



新生物学丛书

生物工业化路线图： 加速化学品的先进制造

Industrialization of Biology:
A Roadmap to Accelerate the
Advanced Manufacturing of Chemicals



美国国家科学院研究理事会 编
陈 方 丁陈君 刘 斌 译



科学出版社

新生物学丛书

生物工业化路线图：加速 化学品的先进制造

**Industrialization of Biology: A Roadmap to
Accelerate the Advanced Manufacturing of
Chemicals**

“生物工业化路线图：加速化学品的先进制造”委员会
化学科学与技术分部

生命科学分部

地球与生命研究部

美国国家科学院研究理事会 编

陈 方 丁陈君 刘 斌 译

科 学 出 版 社

北 京

图字：01-2013-0161 号

内 容 简 介

生物工业以系统生物学、合成生物学、生物工程等核心技术交叉融合其他学科，具有原料可再生、人工设计、过程清洁等可持续发展的典型特征。作为生物工业化的重要应用领域之一，化学品的生物制造在近年表现出广阔的发展前景，已成为当前化工产业发展的重要战略选择。2014 年，美国能源部和美国国家科学基金会联合成立专家委员会，完成并出版《生物工业化路线图：加速化学品的先进制造》报告，展望了化学品生物制造的未来发展愿景，围绕原料利用到使能转化，以及生物体研究等方面展开论述，得出了一系列技术结论与建议，提出了生物工业化未来 10 年发展的路线图目标。

本书的主要读者对象为生物资源、生物技术与生物产业相关领域的决策管理人员、研究与技术人员、行业与企业参与者，也可供大专院校相关专业的师生参考使用。

This is the translation of *Industrialization of Biology: A Roadmap to Accelerate the Advanced Manufacturing of Chemicals*, Committee on Industrialization of Biology: A Roadmap to Accelerate the Advanced Manufacturing of Chemicals; The National Research Council © 2015 National Academy of Sciences. First published in English by National Academies Press. All rights reserved.

图书在版编目(CIP)数据

生物工业化路线图：加速化学品的先进制造/美国国家科学院研究理事会编；陈方，丁陈君，刘斌译. —北京：科学出版社，2017.6

(新生物学丛书)

书名原文：Industrialization of Biology: A Roadmap to Accelerate the Advanced Manufacturing of Chemicals

ISBN 978-7-03-053138-4

I. ①生… II. ①美… ②陈… ③丁… ④刘… III. ①生物工程 IV. ①Q81

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第128118号

责任编辑：岳漫宇 / 责任校对：郑金红

责任印制：张 伟 / 封面设计：刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本：720 × 1000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张：8 1/4

字数：166 000

定价：75.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

“新生物学丛书”专家委员会

主 任：蒲慕明

副主任：吴家睿

专家委员会成员 (按姓氏拼音排序)：

昌增益	陈洛南	陈晔光	邓兴旺	高 福
韩忠朝	贺福初	黄大昉	蒋华良	金 力
康 乐	李家洋	林其谁	马克平	孟安明
裴 钢	饶 毅	饶子和	施一公	舒红兵
王 琛	王梅祥	王小宁	吴仲义	徐安龙
许智宏	薛红卫	詹启敏	张先恩	赵国屏
赵立平	钟 扬	周 琪	周忠和	朱 祯

“生物工业化路线图：加速化学品的 先进制造”委员会

成员

Thomas M. Connelly, Jr. (委员会主席), 杜邦公司

Michelle C. Chang, 加利福尼亚大学伯克利分校

Lionel Clarke, 英国合成生物学领导委员会

Andrew D. Ellington, 得克萨斯大学奥斯汀分校

Nathan J. Hillson, 劳伦斯-伯克利国家实验室

Richard A. Johnson, Global Helix有限责任公司

Jay D. Keasling, 加利福尼亚大学伯克利分校

Stephen S. Laderman, 安捷伦科技有限公司

Pilar Ossorio, 威斯康星大学法学院

Kristala L. J. Prather, 麻省理工学院

Reshma P. Shetty, Ginkgo Bioworks有限公司

Christopher A. Voigt, 麻省理工学院

Huimin Zhao, 伊利诺伊大学香槟分校

国家研究理事会职员

Douglas Friedman, 专题负责人, 化学科学与技术分部

India Hook-Barnard, 高级项目官员, 生命科学分部

Carl-Gustav Anderson, 研究助理

Elizabeth Finkelman, 项目协调人

Nawina Matshona, 高级项目助理

John Sadowski, Christine Mirzayan科技政策研究学者(2014年冬)

化学科学与技术分部

成员

Timothy Swager, (联合主席), 麻省理工学院

David Walt, (联合主席), 塔夫斯大学

HÉCtor D. Abruña, 康奈尔大学

Joel C. Barrish, 百时美施贵宝公司

Mark A. Barteau, 密歇根大学

David Bem, 陶氏化学公司

Robert G. Bergman, 加利福尼亚大学伯克利分校

Joan Brennecke, 圣母大学

Henry E. Bryndza, 杜邦公司

Michelle V. Buchanan, 橡树岭国家实验室

David W. Christianson, 宾夕法尼亚大学

Richard Eisenberg, 罗切斯特大学

Jill Hruby, 桑迪亚国家实验室

Frances S. Ligler, 北卡罗来纳大学教堂山分校, 北卡罗来纳州立大学

Sander G. Mills, 默克研究实验室

Joseph B. Powell, 壳牌公司

Robert E. Roberts, 美国国防分析研究所

Peter J. Rossky, 莱斯大学

国家研究理事会职员

Teresa Fryberger, 主任

Douglas Friedman, 高级项目官员

Kathryn Hughes, 高级项目官员

Camly Tran, 博士后研究员

Carl-Gustav Anderson, 研究助理

Elizabeth Finkelman, 项目协调人

Nawina Matshona, 高级项目助理

Cotilya Brown, 高级项目助理

生命科学分部

成员

James P. Collins, (主席), 亚利桑那州立大学

Enriqueta C. Bond, 宝来惠康基金会

Roger D. Cone, 范德比尔特大学医学中心

Joseph R. Ecker, 索尔克生物研究所

Sean Eddy, 霍华德·休斯医学研究所珍利亚农场研究园区

Sarah C. R. Elgin, 华盛顿大学圣路易斯分校

David R. Franz, 美国陆军传染病医学研究所前指挥官, 顾问

Stephen Friend, Sage Bionetworks平台

Elizabeth Heitman, 范德比尔特大学医学中心

John G. Hildebrand, 亚利桑那大学

Richard A. Johnson, Global Helix有限责任公司

Judith Kimble, 威斯康星大学麦迪逊分校

Mary E. Maxon, 科学慈善联盟

Karen E. Nelson, 克雷格·文特尔研究所

Robert M. Nerem, 佐治亚理工学院

Mary E. Power, 加利福尼亚大学伯克利分校

Margaret Riley, 马萨诸塞大学阿默斯特分校

Lana Skirboll, 赛诺菲集团

Janis C. Weeks, 俄勒冈大学

Mary Woolley, Research! America 联盟

职员

Frances E. Sharples, 主任

Jo L. Husbands, 学者/高级项目主任

Jay B. Labov, 高级科学家/生物学教育项目主任

Katherine W. Bowman, 高级项目官员

Marilee K. Shelton-Davenport, 高级项目官员

Keegan Sawyer, 项目官员

Audrey Thevenon, 助理项目官员

Bethelhem Mekasha, 财务助理

Angela Kolesnikova, 行政助理

P. Kanoko Maeda, 高级项目助理

Jenna Ogilvie, 高级项目助理

“新生物学丛书”丛书序

当前，一场新的生物学革命正在展开。为此，美国国家科学院研究理事会于2009年发布了一份战略研究报告，提出一个“新生物学”（new biology）时代。这个“新生物学”，一方面是生物学内部各种分支学科的重组与融合；另一方面是化学、物理、信息科学、材料科学等众多非生命学科与生物学的紧密交叉及整合。

在这样一个全球生命科学发展变革的时代，我国的生命科学研究也正在高速发展，并进入了一个充满机遇和挑战的黄金期。在这个时期，将会产生许多具有影响力、推动力的科研成果。因此，有必要通过系统性集成和出版相关主题的国内外优秀图书，为后人留下一笔宝贵的“新生物学”时代精神财富。

科学出版社联合国内一批有志于推进生命科学发展的专家与学者，共同打造了一个21世纪中国生命科学的传播平台——“新生物学丛书”。希望通过这套丛书的出版，记录生命科学的进步，传递生物技术发展的梦想。

“新生物学丛书”下设三个子系列：科学风向标，着重收集科学发展战略和态势分析报告，为科学管理者和科研人员展示科学的最新动向；科学百家园，重点收录国内外专家与学者的科研专著，为专业工作者提供新思想和新方法；科学新视窗，主要发表高级科普著作，为不同领域的研究人员和科学爱好者普及生命科学的前沿知识。

如果说科学出版社是一个“支点”，这套丛书就像一根“杠杆”，那么读者就能够借助这根“杠杆”成为撬动“地球”的人。编委会相信，不同类型的读者都能够从这套丛书中得到新的知识信息，获得思考与启迪。

“新生物学丛书”专家委员会

主任：蒲慕明

副主任：吴家睿

2012年3月

译者序

近年来，世界主要发达国家与地区纷纷提出重振本国制造业、加快实施“再工业化”战略，强调运用新的信息技术、互联网优势整合传统劳动密集型制造业，大力发展生物工程、节能环保、新能源、新材料等战略性新兴产业；同时，为应对人类当前在食品、能源和环境方面的挑战，世界主要国家与地区积极部署生物工业化进程并采取措施。生物工业以系统生物学、合成生物学、生物工程等核心技术交叉融合其他学科，具有原料可再生、人工设计、过程清洁等可持续发展的典型特征。生物工业化的发展为人类提供生产所需的化学品、医药产品、能源和材料等，是解决人类目前面临的资源、能源及环境危机的有效手段，是现代社会由化石经济向生物经济过渡的必要手段。

当前，随着人们在生物技术领域前沿研究探索、工具平台研发、产品服务拓展方面不断取得进步，生物工业化发展的脚步逐渐加快，为全球经济社会可持续发展注入了新的活力。美国农业部(USDA)于2016年10月发布的报告指出，2014年，生物基产业为美国创造了422万个就业机会和3930亿美元的经济价值。英国生物科学与生物技术研究理事会(BBSRC)于2016年7月发布的报告指出，2014年，英国的生物经济总附加值(GVA)约为2200亿英镑，占英国GVA总量的13.6%，共提供了520万个就业机会。欧洲生物产业协会于2016年9月发布研究报告指出，2013年，工业生物技术为欧盟创造了316亿欧元的产值，预计到2030年将创造1000亿欧元的产值。中国也已将生物产业确立为我国七大战略新兴产业之一，在2016年11月发布的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》中提出加快生物产业创新发展步伐、培育生物经济新动力的要求，并在其后发布的《“十三五”生物产业规划》中提出，到2020年，生物产业规模达到8万亿~10万亿元，生物产业增加值占GDP的比例超过4%，成为国民经济的主导产业，实现就业机会大幅增加的发展目标。

生物工业化的重要应用领域之一是化学品的先进制造，经过近年的发展，已经表现出广阔的前景。发展化学品的先进生物制造，有助于降低对不可再生化石能源的依赖，变革污染低效的传统物资加工方式，促进绿色安全的新经济形态的形成，已成为当前化工产业发展的重要战略选择。

2014年，美国能源部(DOE)和美国国家科学基金会(NSF)联合成立了“生物工业化路线图：加速化学品的先进制造”委员会，专门围绕如何加速化学品的生物制造开展了讨论和研究，形成了《生物工业化路线图：加速化学品的先进制造》

报告，由美国国家科学出版社出版。本书对该报告原文进行了编译。

感谢美国国家科学院授权翻译出版此书。本书不仅仅在科技角度提出了本领域未来发展方向与路线图目标，还在科技战略规划和路线图方法论的角度给予了建议和启示，因此，在中国科学院科技促进发展局生物技术处的指导策划下，中国科学院成都文献情报中心组织了本书的编译工作。中国科学院成都文献情报中心陈方、丁陈君、陈云伟、郑颖、邓勇、中国科学院科技促进发展局刘斌等参与了编译，中国科学院微生物研究所青年研究员于波、中国科学院成都生物研究所青年研究员谭周亮进行了审校，在此一并感谢。对于因译者能力水平有限可能引起的内容翻译不当或表达不畅之处，恳请读者见谅并给予指正。

译者

2016年12月

原 书 序

高效生产有用且有益的商品并提供服务，已经成为过去两个多世纪以来促进产业发展和推动经济增长的基石。在此期间，推动产业化发展的基础技术随着科学新认识、技术新能力和市场新需求的变化而不断演化。在 19 世纪，深入理解物质的化学性质、反应机制及物理和催化过程的科学研究改变了产业图景。而到了 20 世纪初，将原油转化为广泛化学品（从塑料、油漆、洗涤剂到纺织品等）的新发现几乎改变了人们生活的方方面面。

当前，我们正处于一个新的转折点。在过去半个世纪的时间里，生物学取得的巨大进步——从 Watson 和 Crick 阐明 DNA 的结构，到今天合成生物学惊人而迅速的进展——已将我们带入了新一轮的化工生产创新期。以此为背景，在美国能源部和美国国家科学基金会的委托下，“生物工业化路线图：加速化学品的先进制造”委员会开展了此项研究。委员会的重任在于探讨如何加速化学品的生物制造，并创建一个面向未来的路线图。

委员会的 13 位成员（附录 C）在 2014 年 2~12 月完成召集，并进行了四次会面。成员的专业知识背景涉及合成生物学、代谢工程、分子生物学、微生物学、系统生物学、合成化学、化学工程、生物信息学、系统集成、计量学、化工制造、法律和生物伦理学等。委员会听取了微生物技术研究前沿的研究人员和行业领导者的意见，包括来自大型化工企业和一些高技术始创企业的人员。此外，我们还与美国政府机构和非政府组织的代表进行了对话。在 2014 年 5 月，委员会举行了一次为期两天的研讨会（附录 D），为本报告的结论、建议和路线图的提出奠定了基础。

任何路线图都只能提供暂时性的指导意见，在时间尺度上类似于快照。委员会致力于制订雄心勃勃的目标，所强调的成果不仅仅限于单独的技术层面。同时，随着科技的进步和经济环境的变化，往往是路线图的制订过程更能发挥持久的价值。因此，委员会将把路线图的制订过程作为一项持续的活动，资助机构也希望建立常态化的机制，以确保加速相关领域的发展并保持路线图的生命力。

根据 2012 年发布的美国《国家生物经济蓝图》中所指出的“生物经济作为由生物科学领域的研究与创新激发的经济活动，已成为世界经济格局中体量庞大且增长快速的部分，同时产生重要的公众利益”。我们研究发现，唯有加速生物经济走向成熟，才能发挥其在促进科技创新、催生经济增长和培育重大发现方面的巨大潜力。

Thomas M. Connelly, Jr.

“生物工业化路线图：加速化学品的先进制造”委员会 主席

致 谢

根据美国国家研究理事会(NRC)下属报告审查委员会批准的程序,本报告草案经拥有多视角和技术专长的专家进行评审。这个独立审查程序的目的是对报告提供坦诚的、批评性的评论,以确保该报告内容合理,并在客观性、证据充分性和应答性方面符合机构的标准。为确保评审过程的公正性,所有评审意见和草案手稿保密。

我们对以下评审专家表示感谢:

Scott Baker, 西北太平洋国家实验室

Sean Eddy, 霍华德·休斯医学研究所珍利亚农场研究园区

Jennifer Holmgren, LanzaTech 公司

Sang Yup Lee, 韩国科学技术院

James Liao, 加利福尼亚大学洛杉矶分校

Richard Murray, 加利福尼亚理工学院

Kathie Olsen, ScienceWorks 有限责任公司

Markus Pompejus, 巴斯夫集团

尽管上述列出的评审专家提出了许多建设性的意见和建议,但他们并未被要求认可或支持报告的结论或建议,他们也没有看到报告公布之前的最终草案。报告的终审是由麻省理工学院的 **Klavs Jensen** 和普渡大学的 **Michael Ladisch** 完成的,他们由美国国家研究理事会任命,依照制度程序负责对报告进行独立审查,并认真考虑所有评审专家的意见和建议。委员会和国家研究理事会对报告的最终内容承担全部责任。

目 录

摘要	1
工业生物技术的潜力	1
当前发展形势	2
科学不断发展	2
产业已经就绪	3
科学到产业显现鸿沟	3
未来愿景	4
技术结论、建议与路线图目标	6
非技术观点与社会关注点	8
成功之道	8
1 简介和背景	10
委员会责任和职责范围说明	11
定义	12
化学品制造	13
工具和技术	15
社会因素	15
报告内容	17
2 工业生物技术：过去与现在	18
生物经济与全球挑战	18
生物基市场已经显现并繁荣	18
工业生物技术的创新动力	20
实现生物工业化，制定宏伟的路线图，加速化学品的先进制造	21
融合	22
在应对全球巨大挑战中的社会效益	23
能源	23
气候变化与环境可持续	24
农业	24
竞争与创新	25
当今时代：科学与产业的现状与发展	25
DNA 技术、系统生物学、元基因组学和合成生物学带来的机遇	25

传统化学合成难以获得的新型高价值化学品	27
细胞内并行计算	28
产业已经就绪	28
典型案例	31
青蒿素	31
生物燃料：走向商业化	31
1,4-丁二醇 (BDO)	33
工业酶	34
监管框架	35
3 未来愿景：能够制造哪些新的化学品？	39
能够制造哪些化学品？	39
天然产物	41
复杂分子	42
聚合物	44
未来工业生物技术的商业模式	46
4 成功之道：如何去实现？	49
问题概述	49
原料	50
新碳源	50
多代原料	50
使能转化	54
发酵与过程	54
生物体	58
引言：“设计-构建-测试-总结”循环	59
完全整合的设计工具链	60
设计	62
构建	64
测试与测量	68
5 建议：如何定义和实现成功？	72
成功之道	72
技术需求和路线图	74
非技术观点与社会关注点	74
经济	74
教育与人力	75
监管	76
结束语	76