头生成染色体和小基因组序列，跨 DNA/RNA/ 蛋白质多模态；整合 DNA、RNA 和蛋白质的通用预测与设计
GeoFlow V2	百奥几何	全原子通用蛋白质大模型，统一结构预测与从头生成；统一扩散框架同时完成“结构预测 + 序列设计”；支持自然语言指令；显著提升酶催化活性
PharMolix-FM	水木分子	全原子基础大模型，处理小分子、肽、蛋白质等多模态生物数据

续表

模型	开发主体	模型特点
ChemGPT	华东师范大学	化学对话与逆合成分析模型，大规模参数，支持分子生成与性质预测
Genos	华大生命科学研究 院、之江实验室	支持百万碱基对超长上下文分析，实现单碱基分辨率精准识别
Odyssey	Anthrogen	大规模参数，具备多目标协同设计能力（如高效结合、低免疫原性）
SimpleFold	苹果公司	基于 Transformer 和流匹配，无需多序列比对即可预测蛋白质结构
SYMPLEX	中国科学院深圳先进 技术研究院、北京 大学	专为合成生物学设计，自动化提取功能基因元件并评估其潜力
GPT-4-Chem	OpenAI	基于 GPT-4 的多模态化学引擎，可直接生成分子简化分子线性输入规范（simplified molecular input line entry system, SMILES）、逆合成（retrosynthesis）路线；支持文献 - 专利 - 数据库联合问答
RoseTTAFold All-Atom	华盛顿大学 David Baker 团队	扩散去噪微调，可处理蛋白质 - 核酸 - 小分子 - 金属 - 共价修饰；实验验证设计地高辛结合蛋白成功
ESM3	EvolutionaryScale	跨模态蛋白质生成模型，支持序列 - 结构 - 功能联合推理，具备“进化模拟器”能力，可模拟进化过程
RhoFold	香港中文大学、复 旦大学、智峪生科	端到端 RNA 三维结构预测模型，集成 RNA 语言模型与统计能量函数
ProGen3	ProFluent	大规模蛋白质生成模型，可从头设计具有特定功能的蛋白质
GPN-MSA	加州大学伯克利分 校	基于多物种全基因组比对的 DNA 语言模型，擅长非编码区变异效应预测
MethylGPT	哈佛大学	基于 Transformer 架构的 DNA 甲基化组基础模型，基于海量 DNA 甲基化数据预训练
CpGPT	多伦多大学	改进型 Transformer++ 架构，整合序列上下文与表观遗传数据，支持多任务学习
SyntheMol	斯坦福大学、麦克 马斯特大学	生成式 AI 结合蒙特卡罗树搜索，从超大规模化合物库中设计新型抗生素