

总 序

党的二十大胜利召开，吹响了以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的前进号角。习近平总书记强调“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”^①，明确要求到2035年要建成教育强国、科技强国、人才强国。新时代新征程对科技界提出了更高的要求。当前，世界科学技术发展日新月异，不断开辟新的认知疆域，并成为带动经济社会发展的核心变量，新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势跃迁、快速迭代的关键阶段。开展面向2035年的中国学科及前沿领域发展战略研究，紧扣国家战略需求，研判科技发展大势，擘画战略、锚定方向，找准学科发展路径与方向，找准科技创新的主攻方向和突破口，对于实现全面建成社会主义现代化“两步走”战略目标具有重要意义。

当前，应对全球性重大挑战和转变科学研究范式是当代科学的时代特征之一。为此，各国政府不断调整和完善科技创新战略与政策，强化战略科技力量部署，支持科技前沿态势研判，加强重点领域研发投入，并积极培育战略新兴产业，从而保证国际竞争实力。

擘画战略、锚定方向是抢抓科技革命先机的必然之策。当前，新一轮科技革命蓬勃兴起，科学发展呈现相互渗透和重新会聚的趋

^① 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告. 北京: 人民出版社, 2022: 33.

势，在科学逐渐分化与系统持续整合的反复过程中，新的学科增长点不断产生，并且衍生出一系列新兴交叉学科和前沿领域。随着知识生产的不断积累和新兴交叉学科的相继涌现，学科体系和布局也在动态调整，构建符合知识体系逻辑结构并促进知识与应用融通的协调可持续发展的学科体系尤为重要。

擘画战略、锚定方向是我国科技事业不断取得历史性成就的成功经验。科技创新一直是党和国家治国理政的核心内容。特别是党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央明确了我国建成世界科技强国的“三步走”路线图，实施了《国家创新驱动发展战略纲要》，持续加强原始创新，并将着力点放在解决关键核心技术背后的科学问题上。习近平总书记深刻指出：“基础研究是整个科学体系的源头。要瞄准世界科技前沿，抓住大趋势，下好‘先手棋’，打好基础、储备长远，甘于坐冷板凳，勇于做栽树人、挖井人，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，夯实世界科技强国建设的根基。”^①

作为国家在科学技术方面最高咨询机构的中国科学院（简称中科院）和国家支持基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委），在夯实学科基础、加强学科建设、引领科学研究发展方面担负着重要的责任。早在新中国成立初期，中科院学部即组织全国有关专家研究编制了《1956—1967年科学技术发展远景规划》。该规划的实施，实现了“两弹一星”研制等一系列重大突破，为新中国逐步形成科学技术研究体系奠定了基础。自然科学基金委自成立以来，通过学科发展战略研究，服务于科学基金的资助与管理，不断夯实国家知识基础，增进基础研究面向国家需求的能力。2009年，自然科学基金委和中科院联合启动了“2011—2020年中国学科发展

^① 习近平. 努力成为世界主要科学中心和创新高地 [EB/OL]. (2021-03-15). http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c_1127209130.htm[2022-03-22].

战略研究”。2012年，双方形成联合开展学科发展战略研究的常态化机制，持续研判科技发展态势，为我国科技创新领域的方向选择提供科学思想、路径选择和跨越的蓝图。

联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”，是中科院和自然科学基金委落实新时代“两步走”战略的具体实践。我们面向2035年国家发展目标，结合科技发展新特征，进行了系统设计，从三个方面组织研究工作：一是总论研究，对面向2035年的中国学科及前沿领域发展进行了概括和论述，内容包括学科的历史演进及其发展的驱动力、前沿领域的发展特征及其与社会的关联、学科与前沿领域的区别和联系、世界科学发展的整体态势，并汇总了各个学科及前沿领域的发展趋势、关键科学问题和重点方向；二是自然科学基础学科研究，主要针对科学基金资助体系中的重点学科开展战略研究，内容包括学科的科学意义与战略价值、发展规律与研究特点、发展现状与发展态势、发展思路与发展方向、资助机制与政策建议等；三是前沿领域研究，针对尚未形成学科规模、不具备明确学科属性的前沿交叉、新兴和关键核心技术领域开展战略研究，内容包括相关领域的战略价值、关键科学问题与核心技术问题、我国在相关领域的研究基础与条件、我国在相关领域的发展思路与政策建议等。

三年多来，400多位院士、3000多位专家，围绕总论、数学等18个学科和量子物质与应用等19个前沿领域问题，坚持突出前瞻布局、补齐发展短板、坚定创新自信、统筹分工协作的原则，开展了深入全面的战略研究工作，取得了一批重要成果，也形成了共识性结论。一是国家战略需求和技术要素成为当前学科及前沿领域发展的主要驱动力之一。有组织的科学研究及源于技术的广泛带动效应，实质化地推动了学科前沿的演进，夯实了科技发展的基础，促进了人才的培养，并衍生出更多新的学科生长点。二是学科及前沿

领域的发展促进深层次交叉融通。学科及前沿领域的发展越来越呈现出多学科相互渗透的发展态势。某一类学科领域采用的研究策略和技术体系所产生的基础理论与方法论成果，可以作为共同的知识基础适用于不同学科领域的多个研究方向。三是科研范式正在经历深刻变革。解决系统性复杂问题成为当前科学发展的主要目标，导致相应的研究内容、方法和范畴等的改变，形成科学研究的多层次、多尺度、动态化的基本特征。数据驱动的科研模式有力地推动了新时代科研范式的变革。四是科学与社会的互动更加密切。发展学科及前沿领域愈加重要，与此同时，“互联网+”正在改变科学交流生态，并且重塑了科学的边界，开放获取、开放科学、公众科学等都使得越来越多的非专业人士有机会参与到科学活动中来。

“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”系列成果以“中国学科及前沿领域2035发展战略丛书”的形式出版，纳入“国家科学思想库-学术引领系列”陆续出版。希望本丛书的出版，能够为科技界、产业界的专家学者和技术人员提供研究指引，为科研管理部门提供决策参考，为科学基金深化改革、“十四五”发展规划实施、国家科学政策制定提供有力支撑。

在本丛书即将付梓之际，我们衷心感谢为学科及前沿领域发展战略研究付出心血的院士专家，感谢在咨询、审读和管理支撑服务方面付出辛劳的同志，感谢参与项目组织和管理工作的中科院学部的丁仲礼、秦大河、王思哥、朱道本、陈宜瑜、傅伯杰、李树深、李婷、苏荣辉、石兵、李鹏飞、钱莹洁、薛淮、冯霞，自然科学基金委的王长锐、韩智勇、邹立尧、冯雪莲、黎明、张兆田、杨列勋、高阵雨。学科及前沿领域发展战略研究是一项长期、系统的工作，对学科及前沿领域发展趋势的研判，对关键科学问题的凝练，对发展思路及方向的把握，对战略布局的谋划等，都需要一个不断深化、积累、完善的过程。我们由衷地希望更多院士专家参与到未来的学

科及前沿领域发展战略研究中来，汇聚专家智慧，不断提升凝练科学问题的能力，为推动科研范式变革，促进基础研究高质量发展，把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，服务支撑我国高水平科技自立自强和建设世界科技强国夯实根基做出更大贡献。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”

联合领导小组

2023年3月

前 言

生物学是研究生物体的基本特征，探索生命活动基本规律和生命现象本质的科学。随着 20 世纪分子生物学的发展，现代生物学的研究范式从宏观向微观、从外在描述向机理阐明，涌现出的大批新技术和新方法不断推动生命科学前沿研究，加速了对于生命本质的理解。与此同时，生物学与数学、物理、化学、信息科学、材料科学等学科领域逐渐交叉、渗透、会聚，产生了系统生物学、合成生物学和生物医学影像学等多个交叉学科，为生物学前沿探索和创新研究模式带来了无限潜力。生物学已成为当前科学研究发展最为迅速的前沿领域之一。

生物学研究关系到生命与健康保障、农业及粮食安全、环境与生态文明等多个方面，是国计民生、战略安全和可持续发展的重大保障。生物学研究不仅是对生命本质的了解，不断推进医药、农业的发展，也为环境保护、国家安全提供保障。

在自然科学基金委和中科院联合部署下，中国生物学 2035 发展战略研究项目组成立，旨在分析生物学发展规律与特点、发展现状与发展态势，提出未来十五年我国生物学领域的总体发展思路、关键科学问题、发展目标和优先发展领域，并提出促进学科发展的相关政策措施建议。

全书共分十四章，涉及的专业方向基本上覆盖了生物学科所有重要的领域，包括总论（概述）、动物学、植物学、微生物学、生态学、细胞生物学、遗传学与生物信息学、发育生物学、免疫学、神经科学/心理学和认知科学、生理学、生物物理与生物化学、分子生物学与生物技术、生物材料/成像与组织工程学等。项目组进行了相应的任务分工，明确了生物学总论及各分支学科的牵头负责专家及调研撰写小组。之后经过多次线上线下研讨、邮件微信交流等多种形式的讨论，并广泛征求同行科学家的意见，进行生物学相关文献资料调研分析。在此过程中，还在自然科学基金委—中科院学科发展战略研究项目交流会以及研究报告出版专家评议会等汇报并征求意见，经过多轮次修改、论证、归纳、综合整理形成了本书。

项目组汇集了国内生物学相关领域的杰出学科带头人，包括学术秘书朱冰；专家组成员：于贵瑞、王立平、王秀杰、王宏伟、王泽峰、王韵、元英进、孔宏智、龙勉、东秀珠、冯新华、宋保亮、罗凌飞、赵世民、徐涛、蒋争凡、薛红卫、魏辅文、瞿礼嘉；参编专家：王天明、王海滨、牛书丽、方方、杜卫国、李劲松、杨元合、杨运桂、陈良怡、范明、胡小玉、聂广军、程功、鲁林荣、解慧琪等。在此对各位专家学者同行在撰写过程中付出的智慧和辛勤劳动表示衷心的感谢！特别感谢中科院生物物理研究所的朱冰研究员，作为本项目的学术秘书，倾注了大量精力；感谢自然科学基金委生命科学部和中科院学部工作局给予的大力支持。

由于时间与认识所限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请各位同人和读者批评指正！

陈晔光

《中国生物学2035发展战略》编写组组长

2021年12月

摘 要

生物学是研究生物体的基本特征、探索生命活动基本规律和生命现象本质的科学。随着 20 世纪分子生物学的快速进步，现代生物学的研究范式从宏观向微观、从外在描述向机理阐明深入发展，涌现出大批新技术和新方法，不断推动生命科学前沿研究，极大加速了对于生命本质的理解。与此同时，生物学与数学、物理、化学、信息科学、技术科学、工程科学等多学科领域逐渐交叉、渗透、会聚，产生了系统生物学、合成生物学和生物医学影像学等交叉学科，为生物学前沿探索和创新研究模式带来了无限潜力。

生物学研究关系到生命与健康保障、农业及粮食安全、环境与生态文明等多个方面，是国计民生、战略安全和可持续发展的重大保障。《国家创新驱动发展战略纲要》中指出，要强化原始创新，增强源头供给；坚持国家战略需求和科学探索目标相结合。生物学研究天然具有科学探索和支撑国家战略需求的双重属性，是生命科学原始创新的发源地，是不断满足并推进医药、农业和生物技术等国家战略需求发展的源头供给。

高通量测序技术的革命性突破，以及各种成像技术和组学技术的变革性发展使得生物学研究迈入了大数据时代。涌现出生物信息学、计算生物学、定量生物学等新兴领域，生命科学逐步从描述和

定性研究进入了定量研究阶段。通过生物学内部以及多学科交叉融合、技术集成，在生物学研究领域涌现出许多新的交叉学科和研究热点。具体表现为：对于生命活动的解析更加定量化和系统化，人工智能与脑科学研究不断深入，生物大数据的标准化与高效利用，改造、仿生、再生、创生能力不断加强。

瞄准世界科学前沿和国家重大需求，未来15年生物学的重要前沿领域包括：生物重要性状的进化机制，生物表型可塑性与环境适应机制，生态系统结构复杂性、功能多样性和系统稳定性的多尺度-多过程整合研究，基于单细胞及单分子分析技术的生物学研究，病原微生物的致病、耐药及传播机制，细胞命运可塑性与器官再生，细胞精细结构与可视化，遗传与表观遗传信息的建立与继承，个体发育与衰老机制，免疫应答及调控机制，行为与心理的认知过程与神经机制，生物大分子的结构功能与动态相互作用，营养代谢及其调控网络，基因编辑、基因递送与分子操控技术，基于智能生物材料的工程化组织构建、力学调控与医学应用等。

多学科领域的交叉会聚极大促进了生物学的快速发展，为生物学前沿探索和创新变革提供了更多可能性。同时，这些基础科学研究也在生物学的渗透下，开辟了许多新的研究方向。生物学的优先发展交叉领域包括：合成生物学及人工生命体，生物多样性和生态系统功能性状格局及演变的生物地理生态学研究，基于脑认知启发的人工智能和智能增强，光合作用与生物固氮的机制与模拟，类器官仿生构建与虚拟器官建模等。

生命科学是当今科学研究的前沿，新思想、新技术、新方法不断涌现，成为国际合作的活跃领域。国际合作既是生命科学发展的内生需求，也是生命科学发展的强大动力。生物学的重要国际合作方向包括：生物多样性和生命进化及野生动植物对全球气候变化的

响应和适应，大尺度生态系统过程联网观测和功能预测生态学，人类表型组的系统分析及健康表型形成的遗传机制，免疫系统对病原微生物和危险信号的感受及功能研究，全球生物多样性与健康组学大数据共享和分析体系建设等。

立足于我国生物学学科发展现状和国家战略需求，本书提出如下发展机制和政策建议：

(1) 聚焦两个关键问题：生命科学与生物技术的发展必须更加充分地与国家重大需求相结合，必须更加高效地应对科研范式变革所带来的新挑战。

(2) 建立健全重要科学问题的提出机制：加强“自上而下”的顶层设计，针对生物学的发展趋势提出重点攻关方向；建立“从下到上”的自主建议通道，由专家委员会对于各方面的建议进行总结，遴选重要的科学问题列入指南。

(3) 鼓励“从0到1”原创探索：对原创探索性科学问题给予专门的项目申请和评审绿色通道，特别是对于非共识项目应提供更为合理的评选机制和资助渠道。建立容错机制，推动颠覆性、变革性创新。

(4) 加强成果识别与发现：探索设立专门机构，推动面向临床医学重大需求的基础研究成果落地转化。加强与其他部门、地方政府的合作，推动产出成果与经济社会发展需求对接。

(5) 优化经费多元投入机制：探索支持企业投入基础研究的新机制；建立产业目标导向的基础研究问题库和重大基础研究项目悬赏制；探索社会力量以慈善捐赠等方式加大投入的有效机制。

(6) 制定择优、长期、稳定的支持模式：着力推进优秀青年人才的培养，通过长期稳定支持一批具有国际竞争力的科学家，形成对生命科学前沿的引领能力。

(7) 着力突破制约生物学研究发展的共性问题 and 瓶颈：推进国

家级生物数据中心和资源平台的建设；大力加强对于科学仪器设备研制的支持，规避“卡脖子”风险；加强生物医药转化平台建设，提供系统性和专业化的转化服务。

Abstract

Biology is a discipline that studies the basic characteristics of organisms, describes basic phenomena and explores fundamental principles of life. Thanks to the rapid progress in molecular biology and other disciplines, the research paradigm of modern biology has shifted from macroscopic to microscopic, from phenotypic description to the investigation of correlation and causation. The development of cutting-edge technologies and methodologies has greatly promoted the frontier research in life science and will continue to greatly accelerate the understanding of the essence of life. Meanwhile, the convergence of multidisciplinary fields, like biology and mathematics, physics, chemistry, information science, technology science as well as engineering science, has produced interdisciplinary sciences including system biology, synthetic biology and biomedical imaging, contributing to the exploration of the endless frontiers in understanding life. Biological research is the foundation for life and health security, agriculture and food safety, environment and ecological civilization, making it a major contributor of our national economy and a guardian of people's livelihood, strategic security and sustainable development.

This book describes the scientific significance and development status of biology, and analyzes the trend of progression. In addition,

the key directions in the field of biology and related sub-disciplines in China from 2021 to 2035 are highlighted, including the critical scientific questions, the goals and the priority areas, with suggestions of corresponding policies and measures to promote biological research.

Oriented towards the scientific frontiers and the major national interests in the coming 15 years, the critical areas in biological research include but are not limited to the following: the evolutionary mechanism of important biological traits; the principle of phenotypic plasticity and environmental adaptation; multi-scale and multi-process integration of ecosystem's structural complexity, functional diversity and system stability; biological studies based on single cell and single molecule techniques; pathogenicity, drug resistance and transmission mechanisms of pathogenic microorganisms; plasticity of cell fate and organ regeneration; cell fine structure and visualization; the establishment and inheritance of genetic and epigenetic information; ontogeny and aging mechanism; immune response and regulation; cognitive process and neural basis of behavior and psychology; structure, function and dynamic interactions of biological macromolecules; nutrient metabolism and regulation network; gene editing, delivery and molecular manipulation technology; intelligent biomaterial-based engineered tissue construction, mechanical regulation and medical applications.

The integration of multidisciplinary fields will greatly promote the rapid development of biology and provide more possibilities for frontiers exploration and innovative evolution. Meanwhile, deep integration of biology with other disciplines has opened up many new directions. The emerging cross-fields include: synthetic biology and artificial life; biogeoeological research on the pattern and evolution of biodiversity and ecosystem's functional traits; artificial intelligence and intelligence enhancement based on brain cognitive inspiration; mechanism and simulation of photosynthesis and biological nitrogen fixation; organoid

bionic construction and virtual organ modeling.

Life science lies in the frontiers of scientific research nowadays, with the constant emergence of new ideas, technologies, and methods, making it one of the most active areas in the international cooperation. Recommended important international cooperation directions include: biodiversity, life evolution and the response and adaption of wild animals and plants to global climate change; large-scale ecosystem process networking observation and function prediction ecology; systematic analysis of human phenotype group and genetic mechanism of healthy phenotype formation; perception and function of immune system to pathogenic microorganisms and danger signals; big data sharing and analysis system construction of global biodiversity and health omics.

目 录

总序 / i

前言 / vii

摘要 / ix

Abstract / xiii

第一章 生物学学科概述 / 1

第一节 生物学学科的内涵与战略地位 / 1

一、生物学学科的内涵 / 1

二、生物学学科的战略地位 / 2

第二节 生物学学科的发展趋势和现状 / 4

一、生物学学科的发展趋势 / 4

二、生物学学科的发展现状 / 7

第三节 生物学的重要前沿领域和优先发展交叉领域 / 12

一、生物学的重要前沿领域与关键科学问题 / 12

二、生物学的优先发展交叉领域与关键科学问题 / 22

第四节 生物学的国际合作需求 / 26

一、生物学的重要国际合作方向与关键科学问题 / 26

二、开展国际合作的重要举措 / 30

第五节 发展机制与政策建议 / 30

第二章 动物学发展战略研究 / 33

第一节 内涵与战略地位 / 33

第二节 发展趋势与发展现状 / 35

一、动物学的发展趋势 / 35

二、动物学的发展现状 / 38

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 41

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 41

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 47

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 48

第四节 发展机制与政策建议 / 49

第三章 植物学发展战略研究 / 51

第一节 内涵与战略地位 / 51

第二节 发展趋势与发展现状 / 52

一、植物学的发展趋势 / 52

二、植物学的发展现状 / 54

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 55

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 55

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 63

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 65

第四节 发展机制与政策建议 / 67

第四章 微生物学发展战略研究 / 69

第一节 内涵与战略地位 / 69

第二节 发展趋势与发展现状 / 71

一、微生物学的发展趋势 / 71

二、微生物学的发展现状 / 73

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 75

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 75

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 81

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 84

第四节 发展机制与政策建议 / 85

第五章 生态学发展战略研究 / 87

第一节 内涵与战略地位 / 87

第二节 发展趋势与发展现状 / 89

一、生态学的发展趋势 / 89

二、生态学的发展现状 / 93

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 95

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 95

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 102

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 104

第四节 发展机制与政策建议 / 106

第六章 细胞生物学发展战略研究 / 108

第一节 内涵与战略地位 / 108

第二节 发展趋势与发展现状 / 110

一、细胞生物学的发展趋势 / 110

二、细胞生物学的发展现状 / 115

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 118

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 118

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 124

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 127

第四节 发展机制与政策建议 / 129

第七章 遗传学与生物信息学发展战略研究 / 130

第一节 内涵与战略地位 / 130

第二节 发展趋势与发展现状 / 132

一、遗传学与生物信息学的发展趋势 / 132

二、遗传学与生物信息学的发展现状 / 134

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 136

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 136

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 141

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 143

第四节 发展机制与政策建议 / 143

第八章 发育生物学发展战略研究 / 145

第一节 内涵与战略地位 / 145

第二节 发展趋势与发展现状 / 147

一、发育生物学的发展趋势 / 147

二、发育生物学的发展现状 / 150

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 154

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 154

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 161

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 162

第四节 发展机制与政策建议 / 163

第九章 免疫学发展战略研究 / 165

第一节 内涵与战略地位 / 165

第二节 发展趋势与发展现状 / 167

一、免疫学的发展趋势 / 167

二、免疫学的发展现状 / 173

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 176

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 176

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 180

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 181

第四节 发展机制与政策建议 / 182

第十章 神经科学、心理学和认知科学发展战略研究 / 184

第一节 内涵与战略地位 / 184

第二节 发展趋势与发展现状 / 186

一、神经科学、心理学和认知科学的发展趋势 / 186

二、神经科学、心理学和认知科学的发展现状 / 187

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 189

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 189

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 196

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 200

第四节 发展机制与政策建议 / 201

第十一章 生理学发展战略研究 / 203

第一节 内涵与战略地位 / 203

第二节 发展趋势与发展现状 / 205

一、生理学的发展趋势 / 205

二、生理学的发展现状 / 207

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 210

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 210

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 217

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 219

第四节 发展机制与政策建议 / 221

第十二章 生物物理与生物化学发展战略研究 / 223

第一节 内涵与战略地位 / 223

第二节 发展趋势与发展现状 / 224

一、生物物理与生物化学的发展趋势 / 224

二、生物物理与生物化学的发展现状 / 226

第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 229

一、重要前沿方向与关键科学问题 / 229

二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 237

三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 238

第四节 发展机制与政策建议 / 239

第十三章 分子生物学与生物技术发展战略研究 / 241

第一节 内涵与战略地位 / 241

第二节 发展趋势与发展现状 / 242

一、分子生物学与生物技术的发展趋势 / 242

二、分子生物学与生物技术的发展现状 / 244	
第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 246	
一、重要前沿方向与关键科学问题 / 246	
二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 252	
三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 254	
第四节 发展机制与政策建议 / 255	
第十四章 生物材料、成像与组织工程学发展战略研究 / 257	
第一节 内涵与战略地位 / 257	
第二节 发展趋势与发展现状 / 259	
一、生物材料、成像与组织工程学的发展趋势 / 259	
二、生物材料、成像与组织工程学的发展现状 / 262	
第三节 重要前沿方向、新兴交叉方向和国际合作重点方向 / 266	
一、重要前沿方向与关键科学问题 / 266	
二、新兴交叉方向与关键科学问题 / 273	
三、国际合作重点方向与关键科学问题 / 274	
第四节 发展机制与政策建议 / 276	
主要参考文献 / 277	
关键词索引 / 294	

生物学学科概述

第一节 生物学学科的内涵与战略地位

一、生物学学科的内涵

生物学是研究生物体的基本特征，探索生命活动基本规律和生命现象本质的科学。其研究对象包括动物、植物、微生物及人类本身，研究层次涉及分子、细胞、组织、器官、个体、群体及群落和生态系统，涵盖多个研究领域和分支学科，如动物学、植物学、微生物学、生态学、细胞生物学、遗传学与生物信息学、发育生物学、免疫学、神经科学、心理学与认知科学、生理学、生物物理与生物化学、分子生物学与生物技术、生物材料与组织工程学等。

二、生物学学科的战略地位

1. 支撑实现全方位全周期健康服务

我国经济全球化、工业化、城镇化进程不断加快，人口老龄化不断加剧，新发传染病和慢性非传染性疾病等多重威胁不断加大，导致卫生事业发展和国民健康保障压力激增，以生物科技带动生命健康发展成为重大战略需求。生物医学研究应紧密围绕“健康中国”建设目标，系统整合生物数据、临床信息和样本资源，突破体外诊断、健康促进、精准医学等关键技术，普及推广疾病防治技术，促进临床新技术、新产品转化应用。例如：在精准医学方面，促进生物和信息技术的融合发展，建立多层次精准医疗知识库体系和国家生物医学大数据共享平台，发展新一代基因测序、多组学研究和大数据融合分析等关键技术，开发一批重大疾病早期筛查和分子分型、个体化治疗和疗效监测等精准解决方案和决策支持系统，将极大推动医学诊疗模式变革。

健康需求不仅仅关注单一疾病的诊治，更需要从整体的角度对人体系统进行认知和调节。在此方面，生理学特别重视功能与整合，强调从整个机体的功能、调控、内稳态表型出发，在空间上，研究器官、组织、细胞、分子层面在内外环境作用下呈现的功能、规律、机制，特别是同一层次不同组织、细胞的交互作用；在时间上，研究发育、成年和衰老各个阶段的规律、机制与生物节律变化，特别是生命周期早期事件对于衰老发生、发展的影响。发育生物学则更加专注于发育的动态过程和调控机制研究，如细胞谱系建立及命运决定、器官稳态维持和再生修复、器官再生潜能的获得和丢失、细胞命运的在体改造和操控等，从而认识各种生殖发育缺陷和疾病的产生原因，实现器官再生的人工促进，延缓个体衰老过程。

2. 促进生物多样性保护

生物资源是生物科技创新的重要物质基础，生物多样性保护对于生态文明和可持续发展具有关键的保障作用。我国正处于科技大国向科技强国迈进的历史进程中，对于生物资源的收集、保藏、利用虽取得一定成效，但仍然存在诸多不足，主要体现为资源丰富但开发利用滞后。面对可持续发展及生

生物多样性保护的战略需求，还需要继续提升我国生物资源的保护保藏关键技术，加强生物资源功能评价及应用转化，建立以战略性生物资源保护、高值生物资源功能评价、特有生物资源挖掘为核心的生物资源转化新型模式与技术创新体系。

近年来人类活动导致地球环境迅速恶化，强烈的社会需求驱动着生态学的理论发展和技术进步，生态学已经为濒危物种保育、生物入侵预警和控制、退化生态系统恢复、生物资源管理、全球变化及应对等诸多问题提供了知识基础和研究方法的支撑。物种多样性的形成与维持机制一直是群落生态学的核心问题。

3. 确保国家生物安全

全球化进程和生物技术的飞速发展，导致生物安全形势日益严峻。生物安全及相关风险防控，逐渐成为一个涉及政治、军事、经济、科技、文化和社会等诸多领域的世界性问题。而生物科技本身呈现出明显的“两面性”，既是生物安全防控措施的关键基石，也是引发生物安全风险的重要因素。以美国为代表的发达国家，在生物安全领域投入巨资，与之相比，我国的生物安全防御能力亟待加强。针对维护国家生物安全的重大需求，需要着重解决我国生物安全领域的关键技术瓶颈与重要科学问题，例如：加快医药、农业、环境等生物技术的研究储备，研发抵御生物威胁的风险评估、监测预警、识别溯源、应急处置、预防控制和效果评价相关技术、方法、装备和产品。同时，建立生物安全相关的信息和实体资源库，构建高度整合的生物安全威胁防御体系，从而确保国家生物安全。

生物安全和防御体系是一个系统性工程，需要多学科共同参与。例如：由致病微生物引起的新发再发传染病，导致多起全球公共卫生紧急事件，研究病原微生物致病机制、传播机理、进化规律与宿主互作机制等，将为研发抗微生物感染的新型策略奠定基础。而这些传染性疾病的治疗，在很大程度上又依赖于免疫机制的阐明及其后续的药物、疫苗研制，因此，免疫学的基本方向和新兴技术，如免疫识别与免疫应答的机理机制、免疫细胞命运决定与调控、疫苗的理性设计等，都将作为构筑生物安全体系的重要环节。

第二节 生物学学科的发展趋势和现状

一、生物学学科的发展趋势

生命系统具有高度复杂性，同时与复杂多变的外部环境进行相互作用，导致生命活动呈现出非线性、多层次、开放性的特征。为解析生命系统中多组元、多尺度、跨时空、跨层次的相互作用，各国（地区）在生命科学技术方面，均致力于建立以细胞为单元、以个体为中心的多层级、系统化、定量化研究体系。

1. 对生命活动的解析更加定量化和系统化

以各类组学技术的发展进步为标志，对生命活动的研究更加趋向于采用定量化和系统化的方式，在多层次上对生命机制进行阐明，各类“图谱”研究方兴未艾。例如：在基因组图谱方面，借助三代测序技术突破了高度重复序列图谱绘制这一难点，获得了首个完整精确的人类Y染色体着丝粒图谱。单细胞转录组测序技术进步使不同细胞类型得到精确区分和标识，复杂器官乃至多细胞生物的细胞图谱取得重大突破，如小鼠下丘脑视前区细胞空间图谱为更好理解大脑运作方式奠定基础。蛋白质修饰组学技术取得重要进展，得益于修饰蛋白质富集和质谱分析技术的协同进步，深度覆盖、高特异性、高通量的蛋白质修饰组学研究成为可能。代谢组学在鉴定生物标志物和表征生物作用机制方面，已经成为一项有力工具。与此同时，图谱和组学技术正被广泛地应用于生物标志物和药物靶标发现，以及疾病病理研究。例如：美国癌症和肿瘤基因图谱计划基于多组学数据和临床数据的综合分析，成功绘制出“泛癌症图谱”。

定量化和系统化研究极大促进了生命科学中一些传统或宏观领域的研究，例如：动物系统与进化生物学的研究对象从单个个体扩展到群体甚至整个群落、区系的发展趋势过程；数据模型化和组学分析等技术的广泛应用，使得对于分子和表型进化、进化的动力与进化发育机制等核心问题的研究成为可

能；在植物研究方面，得益于基因组学、生物信息学等新技术的应用，植物学的研究已经实现从模式植物到农作物的全覆盖，大大加深了对重要农作物、重要农艺性状分子调控机制的理解。

2. 人工智能与脑科学研究不断深入

近年来，脑科学研究新技术不断取得突破，从而推动神经、脑、认知等前沿研究持续深入。例如：基于 G 蛋白偶联受体的乙酰胆碱传感器实现了神经元交流的可视化；模拟血脑屏障的新型类脑芯片可作为研究血脑屏障与大脑相互作用的有效模型。在脑细胞普查和基因组研究方面，美国脑计划细胞普查网络项目产生的首批数据包含了 130 多万个鼠脑细胞的分子特征和解剖学数据。另外，人工智能技术（AI）开始应用于疾病风险预测、诊断和病理分析，在急性髓系白血病、心血管疾病风险预测，脑肿瘤、肺癌的诊断与分型，以及眼部疾病诊断等方面均展现出良好前景，一批人工智能医疗产品也相继获批，例如：美国食品药品监督管理局（FDA）批准了用于检测糖尿病患者视网膜病变的 AI 设备 IDx-DR，以及基于脑部 CT 图像的 AI 辅助分诊产品等。

脑是人类赖以认识外部世界和自我的物质基础，神经科学研究被视为人类科学最后的疆域，认识脑、保护脑和开发脑是人类认识自然与自身的终极挑战。解析神经环路结构的形成与功能，并融合经典还原论和系统论研究是神经科学发展的必然规律和态势。同时，以人工智能为代表的新工业革命即将到来，而把人脑智能赋予机器这一目标的实现，显然依赖于对人脑智能基础的深入研究。

3. 生物大数据的标准化与高效利用

随着生命科学研究定量化进程的发展，生物大数据的利用与发掘日益受到重视，其数据标准化问题已经成为关注的焦点。2018 年，美国国立卫生研究院（NIH）发布了《数据科学战略计划》，为 NIH 资助的生物医药数据科学生态系统现代化制定发展路线图，为生物数据存储和使用中的高效性和安全性问题，以及数据涉及的成果产出、伦理问题等制定相应的策略方针。英国在《产业战略：生命科学部门协定》中，也高度关注生物大数据这一热点，提出建设世界领先的健康队列这一目标，希望在未来 5 年完成全球首个

100 万人全基因组测序，并支持建设区域数字创新中心网络，提供临床研究数据服务等。

生物大数据的发掘利用促进了生物信息学的快速发展，随着各种高通量组学检测方法的开发和广泛应用，生物信息学的研究重点逐渐转向基因组组装、转录组数据分析、基因功能富集分析、表观修饰组数据分析等各种组学大数据的分析挖掘，另外，由于各种生命科学大数据的快速产生，生物信息学的研究重点也由“数据平台建设和方法软件开发”转向“数据平台建设和方法软件开发”与“信息挖掘和规律发现”并重。

4. 改造、仿生、再生、创生能力不断加强

对生命活动愈加深入的认识理解，有效提升了对于生物体的改造能力。首先，基因编辑技术在编辑效率、精准度方面不断优化，高通量精确基因编辑的安全性进一步提升，基因编辑工具箱不断拓展，在人工改造染色体、动物模型构建等应用领域取得突破性进展。其次，再生医学应用转化进程不断推进，在基础研究方面，成功构建了孤雄小鼠，实现人类卵原细胞的体外构建；临床研究方面，利用干细胞结合基因疗法使眼盲小鼠重新产生视觉反应；组织工程疗法展现出在多种疾病治疗中的稳定效果。最后，合成生物学研究从单一生物部件的设计，拓展到对多种基本部件和模块的整合；首次实现了人工创建单条染色体的真核细胞，低成本构建大型基因文库的技术日渐成熟；同时，合成生物学在 DNA 编写器和分子记录器、组织细胞编程、生物电子学融合等技术领域不断拓展。

近年来，国际干细胞基础与前沿研究持续深入，干细胞调控基本原理和关键技术取得了一系列关键突破，基于干细胞的再生医学也因此得以迅猛发展。基于干细胞的组织和器官修复及功能重建，将是治疗许多终末期疾病的希望和有效途径。干细胞和再生医学不仅正引领现有临床治疗模式的深刻变革，而且还将成为 21 世纪具有巨大潜力的新兴高科技产业之一。此外，运用组织工程原理，通过三维（3D）培养技术在体外诱导干细胞或器官祖细胞分化为在结构和功能上均类似目标器官的类器官，以及不单一依赖于外源性种子细胞体内组织工程也将在器官移植、基础研究及临床诊疗各方面有重要的应用价值。

二、生物学学科的发展现状

1. 生物学学科学术论文发表情况分析

2011~2020年，全球生物学领域的发文量呈逐年递增的趋势，平均每年发表SCI期刊论文60多万篇。全球发文量最多的5个国家依次为美国、中国、德国、英国和日本。美国在生物学领域的发文数量优势显著，中国则是本领域论文数量增长最快的国家。10年来，中国每年的发文数量一直排名第2。

发文量前5的国家主要发文方向较为一致，均在肿瘤学、生物化学与分子生物学、神经科学、细胞生物学、免疫学等方向发文较多。相较而言，中国在神经科学、免疫学方向的发文比例相对较低；在生物工程和微生物学领域的发文比例相对较高。（图1-1）

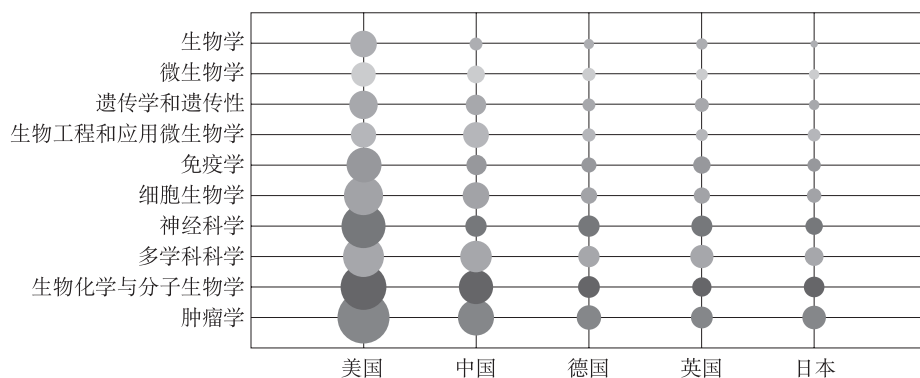


图 1-1 发文量前 5 国家主要发文方向

2011~2021年，生物学领域的CNS（*Cell*、*Nature*、*Science*）及其子刊收录论文19万多篇，每年的发文数量呈不断增加的趋势。发文量排名前7的国家依次为美国、英国、德国、中国、法国、加拿大和日本。美国在CNS及其子刊的发文数量优势显著，中国则是论文数量增长最快的国家，近10年来，中国的发文量排名由第9名上升至第2名。

2011~2021年，发表高被引论文数量最多的10个国家依次为美国、中国、英国、德国、法国、加拿大、澳大利亚、荷兰、意大利、瑞士。（图1-2）

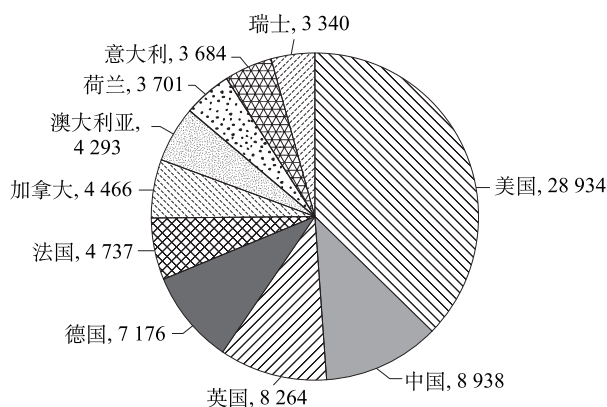


图 1-2 2011~2021 年生物学领域 ESI 高被引论文前 10 国家（及篇数）

2. 生物学领域重大成果

近年来我国科学家在生物学领域取得了一系列国际瞩目的突破。例如，揭示了 RNA 剪接的关键分子机制，从分子层面解释了剪接体执行 RNA 剪接的机制，极大地推动了 RNA 剪接这一基础研究领域的发展；基于体细胞核移植技术成功克隆出猕猴；创建了首例人造单染色体真核细胞；发现精子 RNA 可作为记忆载体将获得性性状跨代遗传，第一次从精子 RNA 角度为研究获得性性状的跨代遗传现象开拓了全新的视角，提出精子 tsRNAs 是一类新的父本表观基因，可介导获得性代谢疾病的跨代遗传；成功绘制出全新的人类脑图谱，突破了多年来传统脑图谱绘制的瓶颈；在国际上率先解析了高等植物菠菜光合作用超级复合物的高分辨率三维结构，为实现光能向清洁能源氢气转换提供了具有启示性的方案；提出了基于胆固醇代谢调控的肿瘤免疫治疗新方法，开辟了肿瘤免疫治疗的全新领域，证明了代谢调控的关键作用；构建出世界上首个非人灵长类孤独症模型，为深入研究孤独症的病理与探索可能的治疗干预方法做出了重要贡献；揭示了胚胎发育过程中关键信号通路的表观遗传调控机理，为发育生物学的基本原理提供了崭新的认识；以流感病毒为模型，实现了流感病毒由致病性传染源向预防性疫苗和治疗性药物的重大转变；发现了新型古人类化石，填补了古老型人类向早期现代人过渡阶段中国古人类演化上的空白；完成了酿酒酵母 4 条染色体的从头设计与化学合成；揭示了抑郁发生及氯胺酮快速抗抑郁机制，为研发抗抑郁药物或干预技术提

供了崭新的思路；研制出用于肿瘤治疗的智能型 DNA 纳米机器人，实现了纳米机器人在活体血管内稳定工作并高效完成定点药物输运功能；创建出可探测细胞内结构相互作用的纳米和毫秒尺度成像技术，提供了一个从机制上洞察关键生物过程的窗口。

此外，我国科学家还取得了其他一系列有国际影响的成果，例如：揭示了动物对特殊环境适应的遗传机制，大规模虫害（如飞蝗）发生机制，重要生物性状筛选和珍稀濒危动物的濒危成因与适应性进化机制等；阐明了植物重要生理和发育过程（如植物免疫、生殖发育、植物-微生物互作等）的遗传和表观遗传调控机制，揭示了中国植物区系的进化历史；在古菌生物地球化学作用、基本生物学过程、病毒与宿主免疫研究方面取得国际水平的研究成果，在棉花“癌症”黄萎病的土传真菌——大丽轮枝菌的侵染生物学、植物-真菌互作 RNAi 调控基础上第一次提出病原微生物的植物抗病小体概念；系统阐明了中国陆地碳汇的大小及其空间分布特征，量化了中国陆地生态系统固碳能力的变化及其形成机制，发现人类活动以及局部气候变化显著提高了中国陆地生态系统的固碳能力；揭示了全球根功能属性的生物地理格局，发展了“根经济谱理论”，提出了“根效率是植物进化的动力”理论，阐明了植物进化和传播的基本原理；揭示了不同功能型土壤真菌驱动亚热带森林群落多样性的作用模式，成功破译了亚热带森林生物多样性维持“密码”；首次提出了基于外生菌根真菌与病原真菌互作过程影响植物生存的物种共存新模式；首次对生物多样性是亚热带森林高产的直接原因给出了确切的证明，填补了森林生物多样性的生态系统功能研究的空白；系统性阐明了多个细胞信号通路（如 Hippo、mTOR、Wnt 等）在个体发育、肿瘤发生与转移过程中的分子机制；揭示了胞外体和迁移体可作为细胞间信号转导介质调控肿瘤细胞的增殖、代谢、行为和肿瘤转移的机制；发现了液-液分离相变在自噬信号通路的普遍作用；发现了程序性细胞死亡（如细胞坏死和细胞焦亡）过程中的关键因子，并阐明了细胞死亡分子机制；完成了多个干细胞研究和核移植技术首创和突破，包括孤雄小鼠、化学诱导多潜能干细胞系、扩展在体功能的细胞类型等；揭示了细胞代谢过程中的葡萄糖感知和 AMPK 激活的新机制；解析了 DNA 复制起始、偶联的核小体组装等机制，发现了大量人类疾病相关的

重要基因和易感突变，完成了多个物种的基因组测序，鉴定到一系列与主要动植物重要性状相关的基因，建立了多种表观遗传修饰测序技术，鉴定了新型非编码 RNA (ncRNA) 及其功能，发现了 RNA 修饰的可逆性规律；由中国科学院北京基因组研究所建设的生命科学大数据中心已经发展成为与美国的 NCBI、欧洲的 EBI 并列的国际数据资源库；新型超分辨显微成像技术、高通量低成本单细胞转录组 Microwell-seq 技术处于世界领先地位；解析了原始生殖细胞和早期胚胎发育的表观遗传特征，建立了单倍体胚胎干细胞，发现了器官发育与再生过程中多种细胞新功能，小分子离体操控细胞命运等；在天然免疫研究领域处于世界领先地位，发现了一系列感受病原微生物感染的细胞受体，发现了锰离子的免疫激活功能及其在抗感染、抗肿瘤及免疫佐剂中的应用前景；在活体化学神经递质检测技术、光遗传学神经调控新技术、荧光显微光学切片断层成像 (fMOST) 等脑连接图谱研究新技术等领域取得了多项重要突破，在本能行为的神经机制研究、类脑算法和神经拟态芯片研发领域已经居于世界领先地位；在睡眠过程中消除恐惧和痛苦记忆，为源于病理性记忆的精神疾病和行为障碍的治疗开辟了全新的视角；揭示了成人大脑皮层的深度可塑性，发现知觉学习会导致脑内功能的大尺度变化，挑战了传统的大脑可塑性理论和观点；揭示了心血管系统发生、重构与稳态维持的规律和调控机制，解析了体内造血干细胞发生、归巢、细胞异质性和微环境调控机制；从分子、细胞、环路和中枢整合等不同层次揭示了慢性瘙痒、慢性疼痛等的产生机制与转归；在发现低氧诱导因子通路重要基因 *EPAS1* 和 *EGLN1* 是藏汉族高原适应能力差异关键基因的基础上，对其作用机制进行了阐述；提出了高原肺水肿的炎症机制假说；解析了包括 30 纳米染色质、光合作用相关多个重要复合体、呼吸链重要蛋白质复合体、哺乳动物关键离子通道、G 蛋白偶联受体 (GPCR) 等超大生物分子复合体或膜蛋白的结构与机理；实现了基于单分子测序的精准医疗；蛋白质乙酰化调控代谢的原创发现已经成为国际经典本科教材内容，代谢物调控信号、胆固醇转运及新功能的发现、葡萄糖及氨基酸感知新机制的发现已经实现国际引领；产出了新型 RNA 分子的代谢与调控、新型基因编辑工具的开发等一系列亮点工作；阐释了力学因素对获得性免疫、肿瘤转移以及对称性发育过程的调控及机理，提出了“组织诱导性生物材料”新概念及“材料生物学”新方向，并在骨、软